

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук, професор
_____ Петро ПЛІШКОВ
“__” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Проект системи електропостачання ремонтно-
механічного підприємства»**

**«Project of a power supply system for a repair and
mechanical enterprise»**

Виконав здобувач
IV курсу групи ЕЕ-22
ОПП 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Владислав БЕЗНОСЮК
«__» _____ 2026 р.

Керівник роботи
асистент
_____ Оксана СПІВАК
«__» _____ 2026 р.

Рецензент

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

_____ *Безносюк Владислав Вікторович*

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Проект системи електропостачання ремонтно-механічного підприємства

Project of a power supply system for a repair and mechanical enterprise

2. Керівник роботи Снівак Оксана Володимирівна, асистент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Робота присвячена розробці сучасної системи електропостачання ремонтно-механічного підприємства, яка задовольняє вимогам економічності та надійності роботи. З цією метою було проведено:

1. Провести розрахунок електричних навантажень.
2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень.
3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання.
6. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання.
7. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства.
8. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання.
9. Провести розрахунок спеціального розділу роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>канд. техн. наук, доц. Н. Гарасьова</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>8.05.2026</i>	
<i>2</i>	<i>Картограма електричних та теплових навантажень</i>	<i>11.05.2026</i>	
<i>3</i>	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>	<i>12.05.2026</i>	
<i>4</i>	<i>Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації</i>	<i>17.05.2026</i>	
<i>5</i>	<i>Трансформаторні підстанції</i>	<i>15.05.2026</i>	
<i>6</i>	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір обладнання</i>	<i>17.05.2026</i>	
<i>7</i>	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>20.05.2026</i>	
<i>8</i>	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>25.05.2026</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки роботи</i>	<i>27.05.2026</i>	
<i>10</i>	<i>Оформлення презентаційної частини роботи</i>	<i>31.05.2026</i>	

Дата видачі завдання

Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2026 р.

Завдання прийнято до виконання

Підпис здобувача _____

« ____ » _____ 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 88 с.; 20 рис.; 21 табл.; 8 джерел

Безносюк В.В. Проект системи електропостачання ремонтно-механічного підприємства. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

У межах проекту виконано фундаментальні інженерні обчислення, зокрема: розрахунок очікуваних електричних навантажень підприємства, визначення оптимальних режимів компенсації реактивної потужності та моделювання струмів короткого замикання для високовольтних вузлів мережі. На основі отриманих даних здійснено раціональний вибір схеми внутрішнього електропостачання з ЦРП-10 кВ, визначено параметри цехових підстанцій та розроблено інформаційну модель контролю енергоспоживання на базі системи АСКОВЕ згідно з вимогами ПУЕ.

Окрему увагу в роботі приділено спеціальному розділу, присвяченому енергозбереженню та оптимізації режимів роботи масового асинхронного електропривода. У межах цього розділу розроблено та математично обґрунтовано комплекс інженерних заходів: розраховано енергетичний ефект від переходу на електродвигуни високих класів ефективності за рахунок збільшення маси активних матеріалів; оцінено підвищення наскрізного ККД системи; доведено неефективність застарілих методів гідродинамічного дроселювання та фрикційного ковзання.

Ключові слова: система електропостачання, електричні навантаження ремонтно-механічного підприємства, енергоефективні двигуни, частотно-регульований електропривід

ABSTRACT

Qualification work: 88 p.; 20 Fig.; 21 tables; 8 sources

Beznosyuk Vladyslav. Project of a power supply system for a repair and mechanical enterprise. – Manuscript.

Bachelor's thesis on OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

Within the project, fundamental engineering calculations were performed, in particular: calculation of expected electrical loads of the enterprise, determination of optimal modes of reactive power compensation and modeling of short-circuit currents for high-voltage network nodes. Based on the data obtained, a rational choice of the internal power supply scheme with a 10 kV DCS was made, parameters of shop substations were determined and an information model of energy consumption control based on the ASKOE system was developed in accordance with the requirements of the PUE.

Particular attention in the work was paid to a special section dedicated to energy saving and optimization of operating modes of a mass asynchronous electric drive. Within the framework of this section, a set of engineering measures was developed and mathematically substantiated: the energy effect of the transition to high-efficiency electric motors was calculated due to an increase in the mass of active materials; the increase in the end-to-end efficiency of the system was estimated; the inefficiency of outdated methods of hydrodynamic throttling and friction sliding was proven.

Keywords: power supply system, electrical loads of a repair and mechanical enterprise, energy-efficient motors, variable frequency drive

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	9
1.1 Розрахунок типових електричних навантажень в електричних мережах до 1000В.....	9
1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень	11
1.3 Розрахунок електричних навантажень у силових мережах напругою понад 1000 В	16
1.4 Побудова графіків електричних навантажень підприємства	21
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ РЕМОНТНО-МЕХАНІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА	25
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	27
3.1 Обґрунтування схеми зовнішнього електропостачання	27
3.2 Обґрунтування рівнів напруги та топології внутрішньозаводських електричних мереж	28
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПРИНЦИПИ ЇЇ КОМПЕНСАЦІЇ.....	36
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв в високовольтних та низьковольтних мережах	36
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв.....	41
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА	46
5.1. Обґрунтування кількості та номінальної потужності силових трансформаторів головної підстанції.....	46
5.2. Вибір кількості та потужності трансформаторів, та місця розташування цехових підстанцій (ТП)	47
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ І ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	48
6.1 Розрахунок струмів короткого замикання	48
6.2 Вибір та перевірка високовольтного комутаційного обладнання.....	52
РОЗДІЛ 7. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	57
7.1 Шляхи енергозбереження в електроприводах	57
7.2. Енергозбереження в режимах частих пусків та гальмувань.....	80
ВИСНОВКИ	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	88

					ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Проект системи електропостачання ремонтно- механічного підприємства			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розроб.	Безносюк В.В									6	88
Перев.	Співак О.В							ЦНТУ гр. ЕЕ-22			
Н. контр.	Співак О.В										
Затвер.	Плешков П.Г.										

ВСТУП

Сучасний розвиток промислового комплексу України вимагає безперервного вдосконалення, надійності та високої ефективності елементів енергетичної інфраструктури. Комплекс взаємопов'язаних технічних засобів, устаткування та пристроїв, призначених для генерації, трансформації, транспортування та розподілу електричної енергії між споживачами, формує систему електропостачання (СЕП).

Основною метою створення та функціонування СЕП промислових підприємств є забезпечення безперебійного та якісного живлення технологічних реципієнтів. До складу основних споживачів електроенергії сучасного виробництва належать: електромеханічні системи та силові електроприводи різноманітних машин і механізмів; термічне устаткування та промислові електричні печі; електролізні та гальванічні установки; апарати та автоматизовані комплекси для електричного зварювання; системи штучного робочого, аварійного та технологічного освітлення; інші допоміжні й інфраструктурні об'єкти підприємства.

Проектування ефективної та економічно доцільної системи електропостачання є складним багатофакторним завданням, яке потребує першочергового вирішення таких науково-технічних та інженерних питань.

У сучасних умовах дефіциту енергетичних ресурсів та стрімкого зростання їхньої вартості, критично важливим аспектом проектування стає енергоефективність. Впровадження енергоощадних технологій в елементах електромеханічних систем дозволяє значно знизити собівартість кінцевої продукції підприємства та зменшити екологічне навантаження на довкілля.

У даній випускній кваліфікаційній роботі бакалавра виконано комплексний проект системи електропостачання ремонтно-механічного підприємства. Окрему увагу приділено розробці, техніко-економічному обґрунтуванню та впровадженню практичних заходів з енергозбереження та підвищення енергоефективності в силовому електроприводі технологічного устаткування підприємства.

Характеристика об'єкта проектування та технологічного процесу

Ремонтно-механічний підприємство є типовим представником ремонтних та машинобудівних підприємств середньої потужності. Пріоритетним вектором виробничої діяльності підприємства є проектування та серійне виготовлення вантажних автомобільних причепів. Сучасний асортимент продукції налічує близько 30 модифікацій спеціалізованих автопричепів, адаптованих для транспортування різноманітних категорій вантажів усіма типами автомобільних доріг загального користування. Технічні характеристики виробів дозволяють використовувати їх у зчипці з основними тягачами малого й середнього класів, а також із комерційним малотоннажним транспортом (мікроавтобусами).

Технологічна структура підприємства включає ряд основних та допоміжних цехів, де відбуваються процеси механічної обробки, зварювання, пресування, фарбування та кінцевого збирання. Сучасна модернізація машинобудівного виробництва передбачає постійне впровадження високопродуктивного обладнання та прогресивних методів обробки металів. На сьогодні середня встановлена потужність електроприводів металообробних верстатів на підприємстві коливається в діапазоні від 0,5 до 10 кВт.

Значна частина верстатного парку оснащена сучасними регульованими електроприводами (зокрема, тиристорними перетворювачами частоти та напівпровідниковими системами керування), що забезпечує гнучкість технологічного процесу, але водночас висуває підвищені вимоги до якості електроенергії через генерацію вищих гармонік струму. Основним видом споживаного енергоресурсу є трифазний змінний струм промислової частоти 50 Гц із номінальною лінійною напругою 380 В (внутрішньоцехові мережі 0,4 кВ).

Схема зовнішнього електропостачання ремонтно-механічного заводу передбачає отримання електричної енергії від центрального розподільного пункту (ЦРП) місцевої енергосистеми. Відстань від джерела живлення (живильної підстанції) до межі території заводу становить 1,5 км, що зумовлює доцільність спорудження кабельних або повітряних ліній напругою 6 або 10 кВ для зв'язку ЦРП із проектованою головною знижувальною підстанцією (ГЗП) підприємства.

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Розрахунок типових електричних навантажень в електричних мережах до 1000В

Для визначення параметрів елементів системи внутрішнього цехового електропостачання виконано розрахунок очікуваних електричних навантажень пресового цеху. Розрахунок проведено методом упорядкованих діаграм (методом коефіцієнта максимуму), який є основним нормативним методом у вітчизняній інженерній практиці.

Як приклад, нижче наведено детальний алгоритм розрахунку для технологічної групи насосних агрегатів цеху, а також підсумкове сумування навантажень по всьому підрозділу.

Розрахунок середніх навантажень окремої технологічної групи (насоси)

Визначення середнього активного P_{cp} та реактивного Q_{cp} навантажень групи споживачів з однорідним режимом роботи за зміну з найбільшим споживанням енергії здійснюється на основі їхньої сумарної встановленої потужності $P_{\text{сум}}$ та коефіцієнта використання $\kappa_{\text{вик}}$:

$$P_{cp} = P_{\text{сум}} \cdot \kappa_{\text{вик}} = 44 \cdot 0,7 = 31 \text{ кВт}$$

Реактивна потужність групи визначається через тангенс коефіцієнта потужності $\text{tg}\varphi$), що відповідає середньому значенню для даного типу обладнання:

$$Q_{cp} = P_{ch} \cdot \text{tg}\varphi = 31 \cdot 0.75 = 23,25 \text{ кВар}$$

Сумарне активне ($P_{\text{см}}$) та реактивне ($Q_{\text{см}}$) навантаження всіх технологічних груп пресового цеху за зміну максимального завантаження знаходиться шляхом прямого додавання середніх потужностей кожної групи, кВт:

$$P_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ср.і}} = 480 + 51 + 40 + 1 + 158 + 77 + 21 + 20 + 22 + 38 + 31 = 937$$

Аналогічним чином для реактивної потужності отримано сумарне значення, кВат:

$$Q_{cm} = \sum_{i=1}^n Q_{cp.i} = 924$$

Ефективне число електроприймачів (n_e) – це таке число однорідних за режимом роботи споживачів однакової потужності, яке обумовлює той самий розрахунковий максимум навантаження, що й реальна група різних за потужністю споживачів. За розрахунком отримано:

$$n_e = 56$$

Для аналізу розподілу потужностей у вузлі розраховується коефіцієнт магістральності m (відношення номінальної потужності найбільшого електроприймача в групі до найменшого):

$$m = \frac{P_{ном.мах}}{P_{ном.мін}}$$

За вихідними даними цеху отримано критеріальне значення, що дозволяє використовувати спрощені або деталізовані табличні матриці. Для даного вузла навантаження коефіцієнт становить $K_m = 1,231$.

Розрахункове активне навантаження цеху (P_p) з урахуванням можливих пікових відхилень становить:

$$P_p = P_{cm} \cdot \kappa_m = 937 \cdot 1,231 = 1153,4 \text{ кВт}$$

Згідно з методикою, розрахунковий максимум реактивної потужності приймається рівним її середньозмінному значенню:

$$Q_p = Q_{cm} = 924 \text{ кВар}$$

Повна розрахункова потужність пресового цеху (S_p), яка є базовою величиною для вибору потужності цехових трансформаторів та перерізу живильних шинопроводів, визначається за геометричною сумою активної та реактивної складових:

$$S_p = \sqrt{1153^2 + 924^2} = \sqrt{2183185} = 1477,6 \text{ кВА}$$

Повний обсяг розрахунків електричних навантажень для всіх силових споживачів та ділень пресового цеху з напругою до 1000 В зведено в підсумкову таблицю 1.1.

1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень

Визначення параметрів штучного освітлення цехів заводу базується на методі питомої потужності, що припадає на одиницю корисної площі виробничих приміщень. За цим показником та геометричними розмірами ділянок знаходиться сумарна встановлена потужність освітлювальних електроприймачів.

Очікуване розрахункове активне навантаження визначається з урахуванням втрат у пускорегулювальній апаратурі (ПРА). У разі використання газорозрядних джерел світла (люмінесцентних або дугових ртутних ламп ДРЛ) в інженерних розрахунках обов'язково враховується споживання реактивної потужності. Величина реактивної складової залежить від типу ламп та наявності компенсувальних пристроїв.

Підсумкові результати обчислень для всіх підрозділів ремонтно-механічного заводу представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 1.2 – Розрахунок електричних навантажень промислового освітлення

Найменування	$F, \text{м}^2$	$P_0, \text{Вт/м}^2$	$P_{\text{в}}, \text{кВт}$	κ_c	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{р}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{р}}, \text{кВар}$	$S_{\text{р}}, \text{кВА}$
Механообробний цех	255	14	3,57	0,8	1,73	2,86	4,94	5,71
Гальванічна ділянка	325	14	4,55	0,8	1,73	3,64	6,30	7,27
Ковальсько-заготовчий цех	25,2	12	0,30	0,9	1,73	0,27	0,47	0,54
Зварювально-монтажний цех	191,2	12	2,29	0,8	1,73	1,84	3,18	3,67
Адміністративно-побутовий корпус	129,6	18	2,33	0,95	1,73	2,22	3,83	4,43
Цех	96	12	1,15	0,9	1,73	1,04	1,79	2,07
Ділянка допоміжного вир-ва	72	12	0,86	0,9	1,73	0,78	1,35	1,55
Виставковий зал	31,2	16	0,50	0,8	1,73	0,40	0,69	0,80
Склади	174	6	1,04	0,85	0,48	0,89	0,43	0,98
Цех №3	72	10	0,72	0,8	1,73	0,58	1,00	1,15
Склад готової продукції	58,8	6	0,35	0,8	1,73	0,28	0,49	0,56
Допоміжний цех	54	10	0,54	0,85	1,73	0,46	0,79	0,92
Деревообробний цех	46	14	0,64	0,85	1,73	0,55	0,95	1,09
Фарбувальний цех	74,4	12	0,89	0,9	1,73	0,80	1,39	1,61
Насосна	21,6	8	0,17	0,9	1,73	0,16	0,27	0,31
Транспортна ділянка	135	8	1,08	0,8	1,73	0,86	1,49	1,73
Склад готової продукції		10	1,36	2,8	1,73	3,81	6,59	7,61
Фірмовий магазин	22	14	0,31	3,8	1,73	1,17	2,02	2,34
Територія заводу	8901	0,2	1,78	0,5	1,73	0,48	0,83	0,96
Всього						23,1	38,80	45,1

Таблиця 1.1 – Розрахунок силових електрона вантажень в мережах до 1 кВ

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість ел. споживачів	Встановлена потужність, кВт		m	K _в	cosφ	tgφ	Середнє навантаження за зміну		n _{еф}	K _м	Розрахункова потужність		
			Одного	Сумарна					P _{ср}	Q _{ср}			P _p	Q _p	S _p
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Механообробний цех														
1	Металорізальні верстати	21	1,2 - 7	121,6	6	0,2	1	0,34	24,58	42,52					
2	Ковальсько-пресове устаткування	10	14,0 - 21	70	2	0,6	0,8	42,42	31,82	31,54					
3	Компресорні установки	2	1,5 - 20	37	13	0,7	0,7	26,16	26,68	30,27					
4	Шліфувальні верстати	4	5,0 - 25	80	5	0,2	0,5	16,16	27,96	20,72					
5	Термічні нагрівальні печі	6	5,0 - 20	90	4	0,7	0,9	63,63	21	30,52					
6	Насосні агрегати	9	5,0 - 25	180	5	0,7	0,8	0,74	127,26	95,45					
7	Вентиляційні установки	10	0,5 - 10	95	20	0,7	0,8	0,74	67,17	50,38					
	Всього по механообробному цеху	62	0,5 - 25	673,6	50	0,5	0,8	367,38	295,81	265,46	54	1,1	405,92	265,48	485,06
	Гальванічна дільниця														
8	Катодні ванни	3	5,0 - 30	75	6	0,5	1	0,22	37,88	7,61					
9	Електролізні установки	4	2,0 - 12	40	6	0,5	1	20,2	20,02	4,06					
10	Ванни гальванічного покриття	2	5,0 - 40	70	8	0,5	1	35,35	35,06	8,77					
11	Мостовий кран ПВ%=50	4	10,0 - 10	28,00	1	0,3	0,6	7,14	7,07	9,43					
12	Гідравлічні насоси	6	5,5 - 15	57,5	3	0,7	0,8	40,66	37,05	27,79					
13	Витяжна вентиляційна система	6	5,5 - 16	63,5	3	0,7	0,8	0,75	44,9	30,71					
	Всього по дільниці	25	0,5 - 10	333,5	20	0,7	0,8	186,13	137	88	25	1,1	152,2	88,38	175,99
	Ковальсько-заготовчий цех														
14	Системи примусової вентиляції	8	0,8 - 10	73,2	13	0,7	0,8	0,75	51,75	38,81					
15	Конвеєрні лінії	4	3,0 - 10	29	3	0,5	0,7	14,65	14,94	16,37					
16	Ковальсько-пресові машини	21	6,0 - 20	296	3	0,4	0,7	119,58	121,97	137,49					
17	Штампувальні преси	8	10,0 - 40	244	4	0,3	0,7	73,93	75,41	84,18					
	Всього по Ковальсько-заготовчий цех	41	0,8 - 40	635,8	50	0,4	0,7	259,91	251,13	273,91	32	1,2	312,6	273,91	415,61
	Зварювально-монтажний цех														
18	Автоматизована потокова лінія	3	50,0 - 100	150	2	0,7	0,6	1,333	106,05	141,36					
19	Багатоцільові верстати з ЧПК	22	7,0 - 21	308	3	0,3	0,5	93,32	161,63	133,37					

Продовження таблиці 1.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
20	Металорізальні верстати	25	1,2 - 7	145	6	0,2	0,9	0,484	29,29	14,18					
21	Зварювальні апарати	20	10,0 - 20	200	2	0,4	0,5	1,732	80,8	139,95					
22	Агрегати стиснутого повітря	14	1,5 - 20	259	13	0,7	0,8	0,75	183,11	137,33					
23	Системи цехової припливно-втяжної вентиляції	12	0,8 - 10	110,4	13	0,7	0,8	0,75	78,05	58,54					
	Всього по зварювально-монтажний цех	96	0,8 - 100	1172,4	125	0,4	0,7	570,62	652,99	591,55	23	1,3	662,7	591,75	888,39
	Адміністративно-побутовий корпус														
24	Комплекс інформаційно-обчислювальної та оргтехніки	16	0,5 - 2	24	4	0,1	0,4	2,291	2,42	5,55					
25	Побутове електрообладнання	21	0,1 - 2	39,9	20	0,2	0,5	8,06	13,96	13,82					
26	Системи кондиціювання повітря	16	1,5 - 3	16	2	0,7	0,8	0,75	11,31	8,48					
27	Насоси систем водопостачання та опалення	2	1,1 - 2	1,8	2	0,7	0,8	1,27	1,12	1,03					
28	Вентиляційні установки АПК	4	0,5 - 3	10	6	0,6	0,8	0,75	6,06	4,55					
	Всього по АПК	59	0,1 - 3	91,7	30	0,3	0,6	29,12	33,66	33,75	59	1,2	34,94	33,66	48,51
	цех														
29	Деревообробні верстати	20	1,2 - 35	676	29	0,1	0,5	1,985	68,28	135,53					
30	Пресове устаткування	5	10,0 - 14	20	1	0,4	0,7	8,08	9,45	8,18					
31	Плоскошліфувальні верстати	4	5,0 - 15	40	3	0,2	0,5	8,08	13,99	13,86					
32	Термічні сушильні камери	8	2,0 - 6	32	3	0,7	1	22,62	7,44	7,36					
33	Системи аспірації та вентиляції	10	0,5 - 10	95	20	0,6	0,8	0,882	57,57	50,77					
	Всього по цеху	47	0,5 - 35	863	70	0,2	0,6	164,63	217,18	240,66	47	1,3	233,1	240,66	335,05
	Дільниця допоміжного виробництва														
34	Однопостові зварювальні трансформатори	8	12,0 - 20	64	2	0,4	0,5	1,732	25,86	44,78					
35	Печі для сушіння	6	4,5 - 15	63	3	0,7	1	0,329	44,54	14,66					
36	Вентиляційні установки допоміжного цеху	4	0,5 - 3	10	6	0,6	0,8	0,75	6,06	4,55					
	Всього по цеху	18	0,5 - 20	137	40	0,5	0,8	0,797	76,46	63,99	14	1,3	92,9	57,79	109,42
	Деревообробний цех														
37	Електропечі сушильні	2	4,5 - 20	31	4	0,7	1	0,329	21,92	7,21					

Продовження таблиці 1.1.

38	Поздовжньо-стругальні верстати	4	1,2	-	10	35,2	8	0,1	0,5	1,985	3,56	7,06					
39	Токарні верстати	4	5,0	-	15	40	3	0,5	0,7	20,2	23,61	23,38					
40	Шліфувальне верстатне устаткування	6	6,0	-	12	36	2	0,7	0,8	25,45	19,09	18,90					
41	Шліфувальне верстатне устаткування	4	5,5	-	10	18	2	0,7	0,8	12,73	9,55	8,78					
42	Системи витяжної вентиляції та аспірації	6	2,0	-	10	48	5	0,6	0,8	0,75	29,09	21,82					
	Всього по деревообробному цеху	26	1,2	-	20	208,2	17	0,5	0,8	112,95	88,34	88,17	21	1,2	136,0	88,17	162,06
43	Насосна установка оборотного водопостачання	49	0,5	-	15	230,0	30	0,6	0,7	1,02	139,38	142,17	31	1,2	147,8	129,06	196,19
	Фарбувальний цех																
44	Насосні агрегати подачі фарби	10	0,5	-	5	45	10	0,6	0,8	0,75	27,27	20,45					
45	Компресорні установки фарбувального обладнання	4	0,5	-	2	4	3	0,7	0,8	0,75	2,83	2,12					
46	Електрифіковані фарбопульти	6	0,5	-	2	9	4	0,4	0,6	3,64	4,84	4,80					
47	Припливно-витяжна вентиляція з фільтрацією повітря	3	0,5	-	5	13,5	10	0,6	0,8	0,75	8,18	6,14					
	Всього по фарбувальному цеху	23	0,5	-	5	71,5	10	0,7	0,8	0,75	41,92	33,55	23	1,1	67,4	47,25	82,31
	Транспортна дільниця	10	0,1	-	4	39	40	0,6	0,7	1,02	23,63	24,11					
49	Системи вентиляції	3	3,0	-	5	8	2	0,6	0,8	0,75	4,80						
50	Кран-балка з ПВ% = 25	2	0,5	-	9	9,0	18	0,5	0,7	1,169	4,55	5,31					
51	Гаражні компресорні установки	4	0,5	-	2	4	3	0,7	0,8	0,75	2,60	2,83					
52	Металорізальні верстати ремонтного профілю	2	2,5	-	14	23	6	0,2	1	0,329	4,60	4,65					
	Всього по транспортній дільниці	21	2,0	-	24	83	12	0,7	0,8	0,75	40,51	35,18	7	1,2	49,6	39,82	63,64
	Цех №2																
53	Верстати для обробки деревини	10	1,2	-	35	338	29	0,1	0,5	1,985	34,14	67,77					
54	Пресові установки	5	10,0	-	14	20	1	0,4	0,7	8,08	9,45	8,18					
55	Плоскошліфувальні верстати	4	5,0	-	15	40	3	0,2	0,5	8,08	13,99	13,86					
56	Автомат.суш. камери	8	2,0	-	6	32	3	0,7	1	22,62	7,44	7,36					
57	Вентилятори аспіраційних систем	10	0,5	-	10	95	20	0,6	0,8	0,882	57,57	50,77					
	Всього по цеху 2	37	0,5	-	35	525	70	0,3	0,6	130,49	149,42	160,16	30	1,4	183,5	160,16	243,57

Продовження таблиці 1.1.

	Цех 3																
58	Промислові електропечі сушильні		2	4,5 - 10	11	2	0,7	1	0,329	7,78	0						
59	Поздовжньо-стругальні верстати		4	1,2 - 7	23,2	6	0,1	0,5	1,985	2,34	4,65						
60	Токарно-гвинторізні верстати		4	5,0 - 7	8	1	0,5	0,7	4,04	4,72	4,68						
61	Системи витяжної вентиляції		6	2,0 - 10	48	5	0,6	0,8	0,75	29,09	21,82						
	Всього по цеху 3		16	1,2 - 10	90,2	8	0,5	0,8	43,25	31,19	34,33	16	1,3	56,1	34,33	65,74	
	Склад готової продукції																
62	Вентиляційне обладнання складу		3	3,0 - 10	13	3	0,7	0,8	0,75	9,19	6,89						
63	Кран-балка з ПВ%= 25	25	2	2,0 - 10	10,0	5	0,4	0,7	4,04	4,72	4,68						
	Всього по складу гот.прод		5	2,0 - 10	23	5	0,7	0,8	13,23	11,61	11,50	5	1,3	17,1	12,65	21,27	
	Фірмовий магазин		15	0,1 - 3	3,1	30	0,6	0,7	1,018	1,88	1,92	2	2,1	3,95	1,92	4,39	
	Механо-складальний цех																
64	Металорізальні верстати механообробки		21	1,2 - 7	121,8	6	0,2	1	0,329	24,6	8,03						
65	Ковальсько-пресові агрегати		10	14,0 - 21	70	2	0,6	0,8	42,42	31,82	31,50						
66	Верстати шліфувальної групи		4	5,0 - 25	80	5	0,2	0,5	16,16	27,96	20,78						
67	Насосні установки гідросистем		9	5,0 - 25	180	5	0,7	0,8	0,75	127,26	95,45						
68	Загальноцехова припливно-витяжна вентиляція		10	0,5 - 10	95	20	0,7	0,8	0,75	67,17	50,38						
	Всього по механо-складальний цех		54	0,5 - 25	546,8	50	0,5	0,8	277,61	205,61	204,67	44	1,2	313,9	204,67	374,77	
69	Склади матеріалів																
70	Системи вентиляції		3	3,0 - 10	13	3	0,7	0,8	0,75	9,19	6,89						
71	Кран-балка з ПВ%=25		2	2,0 - 10	10,0	5	0,4	0,7	1,169	4,04	4,72						
	Всього по складу матеріалів		5	2,0 - 10	23	5	0,7	0,8	13,23	11,61	11,50	5	1,3	17,1	12,65	21,27	
	Всього сторони 0,4 кВ		599	0,1 - 100	5710,6	1000	0,7	0,7	0,962	2426,52	2334,13	114	1,02	2475,05	2334,13	3402,02	

1.3 Розрахунок електричних навантажень у силових мережах напругою понад 1000 В

Основними розрахунковими вузлами під час аналізу параметрів високовольтних мереж підприємства є секції шин 10 кВ трансформаторних підстанцій (ТП). Тому передумовою для виконання цього етапу проектування є обґрунтування кількості, номінальної потужності та просторового розміщення цехових ТП на генплані заводу.

Для оптимізації топології цехових підстанцій розробляється картограма електричних навантажень. На її основі визначається доцільність спорудження окремих ТП для кожного підрозділу. Якщо будівництво індивідуального енергооб'єкта для конкретного цеху є економічно невиправданим, його живлення організують на напрузі 0,4 кВ від підстанції сусіднього цеху.

Аналогічний методичний підхід застосовується і для оцінки електричних навантажень ремонтно-механічного заводу в цілому. Важливою умовою розрахунку є врахування знаків реактивної потужності: якщо до складу вузла входять засоби компенсації (конденсаторні батареї) або синхронні двигуни, які працюють у режимі генерації реактивного струму, їхня потужність вводиться в загальний баланс із від'ємним знаком, що зменшує загальне навантаження системи.

У межах даного проекту технічні втрати розраховані для груп трансформаторів типу ТМ-630/10/0,4 на основі їхніх каталожних характеристик (номінальної напруги, потужності 630 кВ·А, струму холостого ходу, напруги короткого замикання та відповідних рівнів втрат у сталі та обмотках).

Повний комплекс обчислень для силових мереж високої напруги систематизовано й наведено в підсумковій таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Розрахунок силових електричних навантажень в мережі 10 кВ

Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість	Встановлена потужність, кВт				m	Ки	cosφ	tgφ	Середнє навантаження за зміну		pe	Км	Розрахункова потужність		
	ел. спо-живачів															
	Одного	Σ	Pcp	Qcp	Pp	Qp	Sp									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
ТП№1																
Ковальсько-заготовчий цех																

продовження таблиці 1.3.

2		3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<u>Фірмовий магазин</u>																	
силова		15,0	0,1	-	3,0	3,1	30	0,6	0,7	1,018	1,88	1,92	2	2,1	3,95	1,92	4,39
освітлювальна															1,2	2,0	2,3
<u>Виставковий зал</u>																	
силова																	
освітлювальна															0,4	0,7	0,8
<u>Цех №2</u>																	
силова		37,0	0,5	-	35,0	525,0	70	0,3	0,6	130,49	149,42	160,16	30	1,4	183,5	160,16	243,57
освітлювальна															0,6	1,0	1,2
Всього по ТП№4																	
силова		99,0	0,1	-	35	1391,1	350	0,2	0,6	1,3	312,2	402,6	79,0	1,2	383,9	402,6	556,3
освітлювальна															3,2	5,5	
Всього															387,1	408,1	562,4
БСК																	
З урахуванням БСК															387,1	408,1	
Втрати в трансформаторі S _{тр} = 630		1,0													4,2	33,9	
Всього на шинях 10 кВ ТП№4															391,3	442,0	590,3
ТП№5																	
<u>Механо-складальний цех</u>																	
силова		54,0	0,5	-	25,0	546,8	50	0,5	0,8	277,61	205,61	204,67	44	1,2	313,9	204,67	374,77
освітлювальна															3,8	6,6	7,6
<u>Склади</u>																	
силова		5,0	2,0	-	10,0	23,0	5	0,7	0,8	13,23	11,61	11,50	5	1,3	17,1	12,65	21,27
освітлювальна															0,9	0,4	1,0
<u>Цех №3</u>																	
силова		16,0	1,2	-	10,0	90,2	8	0,5	0,8	43,25	31,19	34,33	16	1,3	56,1	34,33	65,74
освітлювальна															0,6	1,0	1,2
<u>Склад готової продукції</u>																	
силова		5,0	2,0	-	10,0	23,0	5	0,7	0,8	13,23	11,61	11,50	5	1,3	17,1	12,65	21,27
освітлювальна															0,3	0,5	0,6
Всього по ТП№5																	
силова		80,0	0,5	-	25	683,0	50	0,5	0,8	0,8	340,3	262,0	55,0	1,1	387,8	262,0	468,0
освітлювальна															5,6	8,5	
Всього															393,3	270,5	477,4

продовження таблиці 1.3.

1		2	3			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
БСК																	
З урахуванням БСК															393,3	270,5	
Втрати в трансформаторі $S_{\text{тр}} =$	630	1,0													4,3	34,2	
Всього на шинах 10 кВ	ТПП№5														397,6	304,7	500,9
Всього по заводу																	
силова		599	0,10	-	100,0	5711	1000	1	1	1	2366	2276	114	1,05	2482	2276	3367
освітлювальна															23,1	38,8	45,1
Всього															2504,5	2314,9	3367,5
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																	
Всього з врахуванням КП-0,4															2504,5	2314,9	3367,5
Втрати в трансформаторах															30,8	242,5	
Всього по заводу															2535,3	2557,4	3601,1
Компенсуючі пристрої 10 кВ																	
Всього на шинах 10 кВ															2535,3	2557,4	3601,1

1.4 Побудова графіків електричних навантажень підприємства

Вихідними даними для комп'ютерного моделювання є сумарні розрахункові потужності підприємства на межі балансової належності (сторона 0,4 кВ), а саме: розрахункова активна потужність $P = 2535,30$ кВт; розрахункова реактивна потужність $Q = 2557,40$ кВар; повна розрахункова потужність $S = 3601,12$ кВА. Під час моделювання річний цикл роботи ремонтно-механічного підприємства (365 днів) розподілено на зимовий та літній періоди з урахуванням структури робочих і вихідних днів: робочі дні: взимку – 147 днів, влітку – 105 днів; вихідні та святкові дні: взимку – 65 днів, влітку – 48 днів.

За результатами програмного розрахунку визначено диференційовані та загальні інтегральні показники електроспоживання ремонтно-механічного підприємства, які зведено в таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Річні показники споживання електричної енергії та параметри графіка навантажень

Період року та режим роботи	Активна енергія W, кВт·год	Реактивна енергія V, кВар·год
Зимові робочі дні	3682168	4473660
Літні робочі дні	2335602	2716151
Зимові вихідні дні	459777	854427
Літні вихідні дні	288598	536317
Суммарне річне споживання	6666145,42	8580555,23

На основі інтегральних витрат енергії та максимальних навантажень програмою розраховано ключові часові параметри річного графіка: час використання максимального навантаження (T_m) становить 3017,5 год. Цей показник характеризує тривалість роботи підприємства, протягом якої воно спожило б повний обсяг річної активної енергії за умови безперервної роботи на максимальній розрахунковій потужності.

Час максимальних витрат (τ_m): становить 1587,6 год. Дана величина використовується для подальшого розрахунку річних технологічних витрат електричної енергії в лініях живлення та силових трансформаторах підприємства.

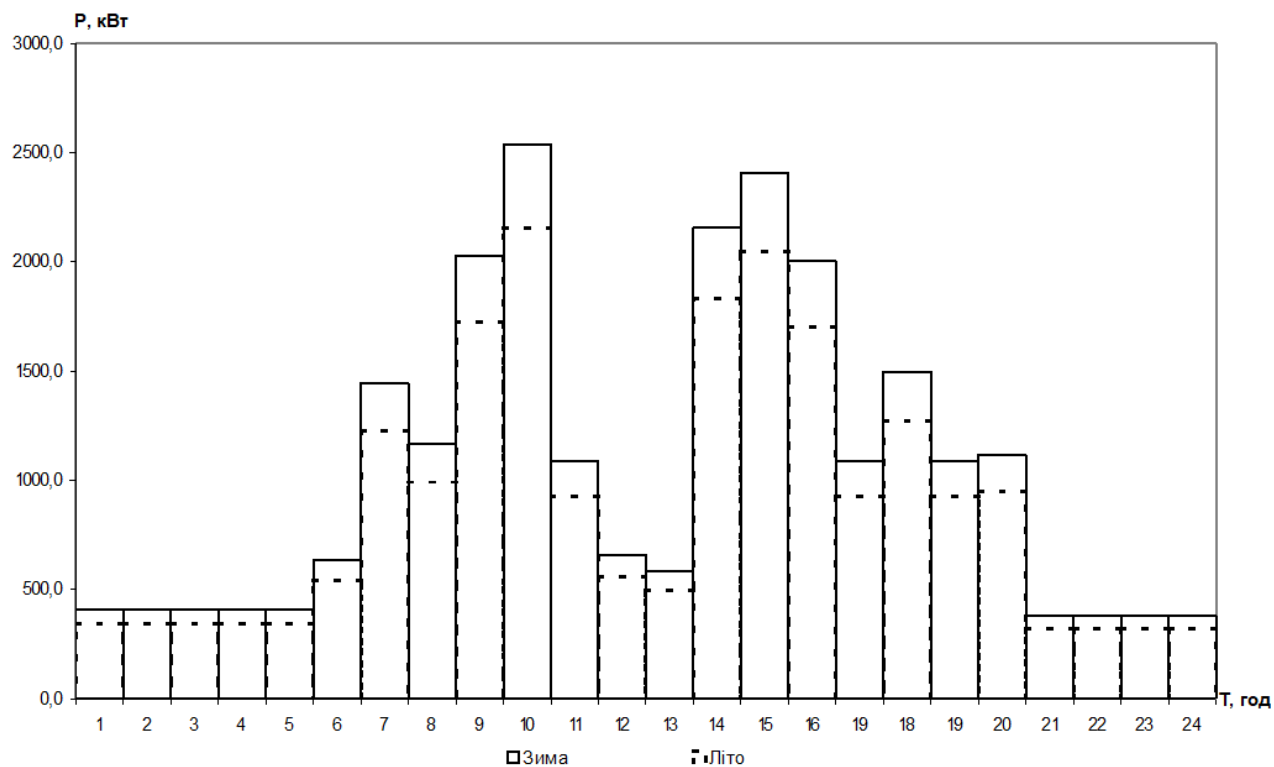
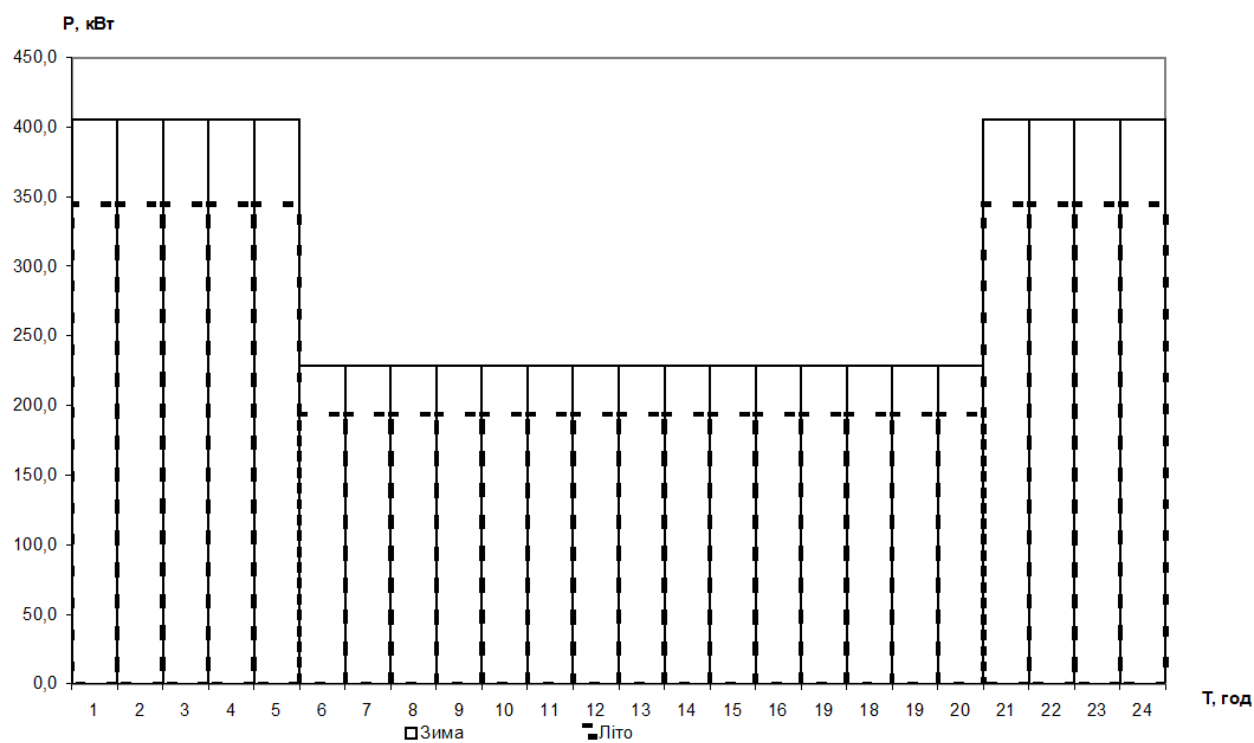


Рис 1.1 – Графік споживання активної потужності в робочий день



1.2 – Графік споживання активної потужності у вихідний день

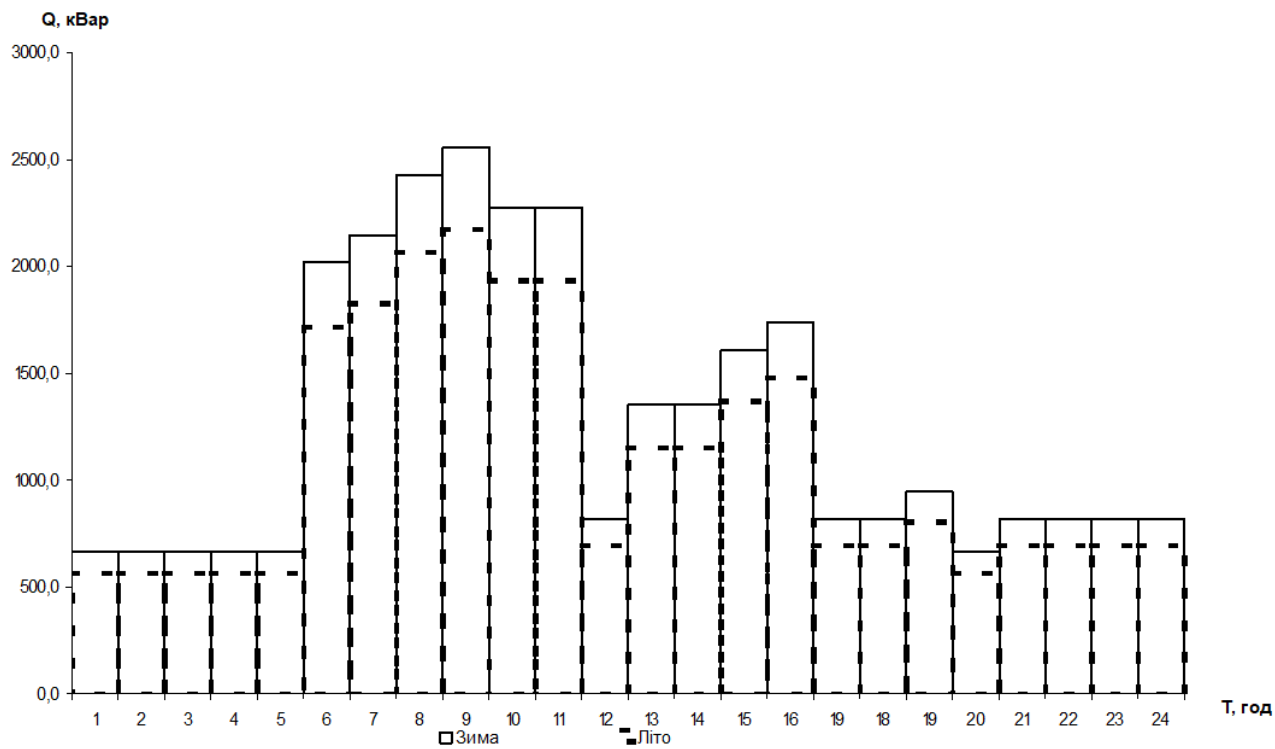


Рис 1.3 – Графік споживання реактивної потужності в робочий день

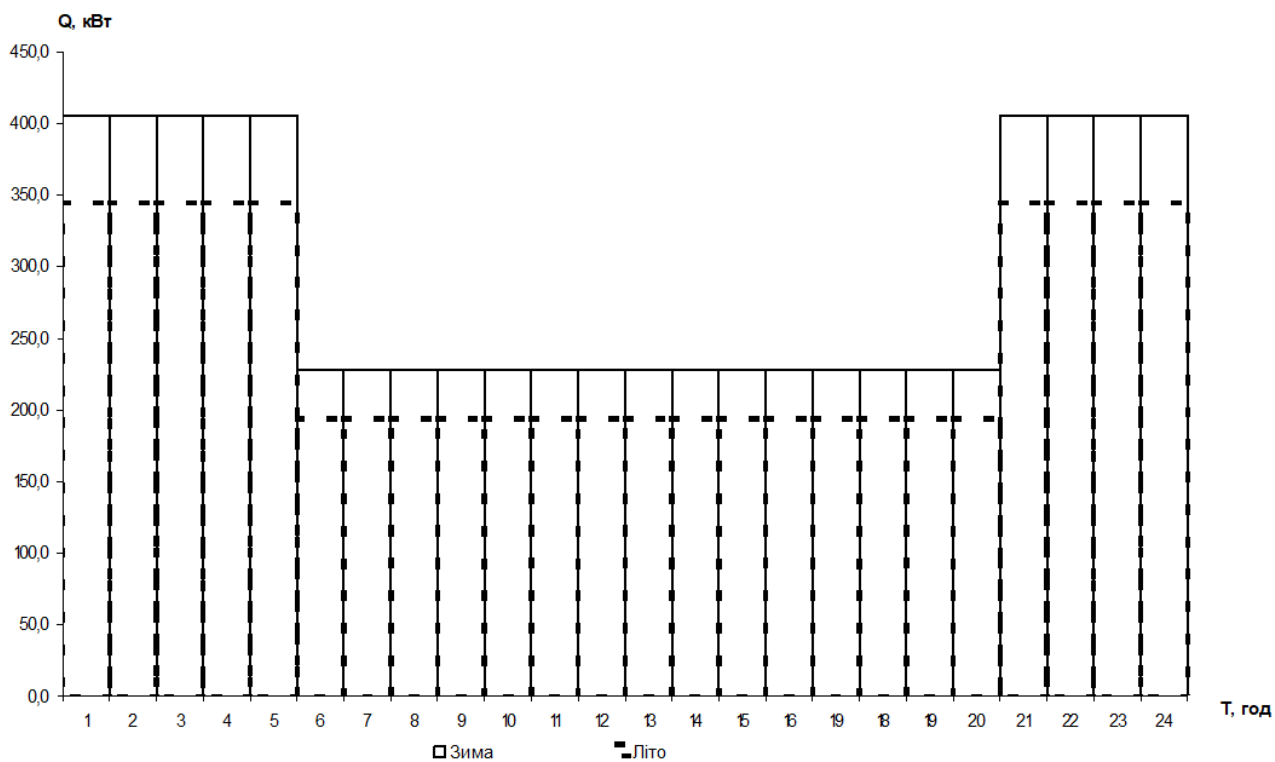


Рис 1.4 – Графік споживання реактивної потужності в вихідний день

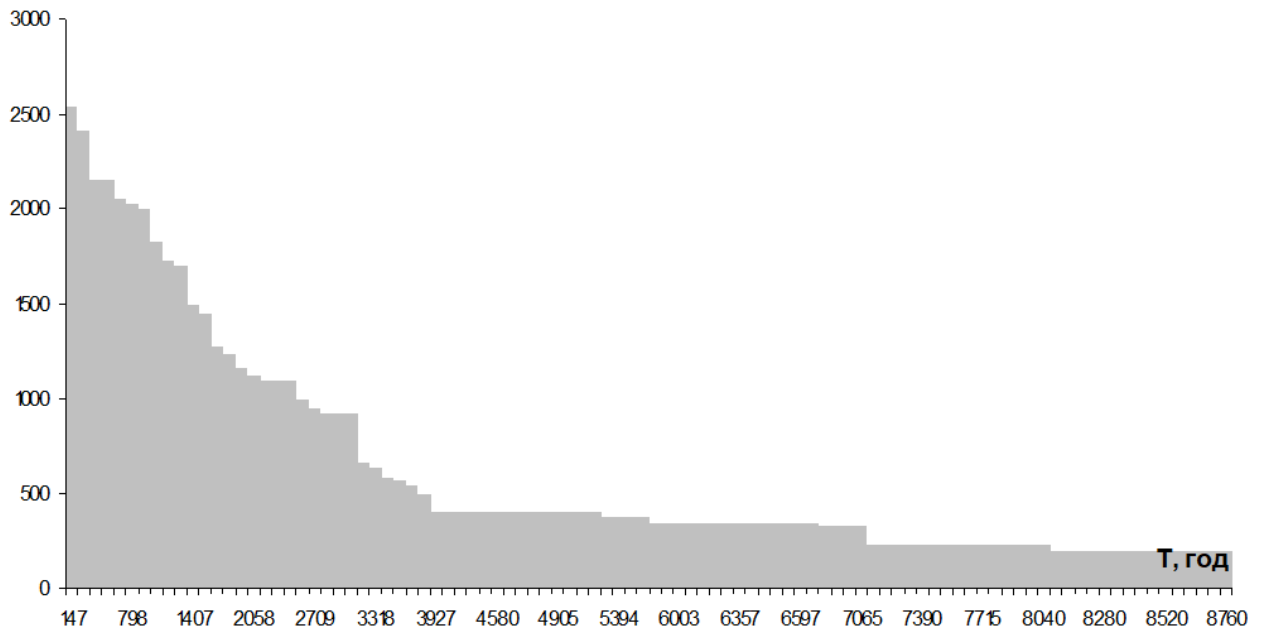


Рис 1.5 – Річний графік

Розраховані інтегральні параметри та коефіцієнти форми графіків є базою для оптимізації режимів електроспоживання та вибору засобів компенсації реактивної потужності.

На основі проведених інженерних обчислень та комп'ютерного моделювання сформовано такі ключові висновки.

За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення здійснено комп'ютерне моделювання добових та річних графіків навантажень. Визначено, що сумарне річне споживання активної електроенергії заводом становить 6666145,42 кВт год, а реактивної – 8580555,23 квар год.

Розраховані часові параметри річного графіка (час використання максимуму навантаження $T_m = 3017,3$ год та час максимальних втрат $\tau_m = 1587,7$ год) вказують на нерівномірний характер електроспоживання з вираженими сезонними (зима/літо) та добовими коливаннями. Це підтверджує необхідність розробки інженерних заходів із компенсації реактивної потужності та впровадження енергоощадних технологій у силовому електроприводі, що буде виконано у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ РЕМОНТНО-МЕХАНІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Оптимальне просторове розміщення головного розподільного пункту (ГРП) та цехових трансформаторних підстанцій на території заводу визначається за допомогою картограми електричних навантажень, яку наносять безпосередньо на генеральний план підприємства.

Картограма візуалізує розподіл споживання енергії у вигляді кіл, центри яких суміщають із центрами мас геометричних контурів цехів. Площа кожного кола в обраному масштабі (кВт м^2) відповідає розрахунковій потужності відповідного підрозділу. На основі геометричного співвідношення площі та радіуса обчислюються індивідуальні радіуси кіл для кожного об'єкта. Наприклад, для механообробного цеху розрахунковий радіус геометричного відображення склав 80,56 мм. Для наочності на колі також виділяють окремий сектор із центральним кутом α , який відображає частку освітлювального навантаження в загальному енергобалансі цеху. Для точного аналітичного визначення просторових координат центра електричних навантажень (ЦЕН) заводу використано класичний метод інженерної механіки, заснований на знаходженні центра тяжіння системи матеріальних точок. У межах цієї методики споживана потужність кожного цеху умовно прирівнюється до його зосередженої маси.

Шляхом розрахунку статичних моментів потужностей відносно осей координат знайдено узагальнені координати геометричного центра споживання заводу, які склали: за віссю абсцис: $X = 203,5$ м; за віссю ординат: $Y = 275,8$ м.

Отримані координати визначають теоретичну точку генерального плану з мінімальними втратами напруги та потужності, поблизу якої доцільно споруджувати центральний розподільний пристрій високої напруги. Результати геометричних та координатних обчислень для всіх структурних підрозділів ремонтно-механічного заводу систематизовано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані для побудови картограми електричних навантажень та розрахунку умовного центру електричних навантажень

по плану	Найменування	$P_{р\text{сил}},$ кВт	$P_{р\text{осв}},$ кВт	$P_r,$ кВт	m	$R, \text{мм}$	α	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$	$P^*x,$ кВт м	$P^*y,$ кВт м
1	Механообробний цех	405,92	1,84	407,78	0,02	80,56	1,62	276,0	340,0	112547,93	138646,00
2	Гальванічна дільниця	152,2	0,27	152,46	0,02	49,26	0,64	278,0	330,0	42385,15	50313,31
3	Ковальсько-заготовчий цех	312,6	3,64	316,21	0,02	70,94	4,14	134,0	156,0	42371,96	49328,55
4	Зварювально-монтажний цех	662,67	2,86	665,53	0,02	102,92	1,54	210,0	310,0	139760,69	206313,39
5	Адміністративно-побутовий корпус	34,49	2,22	36,70	0,02	24,17	21,74	360,0	340,0	13212,88	12478,84
6	Цех	233,1	1,04	234,16	0,02	61,05	1,59	380,0	280,0	88980,39	65564,50
7	Дільниця допоміжного виробництва	92,93	0,46	93,37	0,02	38,55	1,77	22,0	188,0	2054,22	17554,24
8	Деревообробний цех	135,98	0,55	136,52	0,02	46,61	1,44	42,0	190,0	5733,91	25939,11
9	Насосна установка оборотного водопостачання	147,74	0,16	147,93	0,02	48,52	0,38	92,0	276,0	13609,38	40828,13
10	Фарбувальний цех	67,42	0,67	68,07	0,02	32,91	3,54	100,0	270,0	6806,72	18378,15
11	Транспортна дільниця	49,67	0,65	50,30	0,02	28,29	4,64	32,0	308,0	1609,47	15491,16
13	Склад готової продукції	17,15	0,89	17,99	0,02	16,92	17,81	246,0	56,0	4425,55	1007,44
14	Виставковий зал		0,40	0,40	0,02	2,52	360,00	392,0	140,0	156,80	56,00
	Всього по заводу	2475,05	15,63							473655,05	641898,82

$$X_0 = 203,51 \text{ м}$$

$$Y_0 = 275,80 \text{ м}$$

РОЗДІЛ 3
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ
ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ПІДПРИЄМСТВА

3.1 Обґрунтування схеми зовнішнього електропостачання

Відповідно до виданих технічних умов та географічного розташування об'єкта, єдиним технічно можливим та доцільним варіантом організації зовнішнього живлення ремонтно-механічного заводу є підключення до центрального розподільного пункту (ЦРП) місцевої енергосистеми на напрузі 10 кВ. У зв'язку з відсутністю альтернативних зовнішніх джерел або інших рівнів напруги (наприклад, 35 чи 110 кВ), багатоваріантний техніко-економічний розрахунок зовнішніх мереж не проводиться. Натомість основну увагу приділено порівняльному аналізу внутрішньозаводських схем розподілу енергії.

Згідно з чинними нормативно-технічними вимогами, спорудження самостійного розподільного пункту (РП) на території підприємства є обов'язковим у разі безпосереднього живлення потужних високовольтних сукупних споживачів, а також за умови, що кількість ліній приєднання перевищує п'ять, а видалення об'єкта від живильної підстанції становить понад 1 км.

Для проектного ремонтно-механічного підприємства виконуються такі граничні умови: загальна кількість цехових трансформаторних агрегатів, які потребують підключення до високовольтної мережі, становить 7 одиниць; просторове видалення території заводу від ЦРП енергосистеми складає 1500 метрів.

З огляду на зазначені фактори, для реалізації схеми зовнішнього електропостачання прийнято рішення про прокладання живильних ліній напругою 10 кВ із будівництвом центрального розподільного пункту (ЦРП) безпосередньо на території підприємства. Цей опорний вузол високої напруги забезпечить надійний розподіл потужності між усіма цеховими підстанціями і прийнятий за основу для подальшого проектування внутрішньозаводської електричної мережі.

3.2 Обґрунтування рівнів напруги та топології внутрішньозаводських електричних мереж

Для побудови раціональної системи внутрішнього розподілу електричної енергії ремонтно-механічного підприємства прийнято дворівневу структуру напруг. На першому ступені (для міжцехових живильних мереж від ЦРП підприємства до цехових трансформаторних підстанцій) використовується напруга 10 кВ. На другому ступені (безпосередньо у внутрішньоцехових розподільних мережах для живлення силових електроприймачів та систем промислового штучного освітлення) застосовується трифазна чотирипровідна система напругою 380/220 В із глухозаземленою нейтраллю.

Топологічна структура внутрішньозаводських мереж (радіальна, магістральна або комбінована) вибирається на основі комплексного аналізу просторового розташування цехів на генеральному плані, сукупної споживаної потужності, а також вимог до безперебійності живлення. Оскільки більшість споживачів заводу за ПУЕ належать до II категорії надійності, обов'язковою умовою побудови схем є секціонування шин на всіх рівнях трансформації та розподілу (від ЦРП до цехових розподільних пунктів) з організацією взаємного резервування.

Застосування багатоланцюгових магістральних схем (із двома чи більше паралельними лініями та секціонуванням шин ТП) дозволяє забезпечити необхідний рівень резервування для споживачів будь-якої категорії надійності, зокрема й першої. При цьому, згідно з технічними обмеженнями, до однієї високовольної магістралі 10 кВ допускається глухе або відгалужувальне приєднання від 3 до 5 цехових трансформаторів, якщо їхня одинична потужність перебуває в межах від 1000 до 2500 кВ·А.

У межах даного дипломного проекту виконано порівняльний техніко-економічний аналіз варіантів внутрішньогосподарського електропостачання заводу за радіальною та магістральною конфігураціями. З огляду на специфіку розподілу технологічного навантаження, базовими величинами для порівняльних розрахунків та перевірки ліній за умовами аварійного резервування прийнято

Як приклад інженерних обчислень наведено розрахунок параметрів радіальної кабельної лінії W_1 , що з'єднує шини РП-10 кВ із трансформаторною підстанцією ТПЗ. Аналогічні розрахунки для решти кабельних ліній внутрішньозаводської мережі виконано за ідентичним алгоритмом, а їхні результати систематизовано в табл. 3.1–3.7.

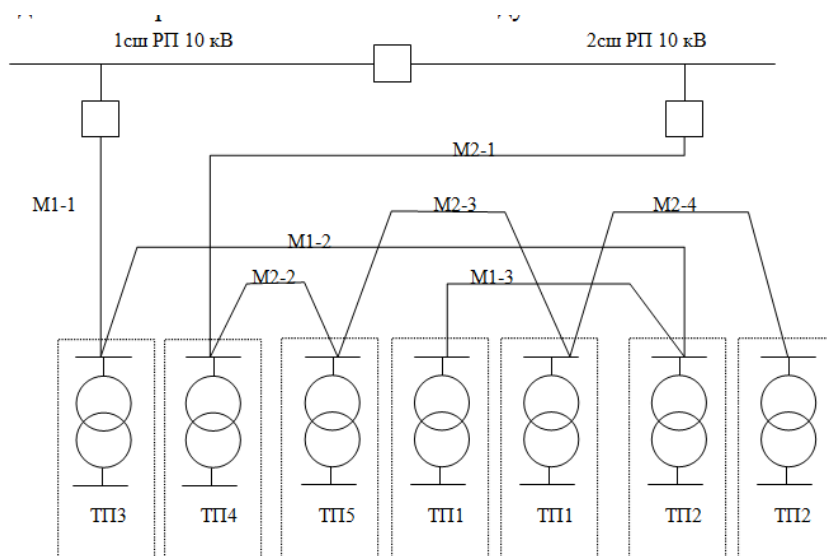


Рисунок 3.1 – Магістральна схема живлення ремонтно-механічного підприємства

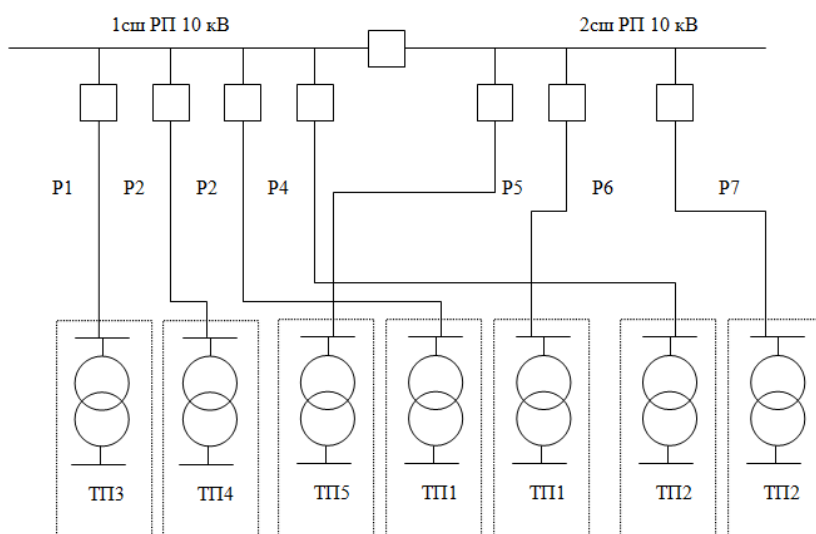


Рисунок 3.2 – Радіальна схема живлення ремонтно-механічного підприємства

Живлення трансформаторів ТПЗ здійснюється трифазною кабельною лінією безпосередньо від розподільного пункту підприємства. Номінальна напруга мережі становить $U_n = 10$ кВ. Геометрична віддаленість підстанції від РП дорівнює $l = 0,025$ км.

За відомою розрахунковою повною потужністю навантаження цеху ($S_p = 563,7$ кВА) обчислюємо тривалий розрахунковий струм лінії в нормальному режимі:

$$I_p = \frac{563,7}{1,732 \cdot 10} = 32,55 \text{ А}$$

Згідно з чинними нормативними вимогами, первинний вибір перерізу жил кабелю здійснюється за умовою, що розрахунковий струм лінії не повинен перевищувати тривало допустимий струм для базового перерізу, помножений на поправочні коефіцієнти:

$$I'_{\text{доп}} \geq I_p$$

Для прокладання в траншеї вибираємо трижильний кабель з алюмінієвими жилами та паперовою просоченою ізоляцією марки ААШв-10. Оскільки розрахунковий струм є відносно невеликим (32,55 А), за умовою механічної міцності та мінімально рекомендованого перерізу для мереж 10 кВ приймаємо найменший стандартний переріз: попередньо вибрано кабель: ААШв-10 (3х25) у кількості $n = 1$ лінія.

За нормативними довідниками, базовий допустимий струм для кабелю ААШв (3х25) при прокладанні в землі становить $I_{\text{доп}} = 90$ А.

Враховуючи, що в одній траншеї прокладається один кабель, поправочний коефіцієнт на кількість провідників у траншеї становить $K_p = 1,0$. Скоригований допустимий струм:

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \cdot \kappa_n = 90 \cdot 1 = 90 \text{ А}$$

Умова тривалого нагрівання виконується з великим запасом: $90 \text{ А} \geq 32,55 \text{ А}$. Коефіцієнт завантаження кабельної лінії в нормальному режимі експлуатації становить:

$$\kappa_3 = \frac{32,55}{1 \cdot 90} = 0,36$$

Перевірка пропускної здатності лінії в післяаварійному режимі (на випадок резервування) здійснюється з урахуванням допустимого короткочасного перевантаження кабелів із паперовою ізоляцією ($\kappa_{a.n} = 1,4$):

$$I'_{авар} = n \cdot I'_{дон} \cdot \kappa_{a.n} = 1 \cdot 90 \cdot 1,4 = 126 A$$

Оскільки $I'_{авар} = 126 A > I_p = 32,55 A$, лінія повністю забезпечує надійне постачання електроенергії в аварійних режимах. За каталожними даними, питомий активний опір кабелю ААШв (3х25) становить $R_0 = 1,25 \text{ Ом/км}$. Втрати активної потужності в трифазній лінії за фактичної довжини ($l = 0,025 \text{ км}$) становлять:

$$\Delta P_n = 3 \cdot 32,55^2 \cdot 1,25 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3} = 0,099 \text{ кВт}$$

Технологічні втрати електричної енергії за рік за час максимальних втрат ($\tau_m = 1587 \text{ год}$):

$$\Delta W = \Delta P_k \cdot \tau_m = 0,099 \cdot 1587 = 157,11 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість річних втрат енергії в лінії, грн:

$$C_{втрat} = \Delta W \cdot C_0 = 157,11 \cdot 12 = 1885,32$$

Остаточний висновок про придатність кабелю перерізом 25 мм^2 приймається у наступному розділі проекту після розрахунку струмів трифазного короткого замикання на шинах ТПЗ. Переріз буде перевірено за умовою мінімального перерізу з термічної стійкості:

$$F_{\text{мін}} \leq F_{\text{прийнятого}}$$

Якщо за умови протікання струму КЗ кабель 25 мм^2 проходитиме по тепловому імпульсу, його остаточно затверджують до монтажу. В іншому випадку – переріз буде збільшено виключно з міркувань стійкості до КЗ.

В умовах дії ринкового промислового тарифу 12 грн/(кВт год) фінансові річні втрати в кабельному господарстві магістрального варіанта складають $141,50 \text{ тис. грн}$. Отримані результати є цілком обґрунтованими для ліній малої довжини і

використовуються для подальшого порівняння з радіальною структурою мережі за критерієм мінімуму приведених витрат».

Таблиця 3.1 – Розрахунок параметрів магістральних ліній

КЛ	Sp, кВА	n	I _p ,	I _{р.ав} , А	F _{ст2} , мм ²	Марка кабеля	I _{доп} , А	K _з
М-1-1	1323,2	1	72,82	102,3	70	ААШВ(3х70)	165	0,445
М1-2	882,3	1	48,64	68,2	35	ААШВ(3х35)	115	0,426
М1-3	441,2	1	24,31	34,5	35	ААШВ(3х35)	115	0,212
М-2-1	1764,4	1	97,15	136,2	70	ААШВ(3х70)	165	0,584
М2-2	1323,2	1	72,82	102,5	70	ААШВ(3х70)	165	0,446
М2-3	882,1	1	48,65	68,1	35	ААШВ(3х35)	115	0,422
М2-4	441,5	1	24,32	34,3	35	ААШВ(3х35)	115	0,216

Таблиця 3.2 – Розрахунок втрат електричної енергії

№ КЛ	Sp, кВА	n	I _p ,	K _з	I _{км}	ΔРл, кВт	ΔЕл, кВт*год	С _{втр} , тис. грн
М-1-1	1323,2	1	72,82	0,44	0,05	0,994	1 578	18,94
М1-2	882,3	1	48,64	0,42	0,04	0,355	563	6,76
М1-3	441,2	1	24,31	0,21	0,08	0,177	281	3,37
М-2-1	1764,4	1	97,15	0,59	0,11	3,892	6 177	74,12
М2-2	1323,2	1	72,82	0,44	0,08	1,591	2 525	30,30
М2-3	882,1	1	48,65	0,42	0,03	0,266	422	5,06
М2-4	441,5	1	24,32	0,21	0,07	0,155	246	2,95
Всього	—						11 792	141,50

Таблиця 3.3 – Розрахунок параметрів радіальної лінії

№ КЛ	Sp, кВА	n	Ip, А	Ip.ав, А	Fст, мм ²	Марка кабеля	Ідоп, А	Кз
P1	563,72	1	31,03	43,45	35	ААШВ(3×35)	165	0,28
P2	590,33	1	32,50	45,50	35	ААШВ(3×35)	115	0,282
P3	1057,24	2	29,10	40,74	35	ААШВ(3×35)	115	0,125
P4	1119,12	2	30,80	43,13	35	ААШВ(3×35)	165	0,132
P5	500,96	1	27,58	38,61	35	ААШВ(3×35)	165	0,25
P6	1057,22	2	29,10	40,74	35	ААШВ(3×35)	115	0,124
P7	1119,15	2	30,80	43,13	35	ААШВ(3×35)	115	0,137

Таблиця 3.4 – Розрахунок втрат електроенергії в радіальній схемі

№ КЛ	Sp, кВ·А	n	Ip, А	Кз	l, км	ΔРл, кВт	ΔЕл, кВт·год	С _{втр} , тис. грн
P1	563,72	1	31,03	0,36	0,025	0,099	157	1,89
P2	590,33	1	32,50	0,38	0,100	0,436	691	8,29
P3	1057,24	2	29,10	0,34	0,150	0,349	554	6,65
P4	1119,12	2	30,80	0,36	0,070	0,219	348	4,17
P5	500,96	1	27,58	0,32	0,150	0,469	745	8,94
P6	1057,22	2	29,10	0,34	0,130	0,303	480	5,76
P7	1119,15	2	30,80	0,36	0,070	0,219	348	4,17
				—	—	2,094	3 323	39,87

Таблиця 3.5 – Розрахунок капітальних вкладень за варіантами

№ вар.	Найменування елемента схеми	Од. вим.	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Вартість всього, тис. грн
I	Магістральна схема живлення				
1	Шафи КРУ з вакуумними вимикачами 10 кВ на РП	шт	2	450,0	900,00
2	Кабельна лінія ААШВ-10 (3х25)	км	0,490	180,0	88,20
3	Облаштування траншеї (земляні роботи, подушка)	км	0,510	120,0	61,20
4	Вимикачі навантаження 10 кВ у цехових підстанціях	шт	10	310,0	3100,00
	РАЗОМ ЗА ВАРІАНТОМ I				4149,40
II	Радіальна схема живлення				
1	Шафи КРУ з вакуумними вимикачами 10 кВ на РП	шт	7	450,0	3150,00
2	Шафа КРУ з трансформаторами напруги (ТН) на РП	шт	1	280,0	280,00
3	Кабельна лінія ААШВ-10 (3х25)	км	0,695	180,0	125,10
4	Облаштування траншеї (земляні роботи, подушка)	км	0,710	120,0	85,20
	РАЗОМ ЗА ВАРІАНТОМ II				3640,30

Таблиця 3.6 – Розрахунок поточних витрат за варіантами

№	Найменування елемента схеми	Капітальні вкладення К, тис. грн	Норма амортиз. Ра, %	Відрахун. на амортиз. Са, тис. грн	Норма експл. Ре, %	Витрати на обслуг. Се, тис. грн	Загальні витрати СΣ, тис. грн
I	Магістральна схема (Варіант I)						
1	Вимикачі навантаження 10 кВ у цехових ТП	3100,00	15	465,00	5	155,00	620,00
2	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ на РП	900,00	15	135,00	5	45,00	180,00
3	Кабельні лінії з урахуванням траншеї	149,40	5	7,47	5	7,47	14,94
	Всього за варіантом I	4149,40	—	607,47	—	207,47	814,94
II	Радіальна схема (Варіант II)						
1	Шафи КРУ 10 кВ на РП (разом із ТН)	3430,00	15	514,50	5	171,50	686,00
2	Кабельні лінії з урахуванням траншеї	210,30	5	10,52	5	10,52	21,04
	Всього за варіантом II	3640,30	—	525,02	—	182,02	707,04

Таблиця 3.7 – Розрахунок приведених витрат за варіантами

Показники порівняння варіантів	Варіант I (Магістральна схема), тис. грн	Варіант II (Радіальна схема), тис. грн
Капітальні вкладення (К)	4149,40	3640,30
Поточні експлуатаційні витрати (С)	814,94	707,04
Вартість технологічних втрат електроенергії (Свтр)	141,50	39,87
Нормативні відрахування від капіталовкладень	497,93	436,84
СУМАРНІ ПРИВЕДЕНІ ВИТРАТИ (З)	1454,37	1183,75

Зіставлення техніко-економічних показників систем внутрішнього розподілу електроенергії (табл. 3.7) дозволило обґрунтовано обрати фінальний варіант схеми. За результатами розрахунків, сумарні приведені витрати для радіальної конфігурації (Варіант II) становлять **1183,75 тис. грн**, що на **270,62 тис. грн** менше порівняно з магістральним варіантом (Варіант I), де витрати складають **1454,37 тис. грн**.

Попри те, що магістральний варіант вимагає меншої кількості високовольтних комірок безпосередньо на головному РП, необхідність встановлення повноцінних автоматизованих шаф захисту з функцією АВР та мікропроцесорною логікою на кожній цеховій підстанції для споживачів II категорії надійності суттєво підвищила його капітальну та експлуатаційну вартість. Крім того, радіальна схема забезпечує значно менші втрати потужності та річної енергії в лініях.

Оскільки Варіант II демонструє найкращі показники енергетичної ефективності та мінімум приведених витрат ЗП для подальшої інженерної реалізації в проекті остаточно приймається радіальна схема внутрішнього електропостачання ремонтно-механічного підприємства.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПРИНЦИПИ ЇЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Більшість промислових електроприймачів під час роботи споживають як активну, так і реактивну потужність. Транспортування реактивної складової від джерела живлення є технічно та економічно недоцільним, оскільки протікання реактивних струмів знижує ККД системи й погіршує якість електропостачання. З метою мінімізації струмових навантажень вибір компенсувальних пристроїв (КП) здійснюється комплексно на етапі проектування СЕП.

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв в високовольтних та низьковольтних мережах

Для мінімізації втрат електричної енергії та оптимізації параметрів системи електропостачання ремонтно-механічного заводу виконано розрахунок балансу реактивної потужності на межі поділу з енергосистемою. Вихідними даними для розрахунку є інтегральні навантаження споживачів у мережах напругою до 1000 В (на шинах 0,4 кВ цехових ТП), визначені раніше: сумарне активне навантаження: $P_n = 2504,5$ кВт; сумарне реактивне навантаження: $Q_n = 2314,9$ кВар.

Загальний баланс потужності підприємства в цілому, з урахуванням високовольтних споживачів понад 1000 В ($P_v = 0$, $Q_v = 0$) та розрахованих технологічних втрат у цехових трансформаторах ($\Delta P_{тр} = 30,8$ кВт, $\Delta Q_{тр} = 242,5$ квар), становить:

$$P_p = 0 + 2504,5 + 30,8 = 2535,3 \text{ кВт}$$

$$Q_p = 0 + 2324,9 + 242,5 = 2557,4 \text{ кВар}$$

Економічно обґрунтована реактивна потужність, яка може бути безперешкодно передана з мережі енергосистеми на підприємство без погіршення режимів напруги, дорівнює:

$$Q_e = 2535,3 \cdot 0,33 = 836,65 \text{ квар}$$

Необхідна сумарна потужність компенсувальних пристроїв ($Q_{\text{ку}}$), що підлягають встановленню на підприємстві для покриття дефіциту, визначається з умови розрахункового балансу:

$$Q_{\text{ку}} = 2557,4 - 836,65 = 1720,75 \text{квар}$$

Мінімально необхідна кількість цехових трансформаторів номінальною потужністю $S_{\text{нтр}} = 630 \text{ кВ А}$ за умови їхнього оптимального економічного завантаження в нормальному режимі ($K_3 = 0,7$) становить:

$$N_0 = \frac{2504,5}{0,7 \cdot 630} = 6,3$$

З урахуванням округлення до найближчого більшого цілого числа та вимог щодо дводвигунового завантаження цехів, приймаємо базову кількість трансформаторів на заводі $N_0 = 7$ одиниць.

Варіант I: Встановлення базової кількості трансформаторів ($N = N_0 = 7$)

Визначаємо граничне значення реактивної потужності ($Q_{\text{тр}}$), яке технічно може бути пропущене з високовольтної мережі 10 кВ у низьковольтну мережу 0,4 кВ через 7 встановлених силових трансформаторів потужністю по 630 кВА без їхнього теплового перевантаження:

$$Q_{\text{тр}} = \sqrt{(7 \cdot 630 \cdot 0,7)^2 - 2504,5^2} = \sqrt{3087^2 - 2504,5^2} = 1804,73 \text{квар}$$

Отримане значення (1804,73 квар) є більшим за загальну потребу цехів у реактивній потужності ($Q_{\text{н}} = 2314,9 \text{ квар}$ мінус потужність компенсації), що підтверджує технічну спроможність трансформаторів забезпечити режим роботи заводу у Варіанті I. Остаточний розподіл конденсаторних батарей між ступенями напруги 10 кВ та 0,4 кВ для всіх трьох варіантів буде визначено шляхом техніко-економічного порівняння.

Потужність компенсувальних пристроїв, що підлягають встановленню в низьковольтній мережі 0,4 кВ, визначається на основі локальних балансів реактивної потужності на шинах низької напруги кожної цехової трансформаторної підстанції (ТП).

Таблиця 4.1 – Вибір та технічні характеристики компенсувальних пристроїв у мережі 0,4 кВ

№ ТП	№тр	Пот. активна Р _{нн} , кВт	Пот. Реакт. Q _{нн} , квар	Перетоки з мережі Qп, квар	Потужність БК Q _{БК} , квар	Кільк. шаф БК, шт	Розр. Пот. БК Q _{кн} , квар	Типове маркування конденсаторної батареї	Коеф. завант. Кз	Повна розрах. потужність Sp, кВт·А
ТП1	2	766,2	652,3	436,9	215,4	2	134	2 × УКМ58- 0,4-67-67	0,69	872,9
ТП2	2	816,7	685,3	333,1	352,2	2	266	УКМ58-0,4- 133 + УКМ58- 0,4-133	0,69	865,1
ТП3	1	442,1	306,2	0	306,2	2	332	2 × УКМ58- 0,4-166	0,7	442,9
ТП4	1	387,1	408,1	211,3	196,8	2	200	2 × УКМ58- 0,4-100	0,7	439,5
ТП5	1	393,7	270,5	198,7	71,8	2	100	2 × УКМ58- 0,4-50	0,68	429
Разом	7	2805,8	2322,4	–	–	10	1032	–	–	–

На основі уточненого поцехового підбору номінальних кроків регулювання прийнято сумарну встановлену потужність низьковольтних конденсаторних батарей $Q_{\text{кн}} = 1032$ кВар.

Уточнюємо сумарне значення реактивної потужності, яка фактично перетікає через цехові трансформатори в мережу 0,4 кВ після реалізації першого ступеня компенсації, кВар:

$$Q_{n\Sigma} = Q_{\text{HH}\Sigma} - Q_{\text{KП}} = 2314,9 - 1032 = 1282,9$$

Потужність високовольтних компенсувальних пристроїв (Q_{kv}), що встановлюються безпосередньо на центральних шинах 10 кВ розподільного пункту, обчислюється з умов загальнозаводського балансу, кВар:

$$Q_{xR} = 2557,4 - 1032 - 836,65 = 688,75$$

Відповідно до стандартної шкали номінальних потужностей високовольтних конденсаторних установок типу УКЛ(П)-10, приймаємо до встановлення

промислову батарею: $Q_{кв} = 600$ кВар (комплектуються у вигляді 1 установки типу УКЛ-10-600).

Низьковольтні БК (0,4 кВ) при середній ринковій ціні промислових автоматичних установок регулювання (УКМ58 / АКУ) становить 1,5 тис. грн за 1 кВар потужності (разом із контролером, контакторами та захистом). Сумарна потужність низьковольтних БК: 1266 квар. Отже,

$$K_{кн} = 1266 \cdot 1,5 = 1899,00 \text{ тис. грн.}$$

Високовольтні БК (10 кВ) комплектні установки типу УКЛ(П)-10 потужністю 900 квар (дві шафи по 450 кВар вартістю 450 тис. грн. за весь комплект. Отже,

$$K_{кв} = 450,00 \text{ тис. грн.}$$

$$K_{ктп} = (3 \cdot 550) + (2 \cdot 1100) = 1650 + 2200 = 3850,00 \text{ тис. грн.}$$

Маємо загальні капіталовкладення (K_{Σ}):

$$K_{\Sigma} = K_{кн} + K_{кв} + K_{ктп} = 1899,00 + 450,00 + 3850,00 = 6199,00 \text{ тис. грн.}$$

Втрати в трансформаторах від перетоку реактивної потужності ($\Delta P_{тп}$), залишковий перетік реактивної потужності: $Q_{п} = 1048,9$ кВар.

$$\Delta P_{тп} = \frac{1100191,2 \cdot 0,0002735}{100} = 3,01 \text{ кВт}$$

Втрати в низьковольтних конденсаторах $\Delta P_{кн}$:

$$\Delta P_{кн} = 0,0045 Q_{кн} = 0,0045 \cdot 1266 = 5,70 \text{ кВт}$$

Втрати у високовольтних конденсаторах $\Delta P_{кв}$:

$$\Delta P_{кв} = 0,003 Q_{кв} = 0,003 \cdot 900 = 2,70 \text{ кВт}$$

Сумарні технологічні втрати потужності:

$$\Delta P = \Delta P_{тп} + \Delta P_{кн} + \Delta P_{кв} = 3,01 + 5,70 + 2,70 = 11,41 \text{ кВт.}$$

Визначаємо вартість втраченої енергії за рік при тарифі на сьогодні і $\tau = 1587$ год:

$$\Delta W_{річні} = \Delta P_{\Sigma} \tau_{м} = 11,41 \cdot 1587 = 18107,67 \text{ кВт·год}$$

$$C_{втрат} = \frac{18107,67 \cdot 12}{1000} = 217,29 \text{ тис. грн}$$

Фінальний розрахунок приведених витрат (Z_1):

$$Z_1 = (0,12 \cdot 199,00) + 217,29 = 743,88 + 217,29 = 961,17 \text{ тис. грн.}$$

Для остаточного вибору схеми розміщення компенсувальних пристроїв зведемо розраховані параметри всіх трьох варіантів у підсумкову таблицю порівняння.

Таблиця 4.2 – Зведена відомість техніко-економічного порівняння варіантів компенсації реактивної потужності ремонтно-механічного підприємству

Показники та складові витрат	Варіант I (N=7)	Варіант II (N=8)	Варіант III (N=9)
Кількість цехових трансформаторів, шт	7	8	9
Потужність БК 0,4 кВ (Q _{кн}), квар	1266	0	0
Потужність БК 10 кВ (Q _{кв}), квар	900	2250	2250
Капітальні вкладення (K Σ), тис. грн, зокрема:	6199	5450	6000
* вартість БК 0,4 кВ (K _{кн}), тис. грн	1899	0	0
* вартість БК 10 кВ (K _{кв}), тис. грн	450	1050	1050
* вартість підстанцій КТП (K _{кtp}), тис. грн	3850	4400	4950
Сумарні втрати активної потужності (ΔP_{Σ}), кВт	11,41	19,57	18,15
Вартість річних втрат електроенергії (C _{втрат}), тис. грн	217,29	372,69	345,65
Нормативні відрахування від капіталовкладення (0,12·K), тис. грн	743,88	654	720
СУМАРНІ ПРИВЕДЕНІ ВИТРАТИ (З), ТИС. ГРН/РІК	961,17	1026,69	1065,65

Аналіз зведених техніко-економічних показників (табл. 4.2) підтверджує, що найбільш економічно вигідним є Варіант I. Приведені витрати для нього становлять 961,17 тис. грн/рік, що є мінімальним значенням серед усіх досліджуваних конфігурацій системи.

Хоча Варіант II має дещо нижчі капіталовкладення за рахунок відмови від низьковольтних БК, висока вартість втрат енергії в трансформаторах через відсутність місцевої компенсації (372,69 тис. грн/рік) робить його неефективним. Варіант III демонструє найгірші показники через надлишкові витрати на спорудження 9 підстанцій.

Таким чином, за критерієм З для реалізації на ремонтно-механічному підприємства остаточно затверджується **Варіант I**, який передбачає встановлення 7 цехових трансформаторів та змішаний розподіл конденсаторних батарей (1266 квар у мережі 0,4 кВ та 900 квар на шинах 10 кВ).

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

Для затвердженого магістрального варіанта конфігурації мережі обчислено граничні обсяги реактивної потужності, транспортування яких через силові трансформатори ТП у внутрішньоцехові мережі є допустимим за умовами їхнього теплового навантаження. На основі цих даних скориговано й остаточно визначено номінальну потужність засобів компенсації, які інтегруються безпосередньо в низьковольтні мережі підприємства. Усі етапи та проміжні результати поцехового підбору конденсаторних батарей детально відображено в таблиці 4.1. Загальний підсумок інженерних обчислень, що ілюструє структуру й параметри електричних навантажень у високовольтних мережах напругою понад 1000 В після впровадження компенсуючих пристроїв, систематизовано й подано нижче в таблиці 4.3.

На основі аналізу балансу активної та реактивної потужності підприємства встановлено, що передача всього обсягу реактивної енергії з зовнішньої мережі є недоцільною через додаткові втрати активної потужності в трансформаторах ($\Delta P_{\text{ТП}} = 12,82$ кВт за відсутності компенсації) та зниження пропускної здатності ліній. Проведено техніко-економічне зіставлення трьох варіантів конфігурації системи електропостачання залежно від кількості цехових трансформаторів ($N=7$, $N=8$, $N=9$) та способу розміщення конденсаторних батарей (БК). За критерієм мінімуму приведених витрат (З min) найефективнішим визначено Варіант I (із базовою кількістю трансформаторів $N=7$). Приведені витрати для нього становлять 961,17 тис. грн/рік, що на 6,4% менше, ніж - II, та на 9,8% менше-III.

Для реалізації в проекті затверджено двоступеневу схему компенсації із сумарною потужністю БК 2166 квар. На шинах 0,4 кВ цехових ТП загальною потужністю 1266 квар дозволяє максимально розвантажити силові трансформатори від реактивних струмів, знизивши сумарні втрати потужності в обмотках та діелектриках до мінімального рівня – 11,41 кВт. Високовольтна частина компенсації (900 квар) забезпечує підтримання нормативного коефіцієнта потужності 0,95 на межі балансової належності з енергосистемою.

Таблиця 4.3 – Розрахунок електричних навантажень в мережі вище 1000 з урахуванням компенсації

Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість	Встановлена по- тужність, кВт				m	Ки	cosφ	tgφ	Середнє навантаження за зміну, кВт		pe	Км	Розрахункова потужність, кВт			
	ел. спо- живачів																
	1	2	3							4	5			6	7	8	9
ТП№1																	
Ковальсько-заготовчий цех																	

Продовження таблиці 4.3

1		2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ТП№2																
Зварювально-монтажний цех																

Продовження таблиці 4.3

1		2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ТП№4																	
Цех	-																
силова		47,0	0,5	-	35,0	863,0	70	0,2	0,6	164,63	217,18	240,66	47	1,3	233,1	240,66	335,05
освітлювальна														1,0	1,8	2,1	
Фірмовий магазин																	
силова		15,0	0,1	-	3,0	3,1	30,0	0,6	0,7	1,0	1,7	1,7	2,0	2,1	3,6	1,9	4,1
освітлювальна														1,2	2,0	2,3	
Виставковий зал																	
силова																	
освітлювальна														0,4	0,7	0,8	
Цех №2																	
силова		37,0	0,5	-	35,0	525,0	70	0,3	0,6	130,49	149,42	160,16	30	1,4	183,5	160,16	243,57
освітлювальна														0,6	1,0	1,2	
Всього по	ТП№4																
силова		99,0	0,1	-	35	1391,1	350	0,2	0,6	1,3	312,2	402,6	79,0	1,2	383,9	402,6	556,3
освітлювальна														3,2	5,5		
Всього														387,1	408,1	562,4	
БСК															-200,0		
З урахуванням БСК														387,1	208,1		
Втрати в трансформаторі S _{тр} =	630	1,0												4,2	33,9		
Всього на шинах 10 кВ	ТП№4													391,3	242,0	460,0	
ТП№5																	
Механо-складальний цех																	
силова		54,0	0,5	-	25,0	546,8	50	0,5	0,8	277,61	205,61	204,67	44	1,2	313,9	204,67	374,77
освітлювальна														3,8	6,6	7,6	
Склади																	
силова		5,0	2,0	-	10,0	23,0	5	0,7	0,8	13,23	11,61	11,50	5	1,3	17,1	12,65	21,27
освітлювальна														0,9	0,4	1,0	
Цех №3																	
силова		16,0	1,2	-	10,0	90,2	8	0,5	0,8	43,25	31,19	34,33	16	1,3	56,1	34,33	65,74
освітлювальна														0,6	1,0	1,2	

продовження таблиці 4.3

1		2	3			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Склад гот. прод.																	
силова		5,0	2,0	-	10,0	23,0	5	0,7	0,8	13,23	11,61	11,50	5	1,3	17,1	12,65	21,27
освітлювальна															0,3	0,5	0,6
Всього по	ТП№5																
силова		80,0	0,5	-	25	683,0	50	0,5	0,8	0,8	340,3	262,0	55,0	1,1	387,8	262,0	468,0
освітлювальна															5,6	8,5	
Всього															393,3	270,5	477,4
БСК																-100,0	
З урахуванням БСК															393,3	170,5	
Втрати в трансформаторі S _{тр} =	630	1,0													4,3	34,2	
Всього на шинах 10 кВ	ТП№5														397,6	204,7	447,2
Всього по заводу																	
силова		599	0,10	-	100	5711	1000	1	1	1	2366	2276	114	1	2481,3	2276,6	3367,4
освітлювальна															23,1	38,8	45,1
Всього															2504,51	2314,9	3410,54
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																-1266,0	
Всього з врахуванням КП-0,4															2504,51	1048,9	2715,31
Втрати в трансформаторах		7,0													30,8	242,5	
Всього по заводу															2535,33	1291,42	2845,21
Компенсуючі пристрої 10 кВ																-900	
Всього на шинах 10 кВ															2535,33	391,42	2565,31

РОЗДІЛ 5

ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Головні знижувальні підстанції (ГПП) промислових підприємств зазвичай проектуються з двома силовими трансформаторними агрегатами. Таке технічне рішення гарантує безперебійне та надійне функціонування електроприймачів усіх категорій надійності, зокрема в післяаварійних режимах. Спорудження одностансформаторних підстанцій допускається як виняток лише за умови, що резервне живлення споживачів першої категорії може бути оперативно забезпечене через міжсекційні зв'язки на вторинній напрузі від інших незалежних джерел.

5.1 Обґрунтування кількості та номінальної потужності силових трансформаторів головної підстанції

Вибір одиничної потужності силового трансформаторного обладнання здійснюється відповідно до чинних галузевих норм технологічного проектування підстанцій високої напруги. Головним критерієм вибору є забезпечення живучості системи: у разі раптового відключення або пошкодження одного з трансформаторів, той, що залишився в роботі, має самостійно покривати дефіцит потужності під час проведення ремонтних робіт. При цьому допускається тимчасове обмеження другорядних (нетехнологічних) навантажень без завдання фінансових та виробничих збитків основній діяльності заводу, а також використання нормативних аварійних перевантажень трансформатора згідно з вимогами ДСТУ.

У межах цієї кваліфікаційної роботи безпосередня потреба у виборі та розрахунку потужності силових трансформаторів головної підстанції відсутня. Це зумовлено тим, що проєктований ремонтно-механічний завод отримує централізоване живлення безпосередньо від розподільних мереж енергосистеми за лініями напругою 10 кВ без проміжного трансформаційного ступеня (35 – 110

кВ). Вся потужність розподіляється через центральний розподільний пристрій (ЦРП-10 кВ) безпосередньо на цехові підстанції.

5.2. Вибір кількості та потужності трансформаторів, та місця розташування цехових підстанцій (ТП)

До встановлення приймаються комплектні трансформаторні підстанції внутрішнього розміщення (вбудованого типу) серії КТП-10/0,4 кВ. З метою дотримання чинних вимог пожежної безпеки в промислових приміщеннях, а також відповідно до державних стандартів з екодизайну, підстанції комплектуються сучасними сухими силовими трансформаторами з литою ізоляцією марки ТСЗ-630/10/0,4. Приймається, що робоче навантаження між трансформаторними агрегатами розподіляється рівномірно

З метою систематизації вихідних даних, забезпечення наочності проекту та спрощення аналізу, результати обґрунтування кількості, номінальної потужності, а також просторової прив'язки цехових ТП зведено у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики та просторове розміщення цехових трансформаторних підстанцій (ТП)

№ ТП	КТП, шт	Розрахункова потужність $S_{роз}$, кВ·А	Місце розташування (назва цеху)	Марка силового трансформатора	Коеф. K_z	Перевірка за умовою $S_{ном} \geq K_1 S_{роз}$	Перевірка за умовою $S_{ном} \geq K_2 S_{роз}$	Конструктивне виконання КТП
1	2	914,13	Ковальсько-заготовчий цех	ТСЗ-630	0,73	423,2	326,47	Вбудована
2	2	898,95	Зварювально-монтажний цех	ТСЗ-630	0,71	416,2	321,05	Вбудована
3	1	447,34	Механообробний цех	ТСЗ-630	0,71	414,2	159,76	Вбудована
4	1	460,03	Цех №2	ТСЗ-630	0,73	426,0	164,30	Вбудована
5	1	447,20	Механо-складальний цех	ТСЗ-630	0,71	414,1	159,71	Вбудована

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ І ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Для коректного підбору та перевірки комутаційних апаратів, провідників та ізоляторів на комутаційну й термічну стійкість визначають такі базові величини: початковий надперехідний струм, ударний струм, усталений струм КЗ.

6.1. Розрахунок струмів короткого замикання

Перед початком обчислень формують розрахункову схему з фіксацією контрольних точок аварійних режимів. На її основі складають схему заміщення, де всі магнітозв'язані елементи мережі (лінії, трансформатори, системи живлення) трансформують в еквівалентні активні та реактивні опори.

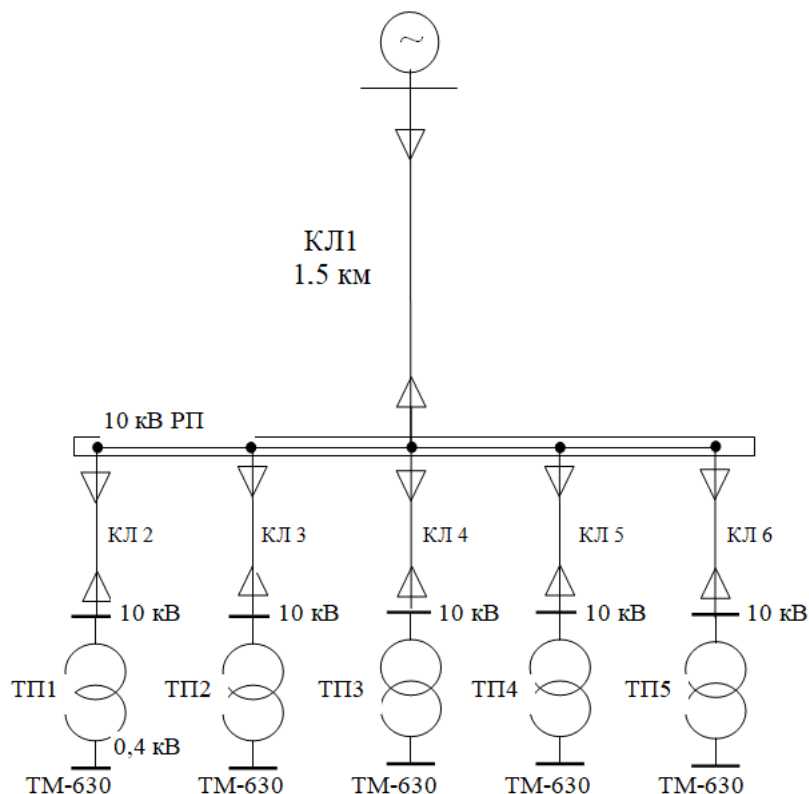


Рисунок 6.1 – Схема для розрахунку струмів короткого замикання

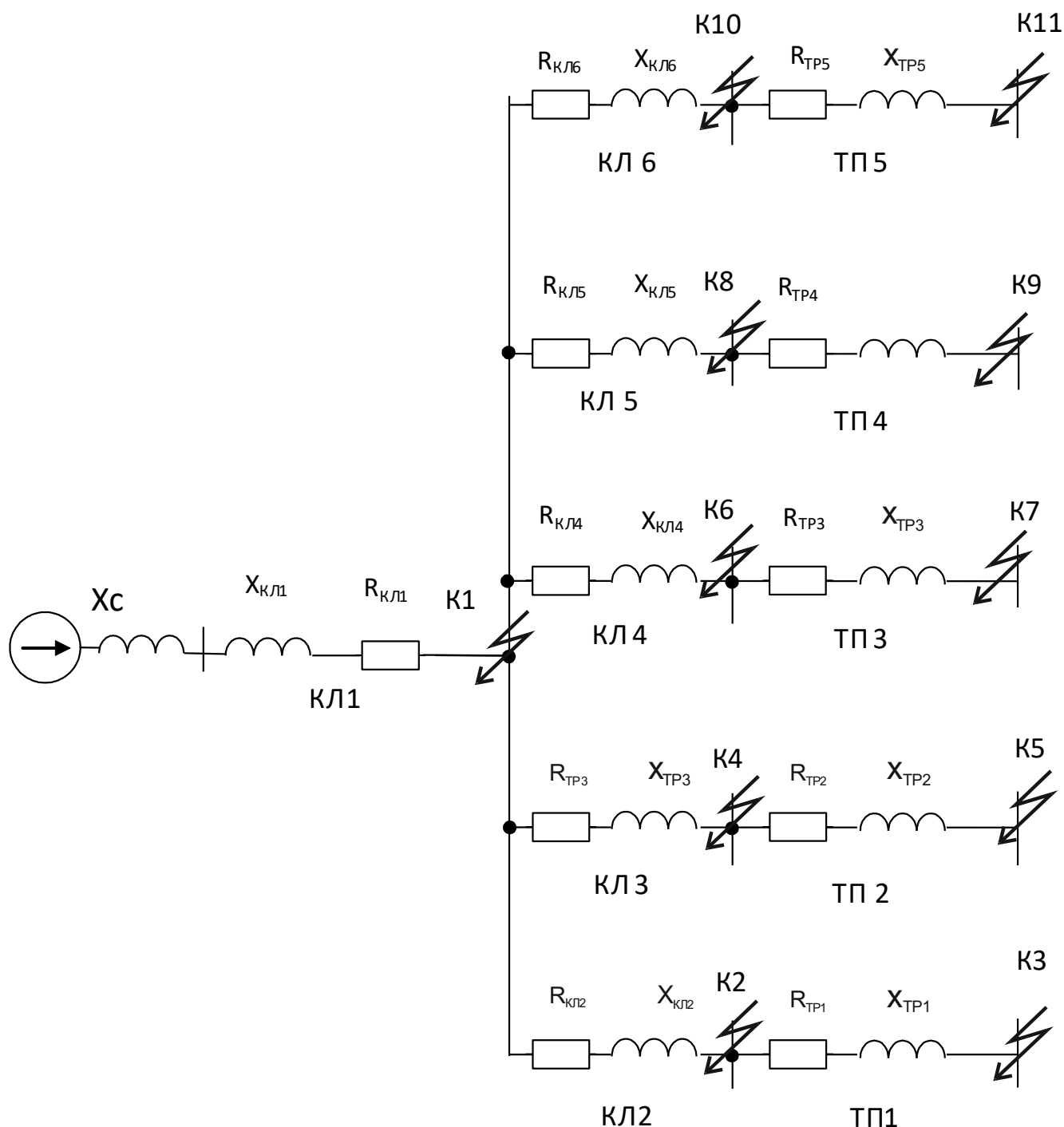


Рисунок 6.2 – Схема заміщення до розрахунку струмів КЗ підприємства

Вихідні дані для математичного моделювання наведені нижче.

Параметри живильної системи: потужність короткого замикання на шинах джерела $S_{кз} = 100$ МВА. Параметри основної кабельної лінії (Л1): марка ААШВ-10, довжина $L_1 = 1,5$ км, переріз $F1 = 95$ мм². Питомі опори за довідником: $R_0 =$

0,326 Ом/км, $X_0 = 0,08$ Ом/км. Параметри цехової кабельної лінії (Л2): марка ААШВ-10, довжина $L_2 = 0,025$ км, переріз $F_2 = 35$ мм². Питомі опори: $R_0 = 0,89$ Ом/км, $X_0 = 0,092$ Ом/км.

Параметри цехового трансформатора (ТП): тип ТСЗ-630 (сухий екодизайн), номінальна потужність $S_{\text{нтр}} = 0,63$ МВА, втрати короткого замикання $\Delta P_{\text{кз}} = 10,0$ кВт, напруга короткого замикання $U_{\text{к}} = 5,6$. Приймаємо єдину базисну потужність: $S_{\text{б}} = 100$ МВА. Базисні напруги за ступенями трансформації. Отже, на шинах K_1 та K_2 : $U_{\text{б1}} = U_{\text{б2}} = 10,5$ кВ; на низьковольтних шинах K_3 : $U_{\text{б3}} = 0,4$ кВ.

Визначення відносних базисних опорів елементів схеми наведемо нижче.
Еквівалентний опір системи:

$$X_{\text{с}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз}}} = \frac{100}{100} = 1,0$$

Опори магістральної кабельної лінії 10 кВ (Л1):

$$R_{\text{л1}} = R_0 \cdot L_1 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б1}}^2} = 0,326 \cdot 1,5 \cdot \frac{100}{10,5^2} = \frac{48,9}{110,25} = 0,444$$

$$X_{\text{л1}} = X_0 \cdot L_1 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б1}}^2} = 0,08 \cdot 1,5 \cdot \frac{100}{10,5^2} = \frac{12,0}{110,25} = 0,109$$

Опори цехової кабельної лінії 10 кВ (Л2):

$$R_{\text{л2}} = R_0 \cdot L_2 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б2}}^2} = 0,89 \cdot 0,025 \cdot \frac{100}{10,5^2} = \frac{2,225}{110,25} = 0,020$$

$$X_{\text{л2}} = X_0 \cdot L_2 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б2}}^2} = 0,092 \cdot 0,025 \cdot \frac{100}{10,5^2} = \frac{0,23}{110,25} = 0,002$$

Опори силового цехового трансформатора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{1000} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{нтр}}^2} = \frac{10,0}{1000} \cdot \frac{100}{0,63^2} = \frac{1}{0,3969} = 2,520$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{нтр}}} = \frac{5,6}{100} \cdot \frac{100}{0,63} = 8,889$$

Спрощення схеми заміщення та визначення результуючих опорів для контрольної точка К1 (Шини РП-10 кВ):

$$R_{\Sigma 1} = R_{л1} = 0,444,$$

$$X_{\Sigma 1} = X_c + X_{л1} = 1,0 + 0,109 = 1,109$$

$$Z_{\Sigma 1} = \sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + X_{\Sigma 1}^2} = \sqrt{0,444^2 + 1,109^2} = \sqrt{0,197 + 1,230} = 1,19$$

Базисний струм ступеня 10,5 кВ, діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ:

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{б1}} = \frac{100}{1,732 \cdot 10,5} = 5,50 \text{ кА}$$

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{I_{б1}}{Z_{\Sigma 1}} = \frac{5,50}{1,195} = 4,60 \text{ кА}$$

Усталений струм КЗ для віддаленої точки: $I_{\infty 1} = I_{к1}^{(3)} = 4,60 \text{ кА}$. Ударний струм КЗ (приймаємо нормативний ударний коефіцієнт для шин 10 кВ $k_y = 1,8$):

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{к1}^{(3)} = 1,414 \cdot 1,8 \cdot 4,60 = 11,71 \text{ кА}$$

Струм двофазного короткого замикання:

$$I_{к1}^{(2)} = 0,866 \cdot I_{к1}^{(3)} = 0,866 \cdot 4,60 = 3,98 \text{ кА}$$

Таблиця 6.1 – Підсумкові результати розрахунку струмів короткого замикання за точками мережі

Точка схеми	Базисна напруга $U_б$, кВ	Активний опір R_{Σ}	Реактивний опір X_{Σ}	Повний опір Z_{Σ}	Трифазний струм $I_{кз}$, кА	Ударний струм $i_{уд}$, кА	Двофазний струм $I_{кз(2)}$, кА
K1(10 кВ)	10,5	0,444	1,109	1,195	4,6	11,71	3,98
K2 (10 кВ)	10,5	0,464	1,111	1,204	4,57	11,63	3,96
K3 (0,4 кВ)	0,4	2,984	10	10,436	13,83	25,42	11,98
K4 (10 кВ)	10,5	0,484	1,113	1,214	4,53	11,53	3,92
K5 (0,4 кВ)	0,4	3,004	10,002	10,444	13,82	25,4	11,97
K6 (10 кВ)	10,5	0,514	1,116	1,228	4,48	11,41	3,88
K7 (0,4 кВ)	0,4	3,034	10,005	10,456	13,8	25,36	11,95
K8 (10 кВ)	10,5	0,544	1,119	1,244	4,42	11,25	3,83
K9 (0,4 кВ)	0,4	3,064	10,008	10,466	13,79	25,35	11,94
K10 (10 кВ)	10,5	0,574	1,122	1,26	4,37	11,13	3,79
K11 (0,4 кВ)	0,4	3,094	10,011	10,478	13,78	25,33	11,93

6.2 Вибір та перевірка високовольтного комутаційного обладнання

Для забезпечення надійного захисту та оперативного перемикання в колах високої напруги підприємства на стороні 10 кВ передбачено встановлення сучасного комутаційного обладнання. Як ввідні вимикачі на центральному розподільному пункті (ЦРП), так і захисні апарати на лініях, що відходять до цехових трансформаторних підстанцій, приймаються вакуумного типу серії **ВР-1**. Вакуумні комутаційні апарати цієї серії характеризуються високим комутаційним та механічним ресурсом, пожежобезпечністю, високою швидкістю та екологічністю через відсутність масляного наповнення.

Перевірка та технічне обґрунтування параметрів ввідних високовольтних вимикачів за умовами номінального режиму та стійкості до струмів короткого замикання систематизовані й детально подані у таблиці 6.2.

Аналогічний комплексний вибір та порівняння розрахункових параметрів вакуумних вимикачів типу ВР-1, призначених для захисту фідерних магістральних ліній розподільної мережі 10 кВ, зведено нижче в таблиці 6.3.

Час від моменту виникнення аварійного режиму до початку розходження контактів вимикача визначається як:

$$t = t_{pz, \min} + t_v = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с}$$

Повний час вимкнення КЗ з урахуванням витримки часу основного захисту. Для ввідного вимикача та для фідерних вимикачів ліній нижче відповідно:

$$t_{\text{вим1}} = t_{pz1} + t_v = 1,5 + 0,055 = 1,555 \text{ с}$$

$$t_{\text{вим2}} = t_{pz2} + t_v = 1,0 + 0,055 = 1,055 \text{ с}$$

Тепловий імпульс КЗ, Вк, що враховує дію періодичної та аперіодичної складових (стала часу згасання $T_a = 0,03 \text{ с}$):

$$\begin{aligned} B_{K1} &= \left(I_{K1}^{(3)} \right)^2 \cdot (t_{\text{вим1}} + T_a) = 4,60^2 \cdot (1,555 + 0,03) = 21,16 \cdot 1,585 \\ &= 21,16 \cdot 1,585 = 33,54 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \end{aligned}$$

На відхідних лініях (точка К2):

$$\begin{aligned} B_{K2} &= \left(I_{K2}^{(3)} \right)^2 \cdot (t_{\text{вим2}} + T_a) = 4,57^2 \cdot (1,055 + 0,03) = 20,88 \cdot 1,085 \\ &= 20,88 \cdot 1,085 = 22,65 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \end{aligned}$$

Таблиця 6.3 – Результати перевірки та технічні характеристики ввідних вакуумних вимикачів 10 кВ

Умова перевірки апарата	Розрахункова формула та умови вибору	Фактичні параметри мережі (точка К1)	Технічні характеристики вимикача ВР-1	Висновок про придатність
Номінальна напруга	$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	10 кВ	10 кВ	Відповідає
Тривалий робочий струм	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$	208 А	630 А	Відповідає
Періодичний струм відключення	$I_{\text{кз}} \leq I_{\text{відкл.ном}}$	4,60 кА	20 кА	Відповідає
Повний струм відключення	$\sqrt{2} \cdot I_{\text{кз}} \cdot e^{-t/T_a} \leq \sqrt{2} \cdot I_{\text{відкл.ном}} \cdot (1 + \beta_n)$	1,21 кА ≤ 39,6 кА	β _н =0,40	Відповідає
Електродинамічна стійкість (амплітуда)	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	11,71 кА	52 кА	Відповідає
Електродинамічна стійкість (діюче значення)	$I_{\text{кз}} \leq I_{\text{дин}}$	4,60 кА	20 кА	Відповідає
Термічна стійкість (імпульс сили струму)	$B_{\text{к}} \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}$	33,54 кА ² ·с	202·3=1200 кА ² ·с	Відповідає

Таблиця 6.4 – Результати перевірки вакуумних вимикачів 10 кВ на відхідних лініях до цехових ТП

Умова перевірки апарата	Розрахункова формула та умови вибору	Фактичні параметри мережі (точка К1)	Технічні характеристики вимикача ВР-1	Висновок про придатність
Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$	10 кВ	10 кВ	Відповідає
Тривалий робочий струм	$I_{max} \leq I_{ном}$	32,5 А	630 А	Відповідає
Періодичний струм відключення	$I_{кз} \leq I_{відкл.ном}$	4,57 кА	20 кА	Відповідає
Повний струм відключення	$\sqrt{2} \cdot I_{кз} \cdot e^{-t/T_a} \leq \sqrt{2} \cdot I_{відкл.ном} \cdot (1 + \beta_n)$	1,20 кА ≤ 39,6 кА	$\beta_n = 0,40$	Відповідає
Електродинамічна стійкість (амплітуда)	$i_{уд} \leq i_{дин}$	11,63 кА	52 кА	Відповідає
Електродинамічна стійкість (діюче значення)	$I_{кз} \leq I_{дин}$	4,57 кА	20 кА	Відповідає
Термічна стійкість (імпульс сили струму)	$B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	22,65 кА ² ·с	202·3=1200 кА ² ·с	Відповідає

Обґрунтування та вибір пристроїв захисту від перенапруг

Для забезпечення надійної роботи ізоляції електрообладнання центрального розподільного пункту (ЦРП) та цехових трансформаторних підстанцій (ТП) від шкідливого впливу внутрішніх (комутаційних) та атмосферних перенапруг передбачено встановлення захисних апаратів.

У сучасній інженерній практиці замість застарілих вентиляльних розрядників серії РВО повсюдно застосовують **обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН)** із варисторами на основі оксиду цинку ZnO). На відміну від розрядників з іскровими проміжками, ОПН мають безінерційну дію, вищу пропускну здатність та стабільні захисні характеристики протягом усього терміну експлуатації.

Оскільки проектуване підприємство отримує живлення через кабельні лінії 10 кВ, ймовірність прориву атмосферних хвиль блискавки безпосередньо на шини заводу є мінімальною. Основну загрозу становлять внутрішні перенапруги, що виникають під час комутацій кіл із високою індуктивністю вакуумними вимикачами ВР-1. Для їхнього демпфування на збірних шинах 10 кВ ЦРП та на вводах високої напруги цехових КТП встановлюються трифазні комплекти обмежувачів у полімерній ізоляції.

Вибір апаратів захисту виконано відповідно до номінальної напруги мережі та зведено в таблицю 6.5.

Таблиця 6.5 – Технічні характеристики обмежувачів перенапруг для мережі 10 кВ

Об'єкт захисту та клас напруги	Тип рекомендованого захисного апарата	Найбільша тривала допустима робоча напруга $U_{нр}$, кВ	Номінальний розрядний струм (імпульс 8/20 мкс), кА	Конструктивне виконання (матеріал корпусу)
Комутаційні апарати та шини ЦРП-10 кВ	ОПН-П-10/12	12,0	10	Полімерний композит (кремнійорганічна гума)
Вводи силових цехових трансформаторів 10/0,4 кВ	ОПН-П-10/11,5	11,5	5	Полімерний композит, герметичний

Обґрунтування вибору та перевірка трансформаторів власних потреб (ТВП)

Номінальну потужність трансформаторів власних потреб підстанції визначають на основі сумарного навантаження допоміжних систем із урахуванням коефіцієнтів завантаження електроприймачів та їхньої одночасності.

Розрахункова потужність власних потреб ($S_{роз}$) обчислюється за виразом:

$$S_{роз} = K_{п} \cdot \sqrt{P_{вст}^2 + Q_{вст}^2}$$

Для забезпечення стовідсоткового резервування допоміжних систем підстанції у післяаварійних режимах передбачено встановлення двох незалежних агрегатів ТВП.

Склад споживачів та структура навантажень системи власних потреб розподільного пристрою зведені в таблицю 6.6.

Таблиця 6.6 – Структура та параметри електронавантажень системи власних потреб КРУ-10 кВ

Вид допоміжного споживача системи власних потреб	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт потужності, cosφ	Коефіцієнт реактивності, tgφ	Розрахункове активне навантаження $P_{вст}$, кВт	Розрахункове реактивне навантаження $Q_{вст}$, квар
Системи підігріву шаф КРУ-10 кВ в холодну пору	10,0	1,0	0,0	10,0	—
Загальне робоче освітлення та вентиляція приміщення КРУ	3,0	1,0	0,0	3,0	—
Електроприймачі оперативних кіл захисту, автоматики та сигналізації	2,0	1,0	0,0	2,0	—
УСЬОГО	15,0	1,0	0,0	15,0	—

Розрахунок та вибір номінальних параметрів ТВП

Оскільки всі допоміжні споживачі підстанції є суто активними (нагрівальні елементи, освітлення, блоки живлення мікропроцесорних захистів), сумарна реактивна потужність дорівнює нулю ($Q_{вст} = 0$). Визначаємо підсумкове значення розрахункової потужності власних потреб:

$$S_{роз} = 0,8 \cdot \sqrt{15^2 + 0^2} = 0,8 \cdot 15 = 12 \text{ кВ}\cdot\text{А}$$

За умовою забезпечення пожежної безпеки всередині закритих розподільних пристроїв до встановлення приймаються два сухі силові трансформатори типу ТСЗ-25/10 зі з'єднанням обмоток «зірка-зірка з нулем». У разі раптового виходу з ладу або планового виведення в ремонт одного з трансформаторів власних потреб, весь обсяг допоміжної розрахункової потужності переводиться на інший працюючий ТВП через пристрій АВР. Коефіцієнт завантаження трансформатора, що залишився в роботі, становитиме:

$$K_3 = \frac{S_{роз}}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{12}{25} \cdot 100\% = 48\%$$

У післяаварійному режимі одиночний трансформатор ТСЗ-25 завантажувється лише на 48% від своєї номінальної пропускної здатності. Це гарантує тривалу та стабільну роботу системи власних потреб підстанції ремонтно-механічного заводу без загрози теплового навантаження або передчасного старіння ізоляції обладнання, що повністю відповідає нормам ПУЕ.

Проведено моделювання та розрахунок аварійних режимів трифазного й двофазного короткого замикання (КЗ) у відносних одиницях для ключових контрольних точок системи внутрішнього електропостачання заводу (класи напруги 10,5 кВ та 0,4 кВ). На основі отриманих величин здійснено вибір та комплексну інженерну перевірку високовольної апаратури.

Для захисту мікропроцесорних релейних систем та ізоляції сухих силових трансформаторів від комутаційних сплесків напруги, що виникають під час оперативних перемикань, обґрунтовано встановлення нелінійних обмежувачів перенапруг серії ОПН-П-10 замість застарілих вентильних розрядників.

РОЗДІЛ 7

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

7.1. *Шляхи енергозбереження в електроприводах*

Стратегічним вектором розвитку сучасної енергетики та промисловості є підвищення ефективності використання ресурсів на етапах транспортування, розподілу та кінцевого споживання електричної енергії. Оскільки понад 90% генерованої потужності споживається силовими промисловими установами, оптимізація кінцевих точок споживання має найвищий пріоритет.

Найбільший потенціал енергозбереження зосереджений у сегменті промислового електропривода, на який припадає від 60% до 80% усього індустриального електроспоживання. Сучасні засоби автоматизації дозволяють мінімізувати нераціональні витрати енергії в механічних системах, що безпосередньо впливає на зниження собівартості продукції та зменшення вуглецевого сліду підприємств.

Електропривод є ключовою ланкою, яка інтегрує систему електропостачання з робочими органами технологічних машин. Порівняно з гідравлічними або пневматичними аналогами, він має вагомі переваги: екологічність та ергономічність: повна відсутність шкідливих викидів, мастильних відходів та низький рівень акустичного шуму; енергетична ефективність: високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що мінімізує теплові втрати та дозволяє зменшити масогабаритні показники машин; гнучкість керування: висока динамічна оборотність (реверсивність) та здатність до точного регулювання координат руху.

З погляду системного аналізу, сучасний автоматизований електропривод – це складний електромеханічний комплекс, що складається з двох взаємопов'язаних каналів: силовий (енергетичний) канал: містить статичний напівпровідниковий перетворювач та електромеханічний перетворювач (двигун), які здійснюють спрямоване передавання та трансформацію енергії; інформаційний (керуючий) канал: об'єднує мікропроцесорні контролери, датчики

зворотних зв'язків та інформаційно-вимірювальні пристрої, які забезпечують виконання алгоритму роботи за заданими критеріями оптимізації.

Базова конфігурація сучасного регульованого електропривода змінного струму містить асинхронний або синхронний двигун з оптимізованими енергетичними характеристиками та перетворювач частоти (ПЧ) з ланкою постійного струму, виконаний на базі некерованого випрямляча та автономного інвертора на повністю керованих IGBT-транзисторах.

Протягом тривалого часу основу промислового парку складали прості нерегульовані приводи масового призначення (насоси, вентилятори, компресори, конвеєрні стрічки, підйомні механізми). Проте зміна економічних умов сформувала нові тенденції розвитку приводної техніки:

- Дефіцит енергоресурсів: економічні розрахунки доводять, що капіталовкладення в заощадження однієї умовної одиниці енергії у споживача є вдвічі ефективнішими, ніж витрати на видобуток аналогічного обсягу первинного палива та його подальшу генерацію.
- Перехід на змінний струм: науково-технічна дискусія щодо вибору концепції регульованого привода завершилася повною перемогою систем змінного струму. Впровадження векторного керування та прямого контролю моменту дозволило асинхронним двигунам витіснити приводи постійного струму навіть у складних динамічних режимах.
- Технологічний прогрес напівпровідників: стрімкий розвиток силової електроніки, поява швидкісних мікропроцесорів та доступність інженерного програмного забезпечення для моделювання відкрили можливості для глибокої оптимізації робочих процесів електричних машин.

Енергоефективність в автоматизованому електроприводі забезпечується через три взаємопов'язані процеси: енергоспоживання, енерговикористання та енергокерування. Такий тріадоцентричний підхід дозволяє розглядати систему «енергосистема – електропривод – технологічна установка» як єдиний гармонійний комплекс.

Перший і найбільш масштабний вектор енергозбереження охоплює сегмент нерегульованих електричних приводів масового призначення. Він полягає в оптимізації інженерної процедури підбору номінальної потужності електродвигуна для конкретного технологічного агрегату з метою забезпечення його оптимального теплового режиму під час тривалої експлуатації.

Суть проблеми є очевидною: застосування двигуна заниженої потужності призводить до його систематичного перегріву та передчасного аварійного виходу з ладу; вибір машини з надлишковим запасом потужності супроводжується низькою ефективністю перетворення енергії, тобто значними питомими втратами в самій машині (суттєве падіння ККД) та в живильних кабельних лініях через низький коефіцієнт потужності ($\cos \phi$).

Рішення цієї задачі часто ускладнюється у змінних режимах роботи, де циклічний характер навантаження та дефіцит точної каталожної інформації про динамічні властивості робочих органів призводять до проектних помилок. З огляду на те, що кількість найпростіших нерегульованих приводів у промисловості обчислюється мільйонами, сумарні збитки від їхнього нераціонального підбору є критичними для економіки підприємств.

Взаєморозрахунки між енергопостачальними компаніями та промисловими споживачами базуються на діючих системах тарифів. Проте класичні комерційні тарифи часто є недосконалими, оскільки вони не повною мірою враховують якість споживаної електричної енергії та її деструктивний вплив на ізоляцію і робочі характеристики електроустаткування.

Досягнення мінімального рівня енергоспоживання тісно пов'язане з показниками надійності й аварійності парку електричних машин. Сумарні фінансові витрати підприємства охоплюють не лише безпосередню плату за корисну електроенергію, витрачену на випуск продукції, а й витрати на поточне обслуговування, ремонти та капітальне відновлення обладнання. Тому з інженерно-економічного погляду доцільно оперувати показником інтегральних річних витрат (C_{Σ}), який об'єднує ці дві складові:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 ,$$

- C_1 – витрати на оплату спожитої активної та реактивної електроенергії, розраховані за диференційованими (зонними або триставковими) ринковими тарифами;
- C_2 – сумарна вартість ремонтних робіт, сервісного обслуговування та реновації пошкодженого електрообладнання.

Величина показника C_2 безпосередньо відображає якість менеджменту та технічний стан енергетичного господарства заводу. За незадовільного рівня експлуатації та відсутності засобів автоматичного захисту витрати на відновлення двигунів стають сумірними з платежами за спожиту енергію за основними статтями балансу.

Статистичні дані свідчать, що в окремих галузях промисловості щорічний рівень аварійності електродвигунів коливається в межах 20–70% від загального обсягу встановленого парку. При цьому висока інтенсивність відмов спостерігається навіть на однотипних виробництвах. Прикметно, що під час загального зниження темпів виробництва питома кількість аварійних виходів з ладу електричних машин не зменшується, а навпаки, демонструє тенденцію до зростання.

З урахуванням того, що в реальних умовах експлуатації більшість двигунів систематично недовантажені в нормальному режимі на 20 – 25% від свого номіналу, а загальна продуктивність ліній може знижуватися в 2,5 – 3 рази, питомі витрати на ремонт електричних машин (за умови середнього міжремонтного напрацювання близько 4000 годин) впритул наближаються до вартості електричної енергії, яку двигун споживає за весь період між двома послідовними технічними обслуговуваннями.

Якщо врахувати супутні логістичні витрати, демонтаж, монтаж та збитки від простою технологічних ліній через раптові аварії, сумарна вартість капітального ремонту пошкодженого двигуна практично зрівнюється з ринковою вартістю нового серійного апарата заводського виготовлення. Це підтверджує критичну необхідність впровадження систем точного моніторингу, теплового захисту та засобів плавного пуску в промислову інфраструктуру.

Другим фундаментальним етапом підвищення економічності масового нерегульованого електропривода є плановий перехід на спеціалізовані енергозберігаючі електричні машини, а також застосування двигунів покращеної

конструкції, які оптимізовані для функціонування у складі частотно-регульованих комплексів.

В енергозберігаючих двигунах сучасних серій (класів **IE3** та **IE4** за міжнародним стандартом ІЕС 60034-30) підвищення номінальних значень коефіцієнта корисної дії (ККД) та коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) досягається за рахунок інтенсифікації використання активних матеріалів — електротехнічної сталі та міді. Світовий досвід експлуатації таких машин підтверджує їхню високу фінансову ефективність у технологічних процесах із стабільним за тривалістю графіком навантаження.

Водночас доцільність інтеграції енергозберігаючих двигунів у виробничі лінії має ретельно обґрунтовуватися методом техніко-економічного аналізу, оскільки відносне збільшення енергетичних показників (у середньому на 2–5%) вимагає більших первинних капіталовкладень. Це зумовлено тим, що покращення ККД досягається збільшенням маси магнітопроводу (заліза) на 30–35%, обмотки (міді) — на 20–25% та короткозамкненого ротора (алюмінію) — на 10–15%.

Характерні порівняльні залежності ККД та $\cos\varphi$ від номінальної потужності для стандартних електричних машин та двигунів підвищеної енергоефективності відображено на рисунку 8.3.

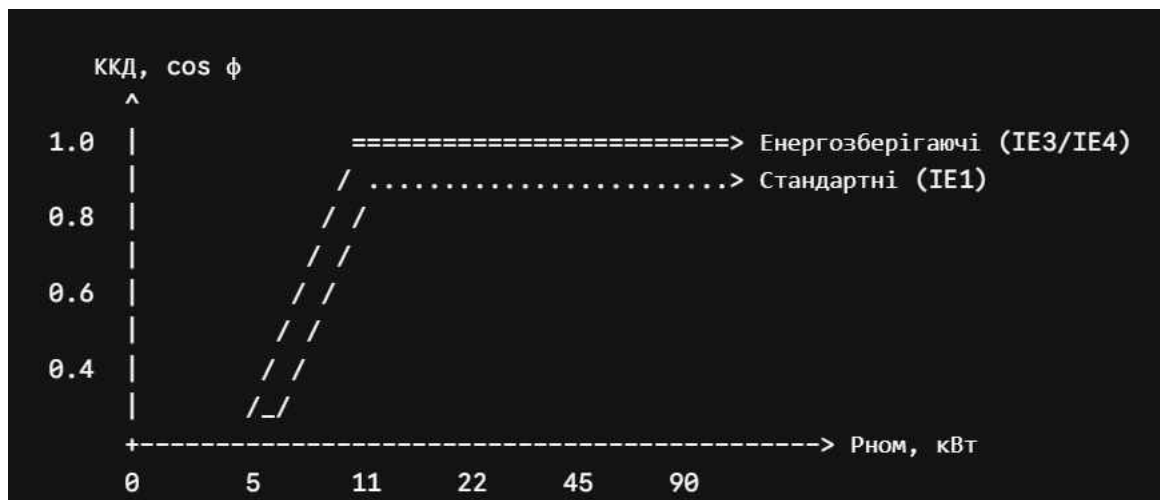


Рисунок 7.1 — Залежності коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) від номінальної потужності для стандартних та енергоефективних асинхронних двигунів

Розвиток силових електроніки зумовлює докорінну зміну класичних методологій проектування двигунів, орієнтуючи їх на специфіку роботи саме у складі регульованого електропривода з живленням від інверторів.

Насамперед це стосується асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором. Відмова від жорстких традиційних обмежень промислової мережі (фіксована амплітуда та незмінна частота 50 Гц), відсутність потреби у прямому важкому пуску від мережі та необхідності забезпечення надлишкової перевантажувальної здатності дозволяють кардинально переглянути геометрію статора й ротора.

Застосування ЧРП дає змогу проектувати машини з меншими пазами, оптимізованими обмотками та зменшеною масою рухомих частин. Це веде до суттєвого полегшення конструкції, мінімізації габаритів, зниження тепловиділення та різкого покращення статичних і динамічних характеристик привода на всьому діапазоні регулювання частоти обертання.

У галузі загальнопромислового електропривода значний внесок у розвиток енергоефективних технологій робить компанія Siemens, яка випускає спеціалізовані серії асинхронних двигунів, оптимізованих для роботи з частотними перетворювачами.

Водночас на ринку спостерігається стрімке збільшення частки регульованих приводів на базі синхронних двигунів із збудженням від високоенергетичних постійних магнітів (PMSM), які в інженерній практиці часто функціонують у режимі безконтактних вентильних двигунів (Вд). Такі машини мають найкращі у своєму класі масогабаритні показники, мінімальні втрати в роторі та надвисокий ККД.

Серед інших інноваційних рішень виділяється вентильно-індукторний двигун (SRM — Switch Reluctance Motor), який активно впроваджується в останні роки. Завдяки відсутності обмоток на роторі та використанню спрощеної топології силового напівпровідникового перетворювача, цей тип привода характеризується підвищеною надійністю та низькою собівартістю, що робить його перспективним для масового промислового застосування.

Важливе місце в сучасних дослідженнях посідає також синхронно-реактивний двигун (SynRM). За своїми питомими масогабаритними характеристиками він займає проміжне положення між високоефективними синхронними машинами з магнітами та класичними асинхронними двигунами, проте за рівнем енергетичної ефективності та капітальних витрат часто перевершує їх.

Застосування реактивних вентильних машин дозволяє значно спростити конфігурацію силових комутаторів та якірних обмоток. Додаткове підвищення енергетичної ефективності таких комплексів досягається шляхом мікропроцесорної оптимізації кута випередження інвертора, що забезпечує максимальний крутний момент і ККД залежно від поточної частоти обертання ротора. Також зниження технологічних втрат у міді статора забезпечується за рахунок раціонального укорочення кроку обмотки під час заводського проектування машини.

Для розуміння меж застосування та областей ефективного використання різних типів електроприводу великої потужності звернемося до класичного порівняльного графіка граничних параметрів електричних машин.

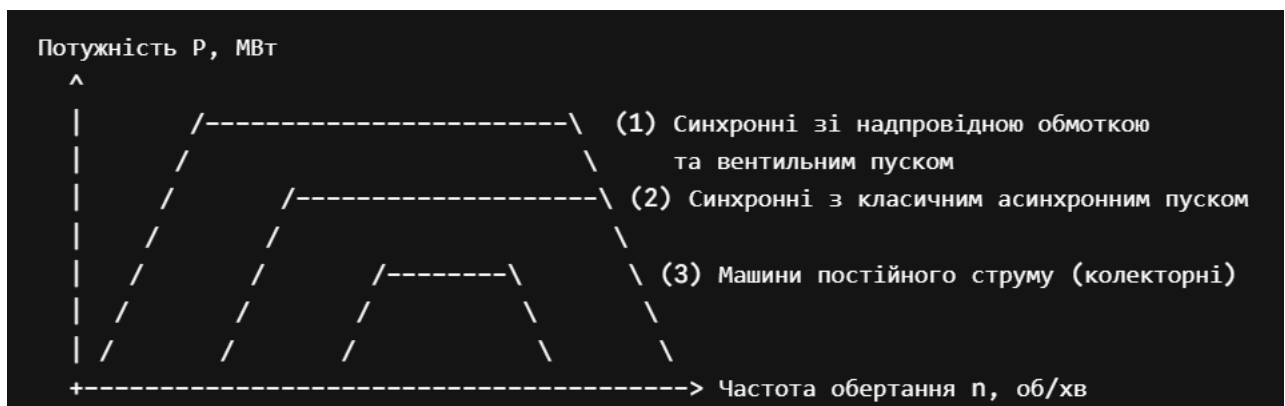
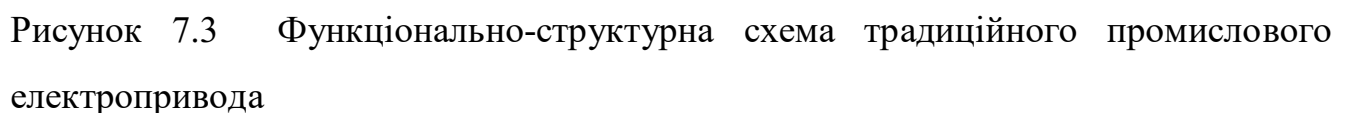


Рисунок 7.2 – Граничні діапазони максимальних потужностей електричних машин залежно від частоти обертання:

Крива 1 (Синхронні машини із надпровідними обмотками): Демонструє найвищі показники граничної потужності. Використання криогенного охолодження та пуску за безконтактною вентильною схемою дозволяє створювати надпотужні приводні комплекси для важкої промисловості (наприклад, для головних приводів прокатних станів чи компресорних станцій магістральних газопроводів). **Крива 2 (Синхронні двигуни з асинхронним пуском):** Охоплює середній та верхній масові сегменти великої промислової потужності. Вони є надійними, але мають обмеження за частотою обертання та пусковими струмами в момент прямого ввімкнення в мережу 10 кВ. **Крива 3 (Двигуни постійного струму):** Мають суттєві обмеження за максимальною потужністю та швидкістю обертання (що чітко видно з графіка) через наявність механічного щітково-колекторного вузла, який схильний до іскріння та інтенсивного зносу. Це ще раз підтверджує доцільність повного переходу на системи змінного струму, реалізовані в цьому проекті.

Узагальнена структурна схема традиційного автоматизованого електропривода містить силове джерело живлення, статичний перетворювач або механічний варіатор (коробку перемикачів швидкостей, гідromуфту чи муфти ковзання), сполучні муфти, знижувальний редуктор та безпосередньо виконавчий орган, який є кінцевим елементом робочої машини.



Для кількісної оцінки ефективності використання енергії проаналізуємо усереднені значення коефіцієнтів корисної дії (ККД) окремих елементів, що входять до складу приводного комплексу:

- стаціонарний або керований перетворювач: $\eta_{\text{п}} = 0,50 - 0,95$ (мінімальні значення притаманні режимам глибокого регулювання на низьких частотах, максимальні — для номінальних швидкостей);
- електричний двигун: $\eta_{\text{д}} = 0,75 - 0,95$ (нижня межа відповідає мікромашинам, верхня — апаратам середньої та великої потужності);
- проміжний механічний регулятор швидкості: $\eta_{\text{рег}} = 0,90 - 0,95$;
- жорстка або пружна сполучна муфта: $\eta_{\text{м}} = 0,99$;
- зубчастий або черв'ячний редуктор: $\eta_{\text{р}} = 0,95$;
- безпосередньо робочий механізм (наприклад, приводний барабан конвеєрної системи): $\eta_{\text{рм}} = 0,95$.

Підсумковий наскрізний коефіцієнт корисної дії всього електромеханічного комплексу визначається за формулою добутку ККД його послідовно з'єднаних ланок:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{рег}} \cdot \eta_{\text{м}}^k \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{рм}}$$

тут, k – сумарна кількість сполучних муфт у кінематичній схемі установок.

Якщо підставити у вираз середньостатистичні експлуатаційні параметри для промислових приводів потужністю від 10 до 100 кВт, інтегральний ККД системи перебуватиме в межах всього $\eta = 0,65 - 0,75$.

Математичний аналіз втрат показує, що від 7% до 10% усієї споживаної з мережі потужності безповоротно втрачається у вигляді тепла безпосередньо в елементах механічних передач (зубчастих зачепленнях редукторів, підшипниках та муфтах).



Рисунок 7.4 – Способи передачі механічної енергії від вала двигуна до робочого механізму

Впровадження концепції індивідуального (одиначного) привода забезпечує комплексний синергетичний ефект. Окрім кратного зниження енергоємності виробничих процесів, що досягається завдяки ліквідації розгалужених проміжних передавальних механізмів та оптимізації коефіцієнта використання встановленої потужності, такий перехід дозволив суттєво підвищити експлуатаційну надійність усього технологічного комплексу.

Важливим соціально-економічним аспектом відмови від групових трансмісій є радикальне зниження рівня виробничого травматизму, оскільки з цехів вилучається велика кількість небезпечних відкритих механічних передач. Додатково оптимізуються умови праці й промислова санітарія завдяки усуненню інтенсивного шумового забруднення та вібрацій, які раніше генерувалися роботою чисельних пасових і ланцюгових передач, відкритих зубчастих і черв'ячних зачеплень, а також обертових трансмісійних валів значної довжини (до 20 метрів).

З погляду механіки, для приведення в рух виконавчого органу будь-якої робочої машини та забезпечення заданого технологічного алгоритму необхідно прикласти певний обертальний момент при відповідній кутовій швидкості.

Математично корисна потужність на валу електромеханічного перетворювача описується базовим рівнянням:

$$P = M \cdot \omega$$

- M – крутний (обертальний) момент, що розвивається двигуном або прикладається до механізму, Н м;
- ω – кутова швидкість обертання вала, рад/с.

Саме мікропроцесорне керування цими двома координатами (M та w) за допомогою сучасних напівпровідникових перетворювачів частоти є основою для реалізації енергоефективних режимів роботи промислового устаткування ремонтно-механічного підприємства.

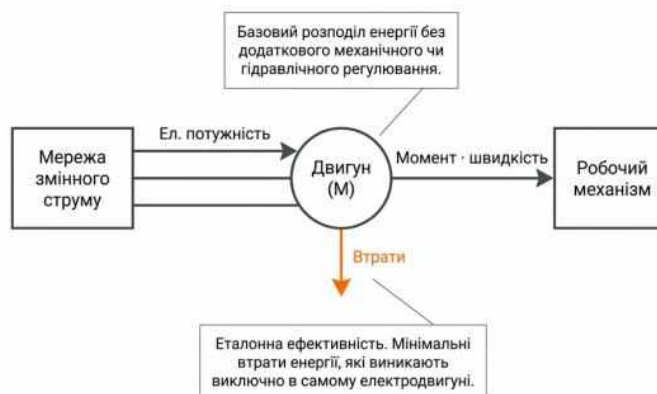


Рисунок 7.5 – Розподіл енергії в одноруховому одношвидкісному приводі

Характер протікання енергетичних процесів докорінно змінюється, якщо регулювання кутової швидкості виконавчого органу здійснюється за допомогою пристроїв, що базуються на принципі механічного чи гідродинамічного ковзання. До таких механізмів належать фрикційні варіатори, пасові передачі, електромагнітні муфти ковзання та гідromуфти.

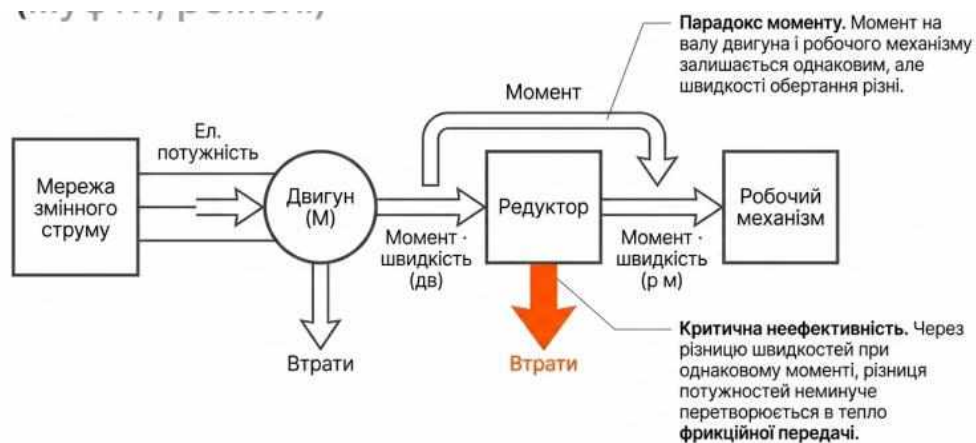


Рисунок 7.6 - Фрикційна передача (муфти, ремені)

У подібних системах обертальний момент на валу електричного двигуна (M_d) залишається практично тотожним моменту опору робочого механізму ($M_{рм}$), проте їхні кутові швидкості суттєво відрізняються ($\omega_d > \omega_{рм}$).

$$\Delta P_{\text{втрат}} = P_d - P_{рм} = M \cdot (\omega_d - \omega_{рм}) = M \cdot \Delta \omega$$

Такий спосіб узгодження швидкостей є вкрай неефективним, оскільки за глибокого регулювання більша частина енергії витрачається на некорисне нагрівання приводного вузла. Це ще раз підтверджує технічну необхідність впровадження безконтактного частотного регулювання (ЧРП) на базі напівпровідникових інверторів, де зміна швидкості асинхронного двигуна досягається оптимізацією параметрів самого живильного електромагнітного поля без механічного чи гідравлічного ковзання.

Класичний приклад нераціонального використання енергії в гідравлічних системах промислових підстанцій та цехів ілюструє насосний агрегат, приводом якого виступає нерегульований асинхронний двигун, що працює зі сталою кутовою швидкістю обертання. У таких застарілих схемах керування об'ємний розхід або потік робочої рідини контролюється механічним способом — зміною ступеня закриття засувки чи дросельного клапана на нагнітальному трубопроводі.

За винятком режимів, коли регулювальний клапан повністю відчинений і гідравлічний опір магістралі є мінімальним, у системі виникають значні втрати енергії. Надлишкова потужність, що розвивається насосом через штучне

перекриття потоку, безповоротно розсіюється у самому запірному органі та в робочій порожнині насоса у вигляді гідродинамічних завихрень і теплового нагріву рідини.

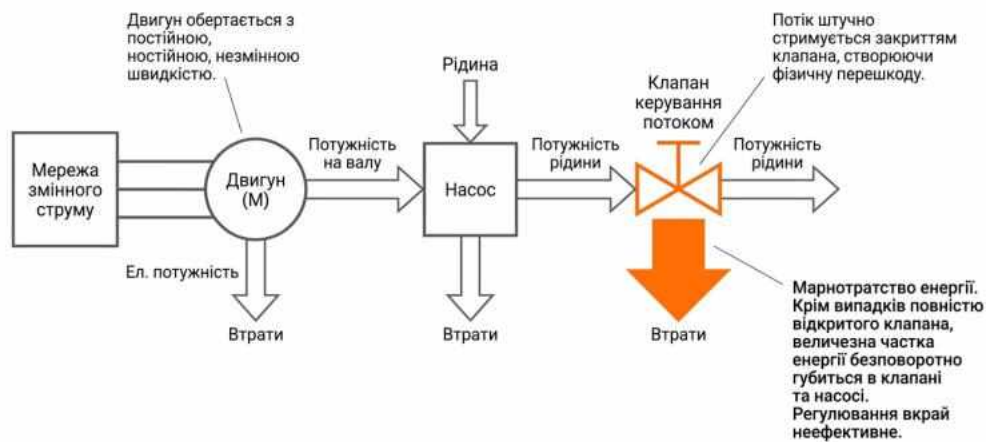


Рисунок 7.7 - Регулювання об'єму рідини дроселюванням

Математичний та інженерний аналіз доводить, що регулювання продуктивності відцентрових гідродинамічних машин методом дроселювання є вкрай неефективним і веде до перевитрат активної потужності.

Найбільш раціональним альтернативним рішенням для умов ремонтно-механічного заводу є повна відмова від регулювальних клапанів і перехід на пряме керування частотою обертання приводного двигуна за допомогою напівпровідникового перетворювача частоти. У такому разі тиск та об'ємний розхід формуються безпосередньо насосом у строгій відповідності до поточних потреб технологічного процесу, що повністю виключає появу штучних зон гідравлічного опору та забезпечує заощадження до 30–50% електричної енергії.

Мінімальний рівень внутрішніх технологічних втрат енергії фіксується у схемах, де узгодження швидкостей двигуна та виконавчого органу здійснюється за допомогою жорстких механічних передач (ступінчастих або багатодіапазонних коробок перемикання швидкостей, редукторів).

Висока енергетична ефективність такого способу зумовлена тим, що класична зубчаста механічна передача одночасно трансформує як кутову швидкість, так і обертальний момент. За ідеальних умов експлуатації добуток цих

двох координат на вході та виході передавального пристрою залишається незмінним, а потужність передається майже без втрат.

За умови якісного змащування, точного центрування валів та регулярного технічного обслуговування, коефіцієнт тертя у зачепленнях сучасних редукторів є мінімальним. Як наслідок, вхідна механічна потужність двигуна ($P_{вх}$) та вихідна корисна потужність на робочому органі ($P_{вих}$) є практично еквівалентними, що наочно ілюструє функціональна схема на рисунку 7.8.



Рисунок 7.8 - Структурна схема перетворення енергії при використанні жорстких механічних передач

Стационарні багаторівневі промислові редуктори, хоча й спроможні оперувати значними обертальними моментами у важких приводах, повністю успадковують усі зазначені технічні недоліки. Це робить їх малоефективними для сучасних гнучких автоматизованих систем, де на заміну громіздкій механіці приходять безконтактні частотно-регульовані електроприводи (ЧРП) змінного струму. Завдяки електронному керуванню, ЧРП забезпечує плавне безступінчасте регулювання швидкості безпосередньо валом двигуна, зберігаючи високу надійність та виключаючи з кінематичної схеми зношувані механічні ланки.

Незважаючи на здатність стаціонарних багатоступінчастих редукторів витримувати екстремальні механічні навантаження у важких приводних комплексах, вони повною мірою переймають усі згадані конструктивні й експлуатаційні вади. Через високу металоємність, дискретність зміни швидкостей та потребу в постійному сервісному догляді застосування таких вузлів у гнучких

автоматизованих комплексах є технічно й економічно виправданим лише у виняткових випадках.

Сучасна концепція автоматизації промисловості базується на заміні громіздких механічних редукторів безконтактними частотно-регульованими електроприводами (ЧРП) змінного струму. Системи на основі ЧРП реалізують інтелектуальне мікропроцесорне керування параметрами статорного магнітного поля, що дозволяє здійснювати безступінчасту й плавну зміну кутової швидкості безпосередньо на валу електричної машини.

Впровадження електронного регулювання не лише кардинально підвищує експлуатаційну надійність приводного вузла, а й дає змогу повністю вилючити з кінематичної схеми технологічних агрегатів зношувані механічні ланки ланцюгової, пасової чи фрикційної передачі, мінімізуючи теплові втрати тертя.

Четвертий стратегічний напрям підвищення енергоефективності полягає в оптимізації безпосередньо робочих режимів технологічних установок та агрегатів шляхом вдосконалення алгоритмів керування виробничим процесом.

Максимального ефекту від впровадження таких заходів досягають на енергомістких підприємствах зі складною структурою енергетичного господарства, яскравим прикладом яких є гірничовидобувні та вугільні шахти. Сумарна встановлена потужність електроприймачів сучасного видобувного комплексу вимірюється десятками тисяч кіловат, а річне споживання енергії сягає десятків і навіть сотень мільйонів кіловат-годин. При цьому одинична потужність головних шахтних вентиляторів, компресорів чи підйомних машин становить кілька мегават. Мінімізація питомого енергоспоживання через оптимізацію технологічного процесу досягається комплексною реалізацією низки інженерних та організаційних рішень: динамічним узгодженням режимів роботи обладнання з флуктуаціями навантаження для підтримки ККД на навколономінальному рівні, заміною механічного регулювання продуктивності на гнучке автоматизоване керування координатами привода, оптимізацією циклограм та вирівнюванням добового графіка навантажень. Крім того, цей процес передбачає забезпечення

стабільного нормованого завантаження транспортувальних і підйомних машин, впровадження безперервного технічного моніторингу вузлів для запобігання механічним втратам, інтеграцію сучасних інтелектуальних систем електропривода з мікропроцесорним контролем, а також розгортання оперативного енергоменеджменту й пообідового контролю енергоємності виробництва. За таких масштабів виробництва навіть незначне відсоткове заощадження ресурсів у кожній окремій ланці дає колосальний сумарний фінансовий ефект. Раціональне керування енергоспоживанням усього підземного та наземного комплексів дозволяє суттєво оптимізувати енергетичний баланс підприємства, що безпосередньо відображається на зниженні собівартості кінцевого продукту та підвищенні конкурентоспроможності промислового об'єкта.

П'ятий базовий напрям підвищення енергоефективності полягає в оптимізації експлуатаційних режимів та алгоритмів функціонування електромеханічних систем. Цей комплекс інженерних заходів охоплює: обґрунтування раціонального способу та діапазону регулювання кутової швидкості відповідно до кінематичних вимог виконавчих органів; вибір методу керування швидкістю з урахуванням статичних характеристик навантаження; інтенсифікацію завантаження технологічних машин для мінімізації питомих втрат; усунення або обмеження тривалості режимів холостого ходу за допомогою засобів автоматизації; адаптивне зниження напруги на статорних обмотках асинхронних двигунів (АД) за часткових навантажень; мінімізацію споживання струму та внутрішніх теплових втрат в АД шляхом екстремального керування магнітним потоком при флуктуаціях навантаження; параметричну оптимізацію перехідних (динамічних) процесів; переведення синхронних двигунів у режим перезбудження для локальної компенсації реактивної потужності; інтеграцію буферних накопичувачів та акумуляторів енергії в силові кола привода.

Фундаментом для розробки високоефективних енергозберігаючих заходів є детальний аудит кінетичних і теплових режимів робочої машини. При цьому

оцінюється як доцільність безперервного регулювання кутової швидкості, так і загальний рівень керованості агрегату. Під керованістю розуміють здатність системи адаптувати параметри технологічного процесу за допомогою дискретних впливів, зокрема раціональним чергуванням періодичних пусків та зупинок.

На прикладі приводних комплексів відцентрових турбомеханізмів (насосів, вентиляторів, компресорів) виділяють три фундаментальні методи контролю вихідного технологічного параметра:

1. **Аерогідродинамічний метод:** зміна характеристик проточної частини магістралі шляхом дроселювання засувками або коригування кута атаки лопаток прямого апарата. Спосіб вирізняється низькою капіталомісткістю, але супроводжується стрімким падінням ККД системи.

2. **Електромеханічний метод:** варіація кутової швидкості обертання робочого колеса за допомогою частотно-регульованого електропривода (ЧРП). Забезпечує стабільно високий ККД на всьому діапазоні регулювання за значних первинних інвестицій у силову напівпровідникову техніку.

3. **Груповий дискретний метод:** селективне увімкнення та вимкнення окремих агрегатів у складі мультиприводної насосної чи вентиляторної станції.

Групова дискретна схема має жорсткі обмеження щодо допустимої частоти ввімкнень некомутованих електричних машин через їхнє інтенсивне теплове навантаження пусковими струмами. Крім того, прямий некерований пуск супроводжується екстремальними гідродинамічними ударами в трубопроводах та динамічними перевантаженнями валів.

Впровадження систем плавного керованого пуску повністю нівелює зазначені деструктивні чинники. Для приводів змінного струму раціональною альтернативою повнофункціональним ЧРП у пускових режимах є застосування тиристорних регуляторів напруги (ТРН) у колі статора, капітальні витрати на впровадження яких у середньому вп'ятеро нижчі. Експлуатаційна практика доводить, що інтеграція ТРН збільшує міжремонтний ресурс синхронних машин у кілька разів, а термін служби робочих коліс відцентрових насосів зростає на 15–75%.

Систематичне недовантаження та завищення проектної потужності асинхронних двигунів (АД) призводить до суттєвого зниження їхнього ККД і коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$). Ефективним методом усунення цього явища при незмінній частоті мережі є регулювання напруги на статорі апарата залежно від величини робочого струму. Такий підхід оптимізує магнітний потік, мінімізує споживання струму та дозволяє знизити втрати електроенергії в двигуні на величину до 5%.

Паралельно важливим вектором розвитку приводної техніки є інтеграція накопичувачів енергії. Застосування сучасних малогабаритних ємнісних конденсаторів (суперконденсаторів) у складі комплектних накопичувально-компенсуючих пристроїв є вкрай перспективним для транспортних систем та приводів із різкозмінним графіком навантаження. Це дозволяє ефективно згладжувати піки енергоспоживання, компенсувати реактивну потужність та здійснювати локальне демпфування динамічних ударів у живильних електричних мережах підприємства.

Шостий стратегічний напрям підвищення енергоефективності промислових комплексів полягає у селекції оптимальної конфігурації електромеханічної системи для конкретного агрегату та плановому переведенні технологічних установок із нерегульованого привода на регульований. Цей процес є складним інженерним завданням і передбачає послідовне виконання таких етапів:

- поглиблений аналіз параметрів технологічного процесу та специфіки умов експлуатації з подальшим формуванням суворого технічного завдання;
- розробка та багатокритеріальний техніко-економічний аналіз альтернативних варіантів приводних систем із вибором найбільш раціонального типу обладнання;
- розрахунок енергетичних координат системи, визначення оптимальної встановленої потужності електричної машини та синтез мікропроцесорної структури керування;
- розробка повного пакета конструкторської, проектної та експлуатаційної документації.

Інтенсифікація та автоматизація сучасних виробничих ліній нерозривно пов'язані з інтеграцією регульованого привода. Його практичне застосування дозволяє ефективно вирішувати завдання щодо забезпечення оптимальних динамічних режимів роботи робочих органів, зниження собівартості та підвищення якісних показників готової продукції, зростання загальної продуктивності праці, а також максимізації ККД енерговикористання, надійності та міжремонтного ресурсу технологічного устаткування.

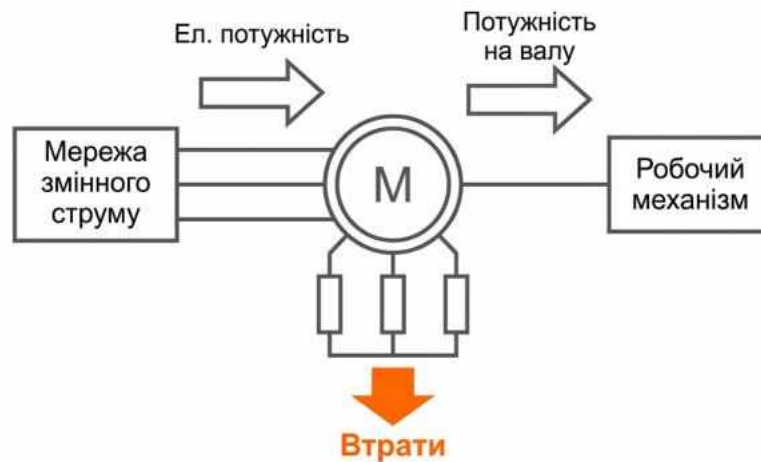


Рисунок 7.9 – Асинхронний двигун (АД) зі змінним опором у колі ротора. Керування здійснюється за рахунок збільшення втрат.



Рисунок 7.10 – Двигун постійного струму (ДПТ) незалежного збудження з регульованим реостатом. Керування здійснюється за рахунок збільшення втрат.

З позиції енергетичної ефективності найвищу результативність демонструють регульовані електроприводи змінного струму. Впровадження таких систем є найбільш виправданим для турбомеханізмів (насосних агрегатів,

компресорних установок, вентиляторів), а також для підйомних комплексів і верстатів з ЧПК, де реальний обсяг заощадження електричної енергії може сягати 50%.

Значна група індустріальних споживачів — зокрема підйомно-транспортне устаткування, роботизовані комплекси, автоматизовані транспортно-складські системи та ліфти — функціонує в повторно-короткочасних режимах із високою частотою циклів пуску та гальмування. Інтеграція економічно доступних систем на базі тиристорних регуляторів напруги в поєднанні з асинхронними двигунами (ТРН-АД) дозволяє ефективно реалізувати режими плавного (м'якого) розгону та сповільнення. Це досягається шляхом мікропроцесорного формування заданого часового закону амплітуди першої гармоніки напруги під час пуску або подачі контрольованого постійного струму в статорні обмотки для забезпечення динамічного гальмування.

Застосування ТРН забезпечує суттєве демпфування пускових струмів і зниження наскрізного енергоспоживання на 3–6% (залежно від одиничної потужності електричної машини та інтенсивності технологічного циклу). Разом із цим успішно вирішується низка супутніх інженерних завдань: мінімізуються динамічні удари в кінематичних передачах редукторів, обмежуються критичні прискорення і ривки робочих органів, що в підсумку значно підвищує експлуатаційну надійність та подовжує загальний міжремонтний ресурс обладнання.



Рисунок 7.11 — Енергозбереження через частотне регулювання

Під час модернізації виробництва та переведення технологічних комплексів із нерегульованого привода на регульований необхідно керуватися такими фундаментальними інженерними аспектами:

- Процесно-орієнтований ефект: оптимізація енергоспоживання найчастіше досягається не за рахунок ККД самого перетворювача, а внаслідок раціоналізації параметрів технологічного процесу, який цей привід обслуговує. Сумарне заощадження енергоресурсів у суміжних ланках виробництва може в кілька разів перевищувати власну потужність, яку споживає електромеханічна система.

- Доцільність параметричного обмеження: для досягнення вагомого економічного ефекту в багатьох завданнях достатньо змінювати швидкість у вузькому діапазоні за помірних вимог до динамічних характеристик системи. Наприклад, незначна корекція частоти обертання циркуляційного насоса системи гарячого водопостачання забезпечує колосальне заощадження теплоносія. За таких умов використання високовартісних і складних перетворювачів частоти є надлишковим – раціональніше застосовувати надійні та фінансово доступні тиристорні регулятори напруги (ТРН) на статорі асинхронних двигунів.

- Еволюція приводних систем: у промисловості спостерігається стійка тенденція витіснення приводів постійного струму безконтактними системами змінного струму. Частка останніх у загальній структурі індустріального парку динамічно зростає.

У важких промислових секторах (зокрема на стаціонарних шахтних вентиляторних, компресорних та водовідливних комплексах) сформувався стійкий попит на безколекторні машини змінного струму, експлуатація яких вимагає мінімальних сервісних витрат. Заміна щітково-колекторних вузлів безконтактними системами кардинально підвищує ККД, експлуатаційну надійність та продуктивність установок.

У підйомних машинах великої потужності підвищення енергетичної ефективності, ресурсу працездатності та оптимізація експлуатаційних витрат реалізуються шляхом переходу на безредукторні безколекторні приводи змінного

струму, які за своїми регульовальними властивостями не поступаються системам постійного струму, але значно перевершують їх за показниками надійності.

Економічна доцільність та специфіка суворих пускових режимів магістральних важких конвеєрів зумовлюють актуальність використання регульованого безколекторного привода на базі синхронних двигунів (СД). Це дозволяє зберегти традиційну перевагу великих синхронних машин – здатність підтримувати високий коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) загальнозаводської мережі – забезпечуючи при цьому плавне частотне керування кутовою швидкістю робочого колеса.

Для приводних комплексів, які потребують виключно м'якого розгону та вузького (до 10%) діапазону зміни кутової швидкості (наприклад, відцентрові насоси, вентилятори, компресорні установки, магістральні конвеєри тощо), технічно обґрунтованим є застосування тиристорних регуляторів напруги (ТРН). Вітчизняна промисловість має успішний досвід впровадження таких рішень: Харківський електромеханічний завод (ХЕМЗ) розробив та реалізував низку високовольтних систем класу 6 кВ для механізмів із вентиляторною характеристикою навантаження, а на Запорізькому електроапаратному заводі серійно освоєно виробництво низьковольтних модифікацій ТРН для керування двигунами потужністю до 100 кВт.

Порівняльний аналіз динамічних і статичних режимів роботи регульованих та класичних нерегульованих систем змінного струму вказує на неоднозначність критеріїв їхньої ефективності в зоні частот обертання, близьких до номінальних. Існує чітко визначений швидкісний діапазон (поблизу синхронної швидкості), де експлуатація простого нерегульованого привода є набагато раціональнішою.

Це зумовлено тим, що будь-яка напівпровідникова топологія регульованого привода, окрім власних внутрішніх втрат на комутацію та перетворення енергії, провокує виникнення додаткових теплових втрат у самій електричній машині через вищі гармоніки струму, а також деструктивно впливає на живильну електричну мережу й суміжні автоматизовані пристрої. Під цим деструктивним (шкідливим) впливом інженерна практика розуміє насамперед

появу додаткових втрат від несинусоїдальності, проблеми електромагнітної несумісності (ЕМС) та прискорене теплове й діелектричне старіння електроізоляційних матеріалів обмоток двигуна.

Сьомий стратегічний напрям енергозбереження полягає у забезпеченні належної якості електричної енергії в живильних мережах підприємства за допомогою інтегрованих засобів силової перетворювальної техніки.

Сучасний регульований електропривід є потужним нелінійним навантаженням. Його функціонування супроводжується деструктивним зворотним впливом на систему електропостачання, що виражається у зниженні вхідного коефіцієнта потужності, виникненні коливань (флуктуацій) напруги та спотворенні синусоїдальної форми кривих струму й напруги. Падіння коефіцієнта потужності збільшує циркуляцію реактивної складової, що викликає додаткові втрати енергії, провокує падіння напруги в лініях і вимагає штучного нарощування пропускної здатності трансформаторів та фідерів.

Через стрімку насиченість промислових інфраструктур вентильними напівпровідниковими перетворювачами питома вага нелінійних навантажень безперервно зростає. За таких умов сумарний рівень вищих гармонік у кривій напруги загальнозаводської мережі нерідко досягає критичних 10–15%.

Для умов проекту КРУ-10 кВ ремонтно-механічного заводу забезпечення вимог електромагнітної сумісності досягається відмовою від простих 6-пульсних схем випрямлення на користь 12-пульсних мостових конфігурацій перетворювачів частоти або впровадженням активних фільтрів гармонік (АФГ).

Застосування активних напівпровідникових випрямлячів (Active Front End) дозволяє практично повністю нівелювати генерацію низькочастотних гармонік (5-ї, 7-ї), забезпечити наближення форми струму до синусоїдальної та підтримувати вхідний коефіцієнт потужності на рівні 1,0 без встановлення громіздких пасивних фільтр-компенсуючих пристроїв.

7.2. Енергозбереження в режимах частих пусків та гальмувань

Значна кількість промислових механізмів (крани, ліфти, циклічні конвеєри, дозатори) функціонує в повторно-короткочасному режимі роботи **S3** або його модифікаціях. Під час проектування таких електроприводів найважливішим завданням є визначення гранично допустимої частоти ввімкнень за годину ($\$h\$$), яка жорстко лімітується тепловим навантаженням (нагріванням) обмоток двигуна. Зменшення втрат енергії в асинхронному двигуні (АД) як у сталих, так і в перехідних (пуско-гальмівних) режимах дозволяє одночасно вирішити два завдання: забезпечити високий рівень енергозбереження та суттєво підвищити допустиму частоту ввімкнень електропривода.

Усталене рівняння теплового балансу електричної машини отримують шляхом порівняння кількості теплоти, що виділяється в її внутрішньому просторі, та теплоти, яка розсіюється в навколишнє середовище за час повного циклу ($t_{\text{ц}}$):

$$\Delta P \cdot t_p + \Delta W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{г}} = A \cdot (t_p \cdot \tau_{\text{уст}} + \beta \cdot t_z \cdot \tau_{\text{уст}})$$

Якщо ввести показники частоти ввімкнень за одну годину ($h = 3600/t_{\text{ц}}$) та відносної тривалості ввімкнення $\varepsilon = t_p/t_{\text{ц}}$ то після математичних перетворень отримаємо аналітичний вираз для граничної частоти ввімкнень АД:

$$h = \frac{3600 \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot [\varepsilon + \beta \cdot (1 - \varepsilon)] - 3600 \cdot \Delta P \cdot \varepsilon}{\Delta W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{г}}}$$

З наведеної залежності чітко впливає, що інтенсифікація частоти ввімкнень двигуна досягається шляхом зниження втрат потужності у сталому режимі ΔP , зменшення інтегральних втрат енергії під час пуску $\Delta W_{\text{п}}$ і гальмування $\Delta W_{\text{г}}$, а також завдяки впровадженню ефективних систем примусового охолодження (незалежної вентиляції з коефіцієнтом β).

Практичний приклад розрахунку допустимої частоти ввімкнень електропривода. Вихідні дані: для аналізу прийнято асинхронний двигун із короткозамкненим ротором типу **АИР132S4** ($P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт, номінальна синхронна швидкість $n_0 = 1500$ об/хв, номінальне ковзання $s_{\text{ном}} = 0,04$,

номінальний ККД $\eta_{\text{ном}} = 87,5\% = 0,875$). Кратності моментів: пускового $k_{\text{п}} = 2,0$; максимального $k_{\text{max}} = 2,5$. Власний момент інерції ротора: $J_{\text{вд}} = 0,028 \text{ кг м}^2$.

Технологічні умови експлуатації:

відносна тривалість ввімкнення: $\epsilon = 0,42$ за номінального корисного навантаження;

співвідношення активних опорів обмоток статора й ротора: $R_1/R_2 = 1,5$;

коефіцієнт погіршення тепловіддачі під час зупинки двигуна: $\beta = 0,3$;

сумарний зведений момент інерції привода: $J_{\Sigma} = 1,2 \cdot J_{\text{вд}} = 1,2 \cdot 0,028 = 0,0336 \text{ кг м}^2$;

спосіб зупинки механізму: механічний вибіг (відключення від мережі без електричного гальмування, $\Delta W_{\Gamma} = 0$).

Визначення кутової швидкості двигуна. Синхронна кутова швидкість поля статора:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157,08 \text{ рад/с}$$

Номінальна кутова швидкість ротора:

$$\omega_{\text{ном}} = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{ном}}) = 157,08 \cdot (1 - 0,04) = 150,80 \text{ рад/с}$$

Визначення номінального обертового моменту:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{7500}{150,80} = 49,73 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок сумарних втрат потужності у номінальному сталому режимі:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} \right) = 7500 \cdot \left(\frac{1 - 0,875}{0,875} \right) = 1071,43 \text{ Вт}$$

Визначення змінних втрат потужності в міді обмоток статора й ротора.

Маючи втрати в колі ротора:

$$\Delta P_{\text{е2}} = P_{\text{ем}} \cdot s_{\text{ном}} \approx P_{\text{ном}} \cdot s_{\text{ном}} = 7500 \cdot 0,04 = 300 \text{ Вт.}$$

І врахувавши співвідношення опорів

$$\frac{R_1}{R_2} = 1,5,$$

змінні втрати в статорі становитимуть:

$$\Delta P_{\text{е1}} = 1,5 \cdot \Delta P_{\text{е2}} = 1,5 \cdot 300 = 450 \text{ Вт.}$$

Сумарні змінні втрати:

$$\Delta P_{3M} = \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} = 450 + 300 = 750 \text{ Вт}$$

Визначаємо постійних втрат потужності (в сталі магнітопроводу та механічних):

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{3M} = 1071,43 - 750 = 321,43 \text{ Вт}$$

Розрахунок середнього пускового моменту двигуна і приймаємо середнє значення за період розгону як напівсуму початкового пускового та критичного моментів:

$$M_{\Pi} = 2,0 \cdot M_{\text{ном}} = 2,0 \cdot 49,73 = 99,46 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{max}} = 2,5 \cdot M_{\text{ном}} = 2,5 \cdot 49,73 = 124,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{п.сер}} = \frac{M_{\Pi} + M_{\text{max}}}{2} = \frac{99,46 + 124,33}{2} = 111,90 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Надлишковий динамічний момент, що прискорює систему за умови номінального статичного опору механізму ($M_c = M_{\text{ном}}$):

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{п.сер}} - M_{\text{ном}} = 111,90 - 49,73 = 62,17 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок тривалості динамічного пуску привода:

$$t_{\Pi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{дин}}} = \frac{0,0336 \cdot 150,80}{62,17} = 0,0815 \text{ с}$$

Визначення змінних втрат енергії в обмотках за час розгону:

$$\Delta W_{3M.\Pi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) = \frac{0,0336 \cdot 157,08^2}{2} \cdot (1 + 1,5) = 414,52 \cdot 2,5 = 1036,30 \text{ Дж}$$

Розрахунок втрат енергії від постійних складових та визначення повного пускового імпульсу:

$$\Delta W_{\text{пост.}\Pi} = \Delta P_{\text{пост}} \cdot t_{\Pi} = 321,43 \cdot 0,0815 = 26,20 \text{ Дж}$$

$$\Delta W_{\Pi.\Sigma} = \Delta W_{3M.\Pi} + \Delta W_{\text{пост.}p} = 1036,30 + 26,20 = 1062,50 \text{ Дж}$$

Обчислення гранично допустимої частоти ввімкнень за годину. Оскільки у сталому режимі двигун працює з номінальним навантаженням $\Delta P = \Delta P_{\text{ном}}$, а гальмування здійснюється вибігом $\Delta W_{\Gamma} = 0$, отримуємо:

$$h = \frac{3600 \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot \beta \cdot (1 - \varepsilon)}{\Delta W_{\Pi.\Sigma}} = \frac{3600 \cdot 1071,43 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,42)}{1062,50} =$$

$$= \frac{671143,75}{1062,50} \approx 631 \text{ ввімкнень/годину}$$

Сучасні частотно-регульовані методи мінімізації пускових втрат. Як доводить проведений вище математичний аналіз, підвищення експлуатаційної інтенсивності привода безпосередньо пов'язане зі зниженням енергетичних втрат у перехідних процесах.

1. Частотно-керований пуск. Інтеграція напівпровідникового перетворювача частоти дозволяє повністю усунути важкі пускові режими. Завдяки підтримці оптимального ковзання на всьому етапі розгону, пускові струми не перевищують номінальних значень. Для нашого прикладу:

$$T_M = \frac{0,0336 \cdot 157,08}{49,73} = 0,106 \text{ с}$$

Отже, за умови встановлення темпу розгону в налаштуваннях інвертора $t_{\text{чп}} > 0,21 \text{ с}$, теплові втрати в міді двигуна стають меншими, ніж за прямого ввімкнення, що дозволяє пропорційно збільшити частоту ввімкнень h без ризику пробою ізоляції.

2. Рекуперативне гальмування: Застосування частотного інвертора з активним випрямлячем (Active Front End) дає змогу замінити неефективне механічне вибігання або динамічне гальмування з розсіюванням тепла на резисторах контрольованим частотним уповільненням. При цьому кінетична енергія рухомих мас привода трансформується назад в електричну і повертається в заводську розподільну мережу 0,4 кВ.

3. Оптимізація передавальних чисел: Додатковим резервом зниження енергетичних втрат є точний підбір передавального числа редуктора, який забезпечує мінімальне значення зведеного моменту інерції J_{Σ} до вала електродвигуна, що суттєво скорочує час проходження зони перехідних процесів.

Отже, на основі проведеного техніко-економічного та енергетичного аналізу визначено п'ять фундаментальних напрямів підвищення енергоефективності та надійності масового промислового електропривода, впровадження яких є

критично важливим для модернізації силового господарства ремонтно-механічного заводу.

Обґрунтовано доцільність планової заміни застарілого парку асинхронних двигунів класичних серій (класу ІЕ1) на сучасні енергозберігаючі електричні машини класів ІЕ3 та ІЕ4. Математичне моделювання та аналіз порівняльних кривих ККД і коефіцієнта потужності довели, що попри збільшення первинних капіталовкладень (зумовлене зростанням маси активних матеріалів: сталі на 30–35% та міді на 20–25%), інтегральний енергетичний ефект у режимах зі стабільним за тривалістю графіком навантаження забезпечує стійкий приріст ККД на 2–5%, особливо в найбільш масовому сегменті потужностей від 10 до 100 кВт.

Визначено високу ефективність переходу від групових трансмісійних схем до індивідуального (одиначного) та прямого безредукторного привода (**Direct Drive**). Ліквідація проміжних механічних передач (редукторів, пасових та ланцюгових зачеплень) усуває постійні втрати на тертя, забезпечуючи наскрізне підвищення ККД електромеханічного комплексу на 7–10%, паралельно знижуючи рівень шумового забруднення, вібрацій та виробничого травматизму в цехах підприємства.

Доведено технічну й економічну неспроможність застарілих методів регулювання технологічних параметрів за допомогою засобів механічного ковзання (фрикційних муфт) або гідродинамічного дроселювання (засувки на нагнітальних трубопроводах турбомеханізмів). Показано, що перевитрата енергії у цих режимах розсіюється у вигляді тепла. Впровадження безконтактного частотно-регульованого електропривода (ЧРП) змінного струму дозволяє плавно й безступінчасто керувати координатами двигуна, безпосередньо параметрами магнітного поля, забезпечуючи заощадження до 30–50% енергоресурсів у насосних та компресорних установках.

Запропоновано диференційований підхід до автоматизації пускових режимів в умовах обмежених інвестицій. Для агрегатів, що потребують глибокого регулювання, базовим рішенням визначено ЧРП із функцією рекуперації енергії в мережу. Для систем із вентиляторною характеристикою та обмеженим діапазоном

зміни швидкості (до 10%) економічно виправданою альтернативою є застосування тиристорних регуляторів напруги (ТРН) у колі статора. Капітальні витрати на ТРН в середньому вп'ятеро нижчі за ЧРП, при цьому забезпечується зниження пускових струмів, зменшення енергоспоживання на 3 – 6% та збільшення міжремонтного ресурсу обмоток у 2 – 3 рази.

Виконано інженерний розрахунок гранично допустимої частоти ввімкнень за годину на прикладі двигуна потужністю 7,5 кВт у повторно-короткочасному режимі S3. Доведено, що за умов прямого пуску від мережі частота обмежена тепловим навантаженням ізоляції. Застосування ЧРП із темпом наростання частоти для аналізованого привода – більше 0,21 с, мінімізує пусковий струм до навколономінальних значень, повністю знімає теплові обмеження та дозволяє інтенсифікувати технологічний цикл без загрози аварійного виходу електричної машини з ладу.

У рамках вирішення завдань електромагнітної сумісності (ЕМС) та мінімізації нелінійних спотворень в мережі 10 кВ (де коефіцієнт несинусоїдальності напруги через вентиляльні перетворювачі може сягати 10 – 15%) рекомендовано застосування 12-пульсних мостових схем або активних випрямлячів (Active Front End). Це дозволяє утримати показник $k_{нс}$ у межах нормативних 5%, оптимізувати баланс реактивної потужності та запобігти передчасному діелектричному старінню ізоляції трансформаторів і суміжних систем релейного захисту й автоматики.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне науково-технічне проектування та розроблено оптимальну систему електропостачання й енергозбереження ремонтно-механічного підприємства, що відповідає сучасним вимогам надійності, економічності та екологічності.

Проведено аналітичний розрахунок електричних навантажень для рівнів напруги 0,4 кВ та 10 кВ за методом упорядкованих діаграм, що дозволило визначити розрахункову активну, реактивну та повну потужність підприємства. На основі отриманих даних побудовано добові графіки активного й реактивного навантаження для зимового та літнього режимів роботи, а також інтегральний річний графік за тривалістю навантаження. Це дозволило детально оцінити динаміку енергоспоживання та виявити резерви пропускної здатності мережі.

Здійснено багатокритеріальне техніко-економічне порівняння альтернативних варіантів схем внутрішнього електропостачання. Доведено, що найбільш доцільним для умов об'єкта є побудова розподільчої мережі на напрузі 10 кВ із розгортанням на території підприємства центрального розподільчого пристрою (ЦРП) та реалізацією радіальної топології живлення. Для мінімізації втрат активної потужності в силових трансформаторах і лініях електропередачі розраховано та обґрунтовано параметри компенсуючих пристроїв – конденсаторних установок (КУ), які інтегровані на рівнях напруги 0,4 кВ та 10 кВ, що забезпечило підвищення коефіцієнта потужності до нормативного рівня .

Визначено структуру споживачів підприємства за ступенем надійності електропостачання, які переважно належать до II та III категорій. Оскільки перерва у живленні основних цехів призводить до масового недовипуску продукції та простою технологічних ліній, схему ЦРП та двотрансформаторних підстанцій (ТП) запроектовано з урахуванням секціонування шин і взаємного резервування. Встановлено, що оскільки завод функціонує у двосмінному

режимі, можливі технологічні збитки від обмежених у часі аварійних вимкнень можуть бути компенсовані інтенсифікацією виробництва у третю зміну або операційним маневруванням резервами потужності.

Складено повну схему заміщення системи електропостачання та проведено розрахунок струмів трифазного й двофазного короткого замикання (КЗ) у характерних точках мережі 10 кВ та 0,4 кВ. Отримані значення ударних струмів та струмів усталеного КЗ використано як базові критерії для вибору і перевірки на комутаційну здатність, термічну та динамічну стійкість високовольтних апаратів, комутаційного обладнання, шинопроводів та перерізів кабельних ліній.

У спеціальному науково-дослідному розділі розроблено та математично обґрунтовано комплексні заходи з енергозбереження у масовому асинхронному електроприводі підприємства. Виконано інженерні розрахунки енергетичних ефектів від заміни двигунів низьких класів ефективності на машини класів IE3/IE4, переходу до систем прямого привода та впровадження частотно-регульованих комплексів (ЧРП) та тиристорних регуляторів напруги (ТРН) у повторно-короткочасних режимах S3. Доведено, що оптимізація пускових та робочих координат АД знижує локальні втрати енергії в перехідних процесах, мінімізує негативний вплив вищих гармонік на мережу і забезпечує сумарне заощадження електричної енергії до 15 – 20% по підприємству в цілому, що безпосередньо знижує собівартість ремонтно-механічного виробництва.

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне науково-технічне проектування та розроблено оптимальну систему електропостачання й енергозбереження ремонтно-механічного підприємства, що відповідає сучасним вимогам надійності, економічності та екологічної безпеки.

Усі розрахунки, вибір обладнання та прийняті архітектурні рішення виконані на високому інженерно-технічному рівні із суворим дотриманням вимог **Правил улаштування електроустановок (ПУЕ)**, чинних державних будівельних норм (**ДБН**) та національних стандартів України (**ДСТУ / ISO**).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. А.Ю. Орлович, П.Г. Плешков, Т.В.Величко. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання. Навчальний посібник.-Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2009.
2. Б.Н.Неклепаев, И.П.Крючков. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Електропостачання промислових підприємств. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту (електропостачання заводу) для студентів V-VI курсів спеціальності 8.090603 „Електротехнічні системи електроспоживання” усіх форм навчання. – Кіровоград 2004.
4. Автоматизація контролю і управління якістю електроенергії: методичні вказівки для вивчення курсу “Автоматизація контролю і управління якістю електричної енергії” для студентів V-VI курсів спеціальності 8.090603 “Електротехнічні системи електроспоживання” / Укл.: канд. техн. наук, доц. П.Г. Плешков, канд. техн. наук, доц. А.Ю. Орлович, асистент О.А. Козловський. – Кіровоград: КДТУ, 2001 р. – 97 с.
5. Плешков П.Г., Орлович А.Ю., Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування. - Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2007.
6. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – К.: Кіровоградський Національний технічний університет, 2009. – 495 с.
7. <http://www.impexmash.com>
8. <https://kiroe.com.ua/>
