

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Проектування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ-23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Костянтин БОРДУН

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

_____ Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Бордуна Костянтина Євгеновича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства
металообробки та машинобудування

Design of a power supply system for a metalworking and mechanical
engineering enterprise

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 03.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи розрахунок електричних навантажень;
побудова графіків та картограми електричних навантажень; вибір напруги
і електричних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання;
розрахунок режимів реактивної потужності; вибір трансформаторів;
розрахунок струмів коротких замикань, вибір обладнання та силових мереж;
розрахунок спеціального розділу кваліфікаційної роботи

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Коротка характеристика підприємства</i>	<i>13.04-15.04</i>	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>16.04-23.04</i>	
3	<i>Побудова графіків електричних навантажень</i>	<i>24.04-26.04</i>	
4	<i>Побудова картограми електричних навантажень</i>	<i>27.04-01.05</i>	
5	<i>Вибір напруги і електричних схем</i>	<i>02.05-5.05</i>	
6	<i>Режими реактивної потужності</i>	<i>6.05-9.05</i>	
7	<i>Вибір трансформаторів</i>	<i>10.05-13.05</i>	
8	<i>Розрахунок струмів КЗ, вибір обладнання та силових мереж системи електропостачання</i>	<i>14.05-17.05</i>	
9	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>18.05-28.05</i>	
10	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.05-30.05</i>	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>01.06-03.06</i>	

Дата видачі завдання

«__13__» _квітня_2026 р.

Підпис керівника

Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання

«__13__» _квітня_2026 р.

Підпис здобувача

Костянтин БОРДУН

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 91 с.; 20 рис.; 33 табл.; 21 джерело

Бордун К.Є. Проектування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. – Рукопис.

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

У бакалаврській роботі розглянуто питання проектування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. Основною метою роботи є розробка надійної, економічно доцільної та технічно обґрунтованої системи електропостачання з урахуванням характеру виробничих навантажень, вимог до якості електроенергії та безперервності живлення споживачів.

У першому розділі виконано розрахунок електричних навантажень підприємства. Визначено силові та освітлювальні навантаження окремих цехів і підрозділів, розраховано сумарні активні, реактивні та повні навантаження на шинах 0,4 кВ і 10 кВ. На основі отриманих даних побудовано графіки електричних навантажень, що дозволило оцінити режими роботи підприємства протягом доби та року.

У роботі виконано побудову картограми електричних навантажень, за допомогою якої визначено центр електричних навантажень підприємства та обґрунтовано раціональне розміщення головної знижувальної підстанції і цехових трансформаторних підстанцій. Розглянуто можливі варіанти зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства, проведено їх техніко-економічне порівняння за капітальними вкладеннями, поточними витратами, вартістю втрат електроенергії та можливими збитками від перерв в електропостачанні.

Окрему увагу приділено компенсації реактивної потужності, вибору кількості, потужності та місць розташування компенсувальних пристроїв. Виконано вибір силових трансформаторів ГЗП та цехових ТП, перевірено їх

роботу в нормальному та післяаварійному режимах. Для забезпечення надійної роботи системи електропостачання розраховано струми короткого замикання, обрано кабельні лінії, високовольтні вимикачі, роз'єднувачі, обмежувачі перенапруги, трансформатори струму і напруги, а також обладнання власних потреб.

У спеціальному розділі досліджено режими роботи асинхронного двигуна на основі математичного моделювання. Розглянуто математичну модель двигуна, визначено її параметри, виконано структурне та імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

Отримані результати можуть бути використані для проєктування та модернізації систем електропостачання промислових підприємств із подібною структурою електричних навантажень.

Ключові слова: система електропостачання, електричні навантаження, моделювання асинхронного двигуна, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

Qualification work: 91 p.; Fig. 20; 33 tables; 21 sources

Bordun K.Y. Design of a power supply system for a metalworking and mechanical engineering enterprise. – Manuscript.

Bachelor's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". - Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The bachelor's thesis considers the design of the power supply system for a metalworking and machine-building enterprise. The main objective of the work is to develop a reliable, economically feasible, and technically justified power supply system, taking into account the nature of production loads, power quality requirements, and the continuity of power supply to consumers.

The first section presents the calculation of the enterprise's electrical loads. The power and lighting loads of individual workshops and departments are determined,

and the total active, reactive, and apparent loads on the 0.4 kV and 10 kV busbars are calculated. Based on the obtained data, electrical load curves are plotted, which makes it possible to evaluate the enterprise's operating modes throughout the day and year.

The work includes the development of an electrical load cartogram, which is used to determine the electrical load center of the enterprise and to justify the rational location of the main step-down substation and workshop transformer substations. Possible variants of the external and internal power supply system of the enterprise are considered, and their techno-economic comparison is carried out in terms of capital investments, operating costs, the cost of electrical energy losses, and possible losses caused by interruptions in power supply.

Special attention is paid to reactive power compensation, as well as to the selection of the number, capacity, and location of compensation devices. The selection of power transformers for the main step-down substation and workshop transformer substations is performed, and their operation under normal and post-emergency conditions is verified. To ensure reliable operation of the power supply system, short-circuit currents are calculated, and cable lines, high-voltage circuit breakers, disconnectors, surge arresters, current and voltage transformers, as well as auxiliary equipment are selected.

The special section investigates the operating modes of an induction motor based on mathematical modeling. The mathematical model of the motor is considered, its parameters are determined, and structural and simulation modeling is performed in the MATLAB/Simulink environment.

The obtained results can be used for the design and modernization of power supply systems for industrial enterprises with a similar structure of electrical loads.

Keywords: power supply system, electrical loads, induction motor modeling, MATLAB/Simulink.

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИХІДНІ ДАННІ ДО ПРОЄКТУВАННЯ.....	10
1. ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТА- ЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	13
1.1 Силові електричні навантаження підприємства металообробки та машинобудування в мережі 0,4 кВ.....	13
1.2 Освітлювальні навантаження підприємства.....	14
1.3 Електричні навантаження підприємства металообробки та машинобудування у мережах вище 1кВ.....	18
1.4 Побудова графіків електричних навантажень підприємства металообробки та машинобудування.....	24
2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПІДПРИЄМСТВА МЕТАЛООБРОБКИ ТА МАШИНО- БУДУВАННЯ ТА ВИБІР МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ГЗП.....	29
3. ВИБІР НАПРУГИ І СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	32
4. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	39
4.1 Баланс реактивної потужності підприємства металообробки та машинобудування та вибір пристроїв компенсації.....	39
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв підприємства.....	42
5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ, ПОТУЖНОСТІ ТА МІСЦЯ РОЗТАШУВАН- НЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ГЗП ТА ЦЕХОВИХ ПІДСТАНЦІЙ.....	44

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Бордун К.			Проектування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірів		Гарасьова Н.					7	91
Н. контр.						ЦНТУ, гр.ЕЕ-23мб		
Затвердив		Плещков П.						

5.1	Вибір кількості та потужності трансформаторів.....	44
5.2	Розташування та компоновка трансформаторних підстанцій підприємства металообробки та машинобудування.....	48
6.	РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПММ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ.....	50
6.1	Розрахунок струмів короткого замикання.....	50
6.2	Вибір високовольтних ліній для живлення цехових підстанцій....	55
6.3	Вибір високовольтної комутаційної та вимірювальної апаратури системи електропостачання.....	56
7.	ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ...	65
7.1	Математична модель АМ в нерухомій системі координат α - β	65
7.2	Розрахунок параметрів математичної моделі.....	67
7.3	Структурне моделювання асинхронного двигуна.....	72
7.4	Імітаційне моделювання АД в MATLAB/Simulink.....	81
	ВИСНОВКИ.....	88
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПММ – підприємство металообробки та машинобудування

ОН – освітлювальні навантаження

КТП – трансформаторна підстанція

ЦЕН – центр електричних навантажень

СЕП – система електропостачання

АС - алюмінієво-сталевий

АПВЕВ – алюмінієва струмопровідна жила (А); ізоляція жил із зшитого поліетилену (Пв); наявність екрану поверх ізоляції (Е); оболонка з полівінілхлоридного пластикату (В)

КЛ – кабельна лінія

КУ – конденсаторна установка

КРП – компенсація реактивної потужності

БСК – батареї статичних конденсаторів

КЕН – картограма електричних навантажень

ГЗП – головна знижувальна підстанція

КЗ – коротке замикання

ТС – трансформатори струму;

ТН – трансформатори напруги

АМ – асинхронна машина

MATLAB/Simulink - MATrix LABoratory (Матрична лабораторія)/ SIMUlation LINK (Канал моделювання)

АД з КЗ ротором – асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором

ДПС – двигун постійного струму

МХ – механічна характеристика

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИХІДНІ ДАННІ ДО ПРООЄКТУВАННЯ

У бакалаврській роботі розроблено систему електропостачання сучасного підприємства металообробки та машинобудування, що спеціалізується на виготовленні деталей машин, вузлів та металоконструкцій із застосуванням високотехнологічного обладнання та автоматизованих виробничих ліній.

До складу підприємства входять такі основні виробничі та допоміжні підрозділи:

- цех високоточної інструментальної обробки;
- цех штампування;
- механоскладальний виробничий комплекс;
- цех механообробки;
- складально-випробувальний корпус;
- дослідно-експериментальний виробничий центр.

Основні виробничі підрозділи обслуговуються службами головного енергетика та головного механіка, які забезпечують безперебійну роботу енергетичного та технологічного обладнання. До складу інфраструктури підприємства також входять насосна станція, котельня, випробувальна лабораторія, адміністративно-побутовий корпус, логістичні склади та допоміжні служби.

Технологічний процес підприємства включає послідовні етапи обробки металу: підготовку заготовок, механічну обробку (токарну, фрезерну, свердлильну), холодне штампування, термічну та поверхневу обробку, складання вузлів і агрегатів, а також контроль якості та випробування готової продукції. Значна частина операцій виконується із застосуванням сучасних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), автоматизованих виробничих ліній і роботизованих комплексів.

Основними струмоприймачами підприємства є електроприводи на базі асинхронних та синхронних двигунів, що використовуються для приводу еталорізальних верстатів, компресорів, насосів, вентиляторів та транспортних механізмів. Також значну частку навантаження складають електрозварювальні установки, високочастотні та інверторні перетворювачі, індукційні та електричні

						Арк.
						10

печі, системи електричного нагріву, вентиляції та кондиціювання повітря, а також освітлювальні установки.

Характерною особливістю електроспоживання підприємства є наявність значної кількості електроприймачів зі змінним графіком навантаження, імпульсним характером споживання та підвищеними пусковими струмами, що обумовлює необхідність детального аналізу режимів роботи системи електропостачання.

Вихідні дані по потужності електроприймачів основних та допоміжних підрозділах підприємства наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.1- Вихідні дані до розрахунку електричних навантажень підприємства.

№ п/п	Найменування підрозділів	Площа цеха,м ²	Кількість ЕП	Встановлена потужність ЕП,кВт	
				Одного	Сумарна
1	2	3	4	5	6
1	Механоскладальний виробничий цех	2520	148	0,37-100	2617,83
2	Цех споживчих товарів	828	46	3,5-32	410,2
3	Цех механообробки	7155	64	5,6-90	1425,3
4	Цех високоточної інструментальної обробки	2385	51	2,2-50	252,3
5	Цех штампування	5760	85	1,2-110	2958,12
6	Складально- випробувальний комплекс	7380	92	3,5-45	1436
7	Насосна станція	3780	21	5,5-80	1124,3
8	Випробувальна лабораторія	1089	21	0,45-22,5	191,6
9	Котельня	837	25	4,2-25	252
10	Адміністративно- побутовий корпус	918	27	0,4-7,5	61,5
11	Головний склад	4140	11	2,2-10,5	42,1
12	Дослідно- експериментальний цех	3168	91	3,5-45	531,6
	Всього		682	0,37-110	11302,9

Електропостачання підприємства здійснюється від енергосистеми по кабельних лініях напругою 10 кВ. На території підприємства встановлено чотири трансформаторні підстанції, які забезпечують розподіл електроенергії між виробничими та допоміжними споживачами. У роботі також розглянуто варіант підвищення рівня напруги живлення до 35 кВ із встановленням головної знижувальної підстанції (ГЗП), що дозволяє зменшити втрати електроенергії та підвищити надійність електропостачання.

Режим роботи підприємства - двозмінний, із можливими піковими навантаженнями у періоди інтенсивного виробництва. За ступенем надійності електропостачання більшість споживачів належить до другої категорії, що потребує забезпечення резервування живлення та застосування відповідних технічних рішень.

						Арк.
						12

1 ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Силіві електричні навантаження підприємства металообробки та машинобудування в мережі 0,4 кВ

Розрахунок електричних навантажень є одним із основних етапів проектування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. Від правильності визначення навантажень залежить вибір силових трансформаторів, перерізів кабельних ліній, комутаційно-захисної апаратури, а також надійність і економічність роботи всієї системи електропостачання.

Для визначення силових електричних навантажень у мережі напругою 0,4 кВ використовується метод упорядкованих діаграм [1, 4]. Даний метод дає змогу врахувати нерівномірність роботи електроприймачів, їхню встановлену потужність, режим роботи та коефіцієнти використання.

Вихідні дані для розрахунку приймаються згідно з таблицею 1. Для кожної групи електроприймачів визначаються такі основні показники: загальна кількість електроспоживачів у групі, мінімальна та максимальна номінальна потужність окремого електроприймача, а також сумарна встановлена потужність групи P_{Σ} .

Основною метою розрахунку є визначення середньозмінного активного навантаження $P_{с.зм}$ та середньозмінного реактивного навантаження $Q_{с.зм}$ для кожної групи електроприймачів. Отримані значення надалі використовуються для визначення розрахункових навантажень цехів, вибору елементів електричної мережі та оцінки режимів роботи системи електропостачання підприємства. Як приклад виконаємо розрахунок електричних навантажень для цеху споживчих товарів (ЦСП).

Для цього цеху кількість електроприймачів становить $n_{ел}=46$ шт.; номінальна потужність найбільшого електроприймача дорівнює $P_{н.мах}=32,0$ кВт, найменшого - $P_{н.мін}=3,5$ кВт. Сумарна встановлена потужність електроприймачів цеху становить $P_{\Sigma}=410,2$ кВт.

						Арк.
						13

$$P_{3M\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{3Mi} = 87,26 \text{ кВт}; \quad Q_{3M\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{3Mi} = 125,3 \text{ квар};$$

$$K_B = \frac{P_{3M\Sigma}}{P_{H\Sigma}} = \frac{87,26}{410,2} = 0,21;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_{3M\Sigma}}{P_{3M\Sigma}} = \frac{125,3}{87,26} = 1,44; \quad \cos \varphi = 0,57;$$

$$m = \frac{P_{H.\max}}{P_{H.\min}} = \frac{32}{3,5} = 9,14$$

$$n_{ef} = \frac{2P_{H\Sigma}}{P_{H.\max}} = \frac{2 \cdot 410,2}{32} = 25,6.$$

Для подальших розрахунків приймаємо: $n_{ef}=26$; $K_M=1,15$.

На основі отриманих значень визначаємо розрахункові активне, реактивне та повне навантаження цеху:

$$P_p = K_M \cdot P_{3Mi} = 1,15 \cdot 87,26 = 100,35 \text{ кВт};$$

$$Q_p = Q_{3Mi} = 125,3 \text{ квар};$$

$$S_{p.} = \sqrt{P_{p.}^2 + Q_{p.}^2} = \sqrt{100,35^2 + 125,3^2} = 160,53 \text{ кВА}.$$

Аналогічним способом виконуються розрахунки електричних навантажень для інших виробничих підрозділів та всього підприємства. (таблиця 1.1).

1.2 Освітлювальні навантаження підприємства

Розрахунок освітлювальних навантажень є важливим етапом визначення загального електричного навантаження підприємства металообробки та машинобудування. Освітлювальні установки забезпечують необхідні умови праці у виробничих, складських, адміністративних та допоміжних приміщеннях, тому їх потужність необхідно враховувати під час проєктування системи електропостачання.

Визначення освітлювальних навантажень окремих підрозділів підприємства виконується методом питомої потужності освітлення. Даний метод базується на

						Арк.
						14

Таблиця 1.1-Розрахунок електричних навантажень ЗММ в мережі до 1000 В

№	Найменування підрозділу	$n_{\text{еп}}$	Номинальна потужність ЕП, кВт		m	K_B	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	Середньозмінне навантаження		$n_{\text{эф}}$	K_M	Розрахункове навантаження		
			Одного ЕП	P_{Σ}					$P_{\text{с.зм}}$	$Q_{\text{с.зм}}$			P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
1	Механоскладальний виробничий цех	148	0,37-100	2617,83	>3	0,34	0,55	1,51	895,65	1356,2	52	1	895,65	1356,20	1625,26
2	Цех споживчих товарів	46	3,5-32	410,2	>3	0,21	0,57	1,44	87,26	125,3	26	1,15	100,35	125,30	160,53
3	Цех механообробки	64	5,6-90	1425,3	>3	0,49	0,73	0,95	694,81	656,8	29	1	694,81	656,80	956,11
4	Цех високоточної інструмент. обробки	51	2,2-50	252,3	>3	0,34	0,68	1,07	85,16	91,25	42	1	85,16	91,25	124,82
5	Цех штампування	85	1,2-110	2958,12	>3	0,38	0,67	1,12	1115,60	1246,56	54	1	1115,60	1246,56	1672,86
6	Складально-випробувальний комплекс	92	3,5-45	1436	>3	0,31	0,69	1,03	442,2	456,8	64	1	442,20	456,80	635,77
7	Насосна станція	21	5,5-80	1124,3	>3	0,52	0,76	0,86	582,4	498,6	28	1	582,40	498,60	766,68
8	Випробувальна лабораторія	21	0,45-22,5	191,6	>3	0,58	0,75	0,89	110,5	97,8	17	1	110,50	97,80	147,56
9	Котельня	25	4,2-25	252	>3	0,42	0,70	1,02	105,2	107,56	20	1	105,20	107,56	150,45
10	Адміністративно-побутовий корпус	27	0,4-7,5	61,5	>3	0,45	0,76	0,85	27,6	23,58	17	1	27,60	23,58	36,30
11	Головний склад	11	2,2-10,5	42,1	>3	0,56	0,76	0,86	23,45	20,15	11	1,04	24,39	20,15	31,64
12	Дослідно-експериментальний цех	91	3,5-45	531,6	>3	0,44	0,76	0,87	231,8	201,3	23	1	231,80	201,30	307,01
	Разом силове 0,4 кВ	682	0,37-110	11302,9	>3	0,39	0,67	1,11	4401,63	4881,9	210	1	4401,63	4881,90	6573,23
	освітлювальне												666,14	225,16	
	Всього на шинах 0,4 кВ												5067,77	5107,06	7194,74

використанні нормативних значень питомого освітлювального навантаження, що припадає на 1 м² площі приміщення. Значення питомої потужності приймається залежно від призначення приміщення, характеру виконуваних робіт та вимог до рівня освітленості [3].

Застосування методу питомої потужності є доцільним на стадії проектування, коли точна кількість, тип і потужність освітлювальних приладів ще не визначені остаточно. Такий підхід дає змогу попередньо оцінити електричне навантаження системи освітлення та врахувати його під час розрахунку сумарного навантаження на шинах 0,4 кВ.

Активне розрахункове навантаження освітлювальної мережі для кожного підрозділу визначається за площею приміщення та питомою потужністю освітлення. Наприклад, для цеху споживчих товарів розрахунок виконується за відповідною методикою:

$$P_{p.o.} = P_{в.} \cdot K_1 \cdot K_n = 14,904 \cdot 1,12 \cdot 0,9 = 15,023 \text{ кВт},$$

де $P_{в.о.цст.} = F_{цст} \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 828 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 14,904$ кВт – встановлена потужність освітлювальної установки приміщення, $F_{цст} = 828$ м² – площа цеху СТ; $p_0 = 18$ Вт/м² – питома потужність освітлення; $K_1 = 1,12$ – коефіцієнт, що враховує втрати у пускорегулювальній апаратурі; $K_n = 0,9$ – коефіцієнт попиту освітлювального навантаження.

Реактивна складова навантаження системи освітлення визначається за значенням коефіцієнта реактивної потужності:

$$Q_{p.o.} = P_{p.o.} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 15,023 \cdot 0,33 = 4,938 \text{ квар.}$$

Повне розрахункове ОН мережі ЦСТ:

$$S_{p.o.} = \sqrt{P_{p.o.}^2 + Q_{p.o.}^2} = \sqrt{15,023^2 + 4,938^2} = 15,81 \text{ кВА.}$$

Аналогічні розрахунки виконуються для інших виробничих та допоміжних приміщень підприємства металообробки та машинобудування. Результати розрахунку освітлювальних навантажень наведено в таблиці 1.2.

						Арк.
						16

Таблиця 1.2 - Розрахунок освітлювальних навантажень підприємства металообробки та машинобудування

№	Найменування підрозділу	$F, \text{м}^2$	$P_0, \text{Вт/м}^2$	$P_{\text{в.о.}}, \text{кВт}$	K_1	$K_{\text{п}}$	$\cos\varphi / \tan\varphi$	$P_{\text{р.о.}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{р.о.}}, \text{квар}$	$S_{\text{р.о.}}, \text{кВА}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Механоскладальний виробничий цех	2520	18	45,36	1,12	0,9	0,95/0,33	45,723	15,028	48,13
2	Цех споживчих товарів	828	18	14,904	1,12	0,9	0,95/0,33	15,023	4,938	15,81
3	Цех механообробки	7155	18	128,79	1,12	0,9	0,95/0,33	129,820	42,670	136,65
4	Цех високоточної інструментальної обробки	2385	18	42,93	1,12	0,9	0,95/0,33	43,273	14,223	45,55
5	Цех штампування	5760	18	103,68	1,12	0,95	0,95/0,33	110,316	36,259	116,12
6	Складально-випробувальний комплекс	7380	18	132,84	1,12	0,9	0,95/0,33	133,903	44,012	140,95
7	Насосна станція	3780	14	52,92	1,12	0,85	0,95/0,33	50,380	16,559	53,03
8	Випробувальна лабораторія	1089	20	21,78	1,2	0,8	0,95/0,33	20,909	6,872	22,01
9	Котельня	837	14	11,718	1,12	0,9	0,95/0,33	11,812	3,882	12,43
10	Адміністративно-побутовий корпус	918	20	18,36	1,2	0,8	0,9/0,48	17,626	8,536	19,58
11	Головний склад	4140	8	33,12	1,12	0,6	0,9/0,48	22,257	10,779	24,73
12	Дослідно-експериментальний цех	3168	18	57,024	1,12	0,9	0,95/0,33	57,480	18,893	60,51
13	Територія заводу	68000	0,1	6,8	1,12	1	0,95/0,33	7,616	2,503	8,02
14	Всього			670,226				666,137	225,156	703,16

1.3 Електричні навантаження підприємства металообробки та машинобудування у мережах вище 1кВ

Для попередньої оцінки кількості трансформаторів приймаємо до встановлення силові трансформатори номінальною потужністю $S_n=1000$ кВА. Орієнтовна кількість трансформаторів визначається з урахуванням розрахункового активного навантаження підприємства та допустимого коефіцієнта завантаження [1]:

$$N_0 = P_{p.n} / (K_z \cdot S_n) = 5067,77 / (0,7 \cdot 1000) = 7,24 \text{ шт.}$$

За результатами попереднього розрахунку до встановлення приймаємо вісім трансформаторів потужністю 1000 кВА кожен. З урахуванням структури електропостачання підприємства передбачається встановлення чотирьох двотрансформаторних комплектних трансформаторних підстанцій. Вибір кількості, потужності та місць розташування КТП обґрунтовується у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

Визначення електричних навантажень на стороні вище 1 кВ (P_p) для ТП-1 підприємства металообробки та машинобудування виконується за наведеною вище методикою. При цьому враховуються силові та освітлювальні навантаження відповідних споживачів:

$$P_{\text{сум.}} = P_p + P_o = 1072,35 + 60,75 = 1133,10 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{сум.}} = Q_p + Q_o = 1481,50 + 19,97 = 1501,47 \text{ квар.}$$

$$Q_{\Sigma.ky} = Q_{\text{сум.}} - Q_{ky} = 1501,47 - 600 = 901,47 \text{ квар};$$

$$S_{\Sigma.ky} = \sqrt{P_{\Sigma.}^2 + Q_{\Sigma.ky}^2} = \sqrt{1133,10^2 + 901,47^2} = 1447,95 \text{ кВА.}$$

Коефіцієнт завантаження трансформаторів ТП-1 визначається як відношення повного навантаження з урахуванням компенсації реактивної потужності до сумарної номінальної потужності встановлених трансформаторів:

$$k_{z.kmn1} = \frac{S_{\Sigma.ky}}{n \cdot S_{n.mpr.}} = \frac{1447,95}{2 \cdot 1000} = 0,724.$$

						Арк.
						18

Втрати потужності в трансформаторах ТП-1:

$$\Delta P_{\text{ТП1}} = n(\Delta P_X + \Delta P_K \cdot K_3^2) = 2 \cdot (0,77 + 10,5 \cdot 0,724^2) = 12,55 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{\text{ТП1}} = n \left(\frac{I_X}{100} S_H + \frac{U_K}{100} S_H \cdot K_3^2 \right) = 2 \cdot \left(\frac{1,2}{100} \cdot 1000 + \frac{6}{100} \cdot 1000 \cdot 0,724^2 \right) = 86,90 \text{ квар.}$$

Розрахункове навантаження ТП-1 на стороні 10 кВ становить::

$$P_{\text{р.10кВ}} = P_{\text{сум.}} + \Delta P_{\text{ТП1}} = 1133,10 + 12,55 = 1145,65 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{р.10кВ}} = Q_{\text{сум.кв}} + \Delta Q_{\text{ТП1}} = 901,47 + 86,90 = 988,36 \text{ квар},$$

$$S_{\text{сум.ТП1}} = \sqrt{P_{\text{р.тп1}}^2 + Q_{\text{р.тп1}}^2} = \sqrt{1145,65^2 + 988,36^2} = 1513,07 \text{ кВА}$$

Аналогічно виконуються розрахунки для інших трансформаторних підстанцій підприємства.

Узагальнені результати розрахунку електричних навантажень у мережі 10 кВ наведено в таблиці 1.3.

Таким чином, у розділі виконано розрахунок електричних навантажень підприємства металообробки та машинобудування у мережах напругою вище 1 кВ. Визначено сумарні активні, реактивні та повні навантаження з урахуванням освітлювальної складової, компенсації реактивної потужності та втрат у силових трансформаторах. Отримані результати є основою для подальшого вибору трансформаторів, кабельних ліній, комутаційно-захисної апаратури та перевірки надійності роботи системи електропостачання підприємства.

						Арк.
						19

Таблиця 1.3 - Електричні навантаження підприємства у мережах напругою вище 1 кВ

№	Найменування	n	Потужність ЕП, кВт		m	K _B	cos φ	tg φ	Середнє навантаження		n _{еф}	K _M	Розрахункове навантаження,		
			одного	всього					P _{CM}	Q _{CM}			P _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	ТП- 1 3ММ														
1.1	Механоскладальний виробничий цех														
	силове	148	0,37-100	2617,83	>3	0,34	0,55	1,51	895,65	1356,2	52	1	895,65	1356,20	1625,26
	освітлювальне												45,72	15,03	
	Всього по котельні												941,37	1371,23	1663,26
1.2	Цех споживчих товарів														
	силове	46	3,5-32	410,2	>3	0,21	0,57	1,44	87,26	125,3	26	1,15	100,35	125,30	160,53
	освітлювальне												15,02	4,94	
	Всього по цеху												115,37	130,24	173,99
	Разом														
	силове	194	0,37-100	3028,03		0,32	0,55	1,51	982,91	1481,5	92	1,091	1072,35	1481,50	1828,88
	освітлювальне												60,75	19,97	
	Всього на шинах 0,4 кВ												1133,10	1501,47	1881,04
	КУ 0,4 кВ ТП-1													-600,00	
	З урахуванням КУ												1133,10	901,47	1447,95
	Втрати в трансфор-рах												12,55	86,90	
	Всього на шинах 10 кВ												1145,65	988,36	1513,07
	ТП- 2 3ММ														
2.1	Цех високоточної інструмент. обробки														
	силове	51	2,2-50	252,3		0,34	0,68	1,07	85,16	91,25	42	1	85,16	91,25	124,815
	освітлювальне												43,27	14,22	
	Всього по цеху												128,4334	105,4733	166,191
2.2	Цех штампування														
	силове	85	1,2-110	2958,12		0,38	0,67	1,12	1115,60	1246,56	54	1	1115,60	1371,22	1767,71
	освітлювальне												110,32	36,26	
	Всього по цеху												1225,92	1407,47	1866,51

Продовження таблиці 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Разом														
	силове	136	1,2-110	3210,42		0,374	0,668	1,114	1200,76	1337,8	140	1	1200,76	1337,81	1797,65
	освітлювальне												153,59	50,48	
	Всього на шинах 0,4 кВ												1354,35	1388,29	1939,49
	КУ 0,4 кВ ТП-2													-850,00	
	З урахуванням КУ												1354,35	538,29	1457,40
	Втрати в трансформаторах												11,17	79,03	
	Всього на шинах 10 кВ ТП2												1365,52	617,32	1498,57
	ТП- 3 ЗММ														
3.1	Складально-випробувальний комплекс														
	силове	92	3,5-45	1436		0,308	0,696	1,03	442,2	456,8	64	1	442,20	456,80	635,77
	освітлювальне												133,90	44,01	
	Всього по комплексу												576,10	500,81	763,35
3.2	Насосна станція														
	силове	21	5,5-80	1124,3		0,518	0,76	0,86	582,4	498,6	28	1	582,40	498,60	766,68
	освітлювальне												50,38	16,56	
	Всього по станції												632,78	515,16	815,97
3.3	Випробувальна лабор.														
	силове	21	0,45-22,5	191,6		0,577	0,749	0,89	110,5	97,8	17	1	110,50	97,80	147,56
	освітлювальне												20,91	6,87	
	Всього по лабораторії												131,41	104,67	168,00
	Разом														
	силове	134	0,45-80	2751,9		0,412	0,733	0,93	1135,1	1053,2	52	1	1135,10	1053,20	1548,45
	освітлювальне												205,19	67,44	
	Всього на шинах 0,4 кВ												1340,29	1120,64	1747,06
	КУ 0,4 кВ ТП-3													-700,00	
	З урахуванням КУ												1340,29	420,64	1404,75
	Втрати в трансформаторах												11,90	83,20	

Продовження таблиці 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Всього на шинах 10 кВ ТПЗ														
	ТП- 4 ЗММ														
4.1	Цех механообробки														
	силове	64	5,6-90	1425,3		0,487	0,727	0,95	694,81	656,8	29	1	694,81	656,80	956,11
	освітлювальне												129,82	42,67	
	Всього по цеху												824,63	699,47	1081,33
4.2	Дослідно- експериментальний цех														
	силове	91	3,5-45	531,6		0,436	0,755	0,87	231,8	201,3	23	1	231,80	201,30	307,01
	освітлювальне												57,48	18,89	
	Всього по цеху												289,28	220,19	363,55
4.3	Головний склад														
	силове	11	2,2-10,5	42,1		0,557	0,758	0,86	23,45	20,15	11	1,04	24,39	20,15	31,64
	освітлювальне												22,26	10,78	
	Всього по цеху												46,64	30,93	55,97
4.4	Адміністративно- побутовий корпус														
	силове	27	0,4-7,5	61,5		0,449	0,76	0,85	27,6	23,58	17	1	27,60	23,58	36,30
	освітлювальне												17,63	8,54	
	Всього по цеху												45,23	32,12	55,47
4.5	Котельня														
	силове	25	4,2-25	252	0	0,622	0,75	0,88	105,2	107,56	20	1	105,20	107,56	150,45
	освітлювальне												11,81	3,88	
	Всього по цеху												117,01	111,44	161,59
4.6	Освітлення території												7,62	2,50	
	Разом														
	силове	218	0,45-90	2312,5		0,468	0,731	0,93	1082,86	1009,4	48	1	1082,86	1009,39	1480,36
	освітлювальне												246,61	87,26	
	Всього на шинах 0,4 кВ												1329,47	1096,65	1723,41
	КУ 0,4 кВ ТП-4													-600,00	
	З урахуванням КУ												1329,47	496,65	1419,21

Продовження таблиці 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Втрати в трансформаторах												12,11	84,42	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-4												1341,58	581,08	1462,02
	Всього по заводу ЗММ														
	силове	682	0,37-110	11302,9	>3	0,39	0,67	1,11	4401,63	4881,9	210	1	4401,63	4881,90	6573,23
	освітлювальне												666,14	225,16	
	Всього на шинах 0,4 кВ												5067,77	5107,06	7194,74
	Втрати в трансформаторах												47,73	333,55	
	З врахуванням втрат												5115,50	5440,60	7467,83
	КУ 0,4 кВ													-2750,00	
	З врахуванням КУ 0,4 кВ												5115,50	2690,60	5779,94
	КУ 10 кВ													-2000	
	Всього на шинах 10 кВ ЗММ												5115,50	690,60	5161,90

1.4 Побудова графіків електричних навантажень підприємства металообробки та машинобудування

Режими роботи електроприймачів підприємства змінюються протягом доби, тижня та року, що зумовлює зміну навантаження окремих елементів системи електропостачання. Для аналізу цих змін використовують графіки електричних навантажень, на яких по осі ординат відкладають значення активної, реактивної або повної потужності, а по осі абсцис - час дії відповідного навантаження.

У бакалаврській роботі передбачено побудову графіків активного та реактивного навантаження для зимового і літнього періодів, робочих та вихідних днів, а також річних графіків навантаження за тривалістю. Графіки реактивної потужності будуються з урахуванням компенсації реактивної потужності.

Для побудови графіків використовуються розрахункові значення активної та реактивної потужності на шинах 10 кВ. Під час формування літніх графіків значення активного і реактивного навантаження зменшуються на 15 %, що враховує сезонне зниження електроспоживання.

Графіки активного та реактивного навантаження за тривалістю формуються на основі добових графіків. Тривалість зимового періоду приймається 147 діб, літнього -105 діб. Кількість вихідних днів відповідно становить 65 та 48 діб.

Вихідні дані для побудови графіків електричних навантажень наведено в таблицях 1.4–1.5, а побудовані графіки представлено на рисунках 1.1–1.3.

Таблиця 1.4 – Дані для побудови добових графіків по активній потужності

t,год	Qз,%	Qз,квар	Qл,%	Qл,квар	Qз,%	Qз,квар	Qл,%	Qл,квар
	Робочий день				Вихідний день			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0-1	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
1- 2	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
2-3	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
3-4	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
4-5	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
5-6	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
6-7	64	3273,92	54,4	2782,83	30	1534,65	25,5	1304,45

7-8	94	4808,57	79,9	4087,28	30	1534,65	25,5	1304,45
8-9	100	5115,5	85	4348,18	26	1330,03	22,1	1130,53
9-10	94	4808,57	79,9	4087,28	26	1330,03	22,1	1130,53
10-11	75	3836,63	63,75	3261,13	26	1330,03	22,1	1130,53
11-12	70	3580,85	59,5	3043,72	26	1330,03	22,1	1130,53
12-13	94	4808,57	79,9	4087,28	26	1330,03	22,1	1130,53
13-14	85	4348,18	72,25	3695,95	26	1330,03	22,1	1130,53
14-15	80	4092,4	68	3478,54	26	1330,03	22,1	1130,53
15-16	75	3836,63	63,75	3261,13	26	1330,03	22,1	1130,53
16-17	84	4297,02	71,4	3652,47	26	1330,03	22,1	1130,53
17-18	84	4297,02	71,4	3652,47	30	1534,65	25,5	1304,45
18-19	71	3632,01	60,35	3087,2	30	1534,65	25,5	1304,45
19-20	71	3632,01	60,35	3087,2	30	1534,65	25,5	1304,45
20-21	60	3069,3	51	2608,91	30	1534,65	25,5	1304,45
21-22	60	3069,3	51	2608,91	30	1534,65	25,5	1304,45
22-23	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
23-24	34	1739,27	28,9	1478,38	30	1534,65	25,5	1304,45
		78420,6		66657,5		34990		29741,5

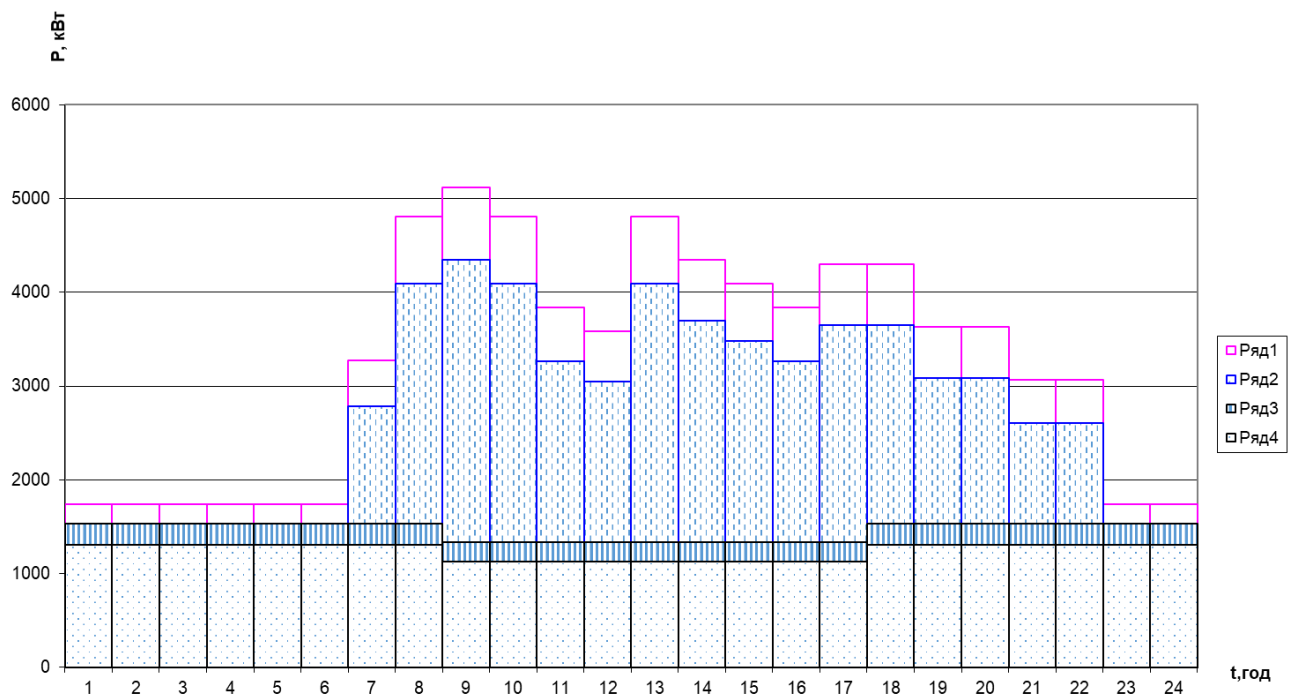


Рис. 1.1 - Добові графіки активної потужності ПММ:1,2- робочі зимового та літнього періоду; 3,4- вихідні зимового та літнього періоду

Таблиця 1.5 – Дані для побудови добових графіків по РП (з врахуванням компенсації)

t,год	Qз,%	Qз,квар	Qл,%	Qл,квар	Qз,%	Qз,квар	Qл,%	Qл,квар
	Робочий день				Вихідний день			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0-1	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
1-2	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
2-3	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
3-4	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
4-5	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
5-6	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
6-7	68	469,608	57,8	399,167	32	220,992	27,2	187,843
7-8	96	662,976	81,6	563,53	32	220,992	27,2	187,843
8-9	100	690,6	85	587,01	28	193,368	23,8	164,363
9-10	96	662,976	81,6	563,53	28	193,368	23,8	164,363
10-11	77	531,762	65,45	451,998	28	193,368	23,8	164,363
11-12	72	497,232	61,2	422,647	28	193,368	23,8	164,363
12-13	94	649,164	79,9	551,789	28	193,368	23,8	164,363
13-14	90	621,54	76,5	528,309	28	193,368	23,8	164,363
14-15	77	531,762	65,45	451,998	28	193,368	23,8	164,363
15-16	77	531,762	65,45	451,998	28	193,368	23,8	164,363
16-17	84	580,104	71,4	493,088	28	193,368	23,8	164,363
17-18	84	580,104	71,4	493,088	32	220,992	27,2	187,843
18-19	74	511,044	62,9	434,387	32	220,992	27,2	187,843
19-20	74	511,044	62,9	434,387	32	220,992	27,2	187,843
20-21	60	414,36	51	352,206	32	220,992	27,2	187,843
21-22	60	414,36	51	352,206	32	220,992	27,2	187,843
22-23	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
23-24	37	255,522	31,45	217,194	32	220,992	27,2	187,843
		10904,6		9268,89		5055,19		4296,91

За річними графіками навантаження визначаються основні енергетичні показники:

- річне споживання активної електроенергії (W_p);
- річне споживання реактивної електроенергії (V_p);
- час використання максимуму навантаження (T_m);
- час максимальних втрат (τ).

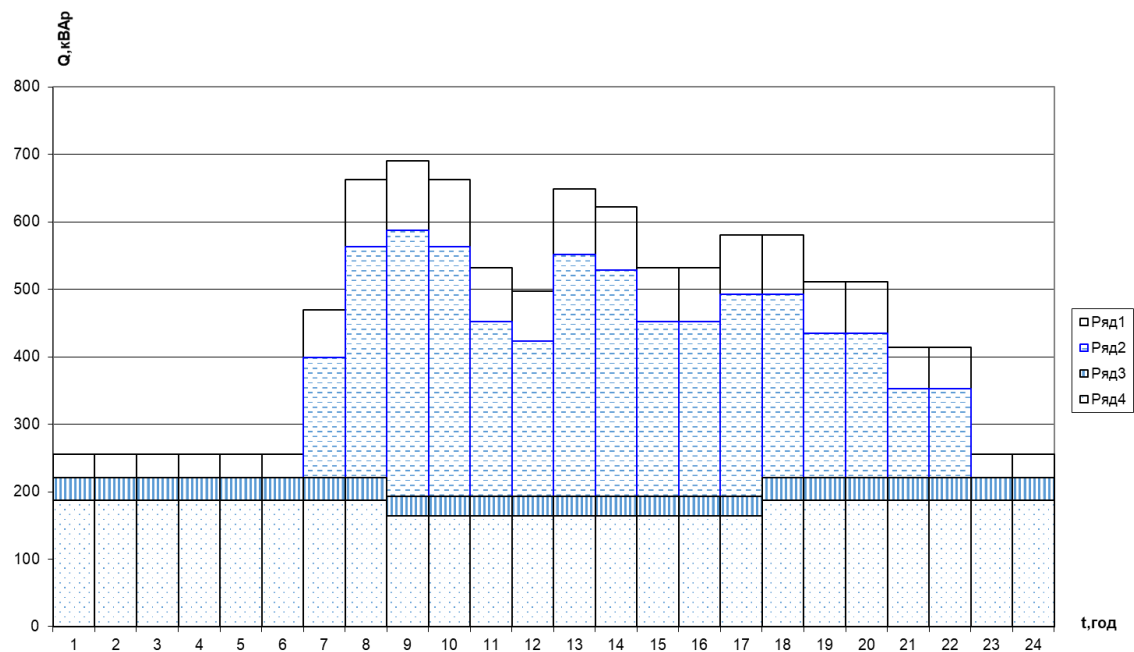


Рис. 1.2 - Добові графіки реактивної потужності ПММ:1,2- робочі зимового та літнього періоду; 3,4- вихідні зимового та літнього періоду (з компенсацією)

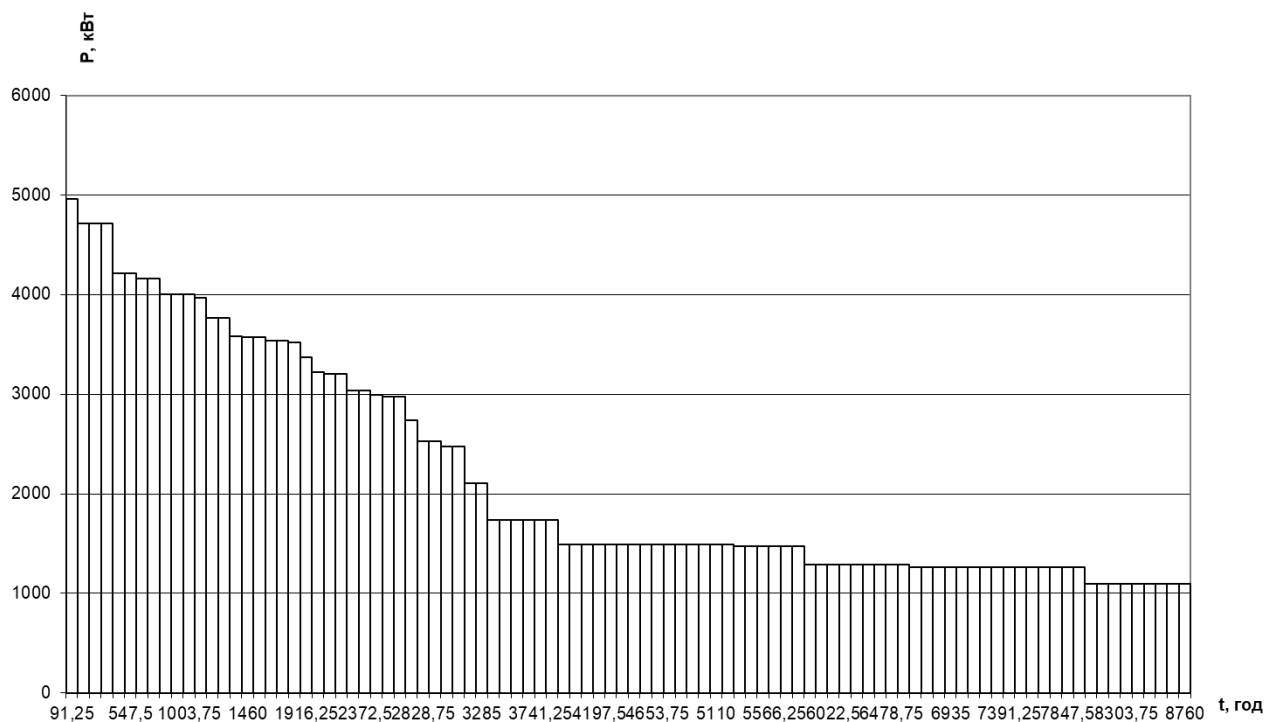


Рис. 1.3 - Річний графік за тривалістю по активній потужності

$$W_p = \sum (P_i \cdot t_i) = 78420,6 \cdot 147 + 66657,5 \cdot 105 + 34990 \cdot 65 + 29741,5 \cdot 48 = 22228814,41 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$V_p = \Sigma (Q_i \cdot t_i) = 10904,6 \cdot 147 + 9268,89 \cdot 105 + 5055,19 \cdot 65 + 4296,91 \cdot 48 =$$

$$= 3238351,93 \text{ квар} \cdot \text{год.}$$

$$T_M = \frac{\sqrt{W_p^2 + V_p^2}}{S_p} = \frac{\sqrt{(22228814,41^2 + 3238351,93^2)}}{5161,90} = 4351,78 \text{ год.}$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{4351,78}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 2739,08 \text{ год.}$$

У розділі виконано побудову добових графіків активного та реактивного навантаження підприємства металообробки та машинобудування, а також річного графіка навантаження за тривалістю. Отримані графіки дають змогу проаналізувати зміну електроспоживання протягом доби та року, визначити характерні режими роботи підприємства і встановити періоди максимального навантаження.

Результати розрахунків і побудови графіків можуть бути використані для раціонального вибору силових трансформаторів, кабельних ліній, комутаційно-захисної апаратури та пристроїв компенсації реактивної потужності. Це дозволяє підвищити надійність, економічність та ефективність роботи системи електропостачання підприємства.

						Арк.
						28

2 КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПІДПРИЄМСТВА МЕТАЛООБРОБКИ ТА МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ВИБІР МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ГЗП

Картограма електричних навантажень є графічним відображенням розподілу розрахункових активних навантажень по території підприємства металообробки та машинобудування. Її побудова є важливим етапом проєктування системи електропостачання, оскільки дозволяє врахувати територіальне розміщення виробничих, складських, адміністративних та допоміжних підрозділів.

Використання картограми дає змогу наочно оцінити розташування основних центрів електроспоживання, визначити характер розподілу навантажень між окремими цехами та встановити найбільш навантажені ділянки підприємства. Це особливо важливо для промислових об'єктів із великою кількістю електроприймачів і значною площею забудови.

На основі аналізу картограми електричних навантажень обґрунтовують вибір кількості трансформаторних підстанцій, місця їх розташування, а також доцільне розміщення головної знижувальної підстанції. При цьому враховують густину електричних навантажень, прагнення до зменшення довжини кабельних ліній, зниження втрат електричної енергії та забезпечення необхідної надійності електропостачання споживачів.

Під час побудови картограми для кожного підрозділу підприємства визначаються радіуси кіл, площа яких пропорційна величині розрахункового навантаження. Також виділяються сектори, що відповідають частці освітлювального навантаження у загальному навантаженні відповідного об'єкта. Такий підхід дозволяє графічно відобразити співвідношення силових та освітлювальних навантажень окремих цехів і виробничих ділянок. Як приклад розглянемо побудову картограми електричних навантажень для цеху споживчих товарів:

						Арк.
						29
.						

$$R_{\text{цст}} = \sqrt{\frac{P_{\text{р.цст}} + P_{\text{о.цст}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{100,35 + 15,02}{\pi \cdot 10}} = 1,92 \text{ см},$$

де m - масштаб побудови картограми.

Кут сектора α , що відображає частку освітлювального навантаження у загальному навантаженні відповідного підрозділу, визначається за формулою:

$$\alpha_{\text{цст}} = \frac{360 \cdot P_{\text{о.цст}}}{P_{\text{р.цст}} + P_{\text{о.цст}}} = \frac{360 \cdot 15,02}{100,35 + 15,02} = 46,88^\circ.$$

Для інших виробничих, складських та адміністративно-побутових підрозділів підприємства розрахунки виконуються аналогічно. Отримані результати подаються у зведеній таблиці 2.1.

Наступним етапом є визначення координат центру електричних навантажень підприємства металообробки та машинобудування:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n X_i} = \frac{1089586,25}{5074,18} = 214,73 \text{ м};$$

$$Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} = \frac{955604,77}{5074,18} = 188,33 \text{ м}.$$

де X_i та Y_i – розрахункові координати окремих підрозділів.

Побудована картограма електричних навантажень дозволяє наочно оцінити розміщення основних споживачів електроенергії на території підприємства та визначити центр електричних навантажень. Це дає змогу обґрунтувати раціональне місце розташування головної знижувальної підстанції і трансформаторних підстанцій, скоротити довжину кабельних ліній, зменшити втрати електроенергії та забезпечити надійне електропостачання всіх підрозділів підприємства.

						Арк.
						30

Таблиця 2.1 - Дані для побудови картограми електричних навантажень ПММ

п/п	Назва підрозділу	P_p , кВт	$P_{p.o.}$, кВт	P_{Σ} , кВт	X , м	Y , м	α	R , см	$P_{\Sigma} \cdot X$, кВт·м	$P_{\Sigma} \cdot Y$, кВт·м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Механоскладальний виробничий цех	895,65	45,72	941,37	92	310	17,49	5,48	86606,30	291825,59
2	Цех споживчих товарів	100,35	15,02	115,37	105	280	46,88	1,92	12114,08	32304,22
3	Цех механообробки	694,81	129,82	824,63	140	52	56,67	5,12	115448,24	42880,78
4	Цех високоточної інструментальної обробки	85,16	43,27	128,43	350	242	121,30	2,02	44951,70	31080,89
5	Цех штампування	1115,60	110,32	1225,92	450	230	32,40	6,25	551661,98	281960,57
6	Складально-випробувальний цех	442,20	133,903	576,103	220	180	83,67	4,28	126742,60	103698,49
7	Насосна станція	582,40	50,38	632,78	105	186	28,66	4,49	66441,88	117697,05
8	Випробувальна лабораторія	110,50	20,91	131,41	32	176	57,28	2,05	4205,08	23127,95
9	Котельня	105,20	11,811	117,011	360	95	36,34	1,93	42124,23	11116,12
10	Адміністративно-побутовий корпус	27,60	17,63	45,23	405	52	140,30	1,20	18316,37	2351,73
11	Головний склад	24,39	22,26	46,65	276	54	171,78	1,22	12873,92	2518,81
12	Дослідно-експериментальний цех	231,80	57,48	289,28	28	52	71,53	3,04	8099,85	15042,57
13	Всього			5074,18					1089586,25	955604,77

3 ВИБІР НАПРУГИ І СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Правильний вибір напруги та схеми електропостачання є одним із основних етапів проектування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. Від цього залежить надійність, економічність та ефективність роботи всієї електричної мережі.

Під час вибору напруги і схеми живлення враховуються розрахункове навантаження підприємства, напруга можливих джерел живлення, відстань до точки приєднання, категорія надійності електропостачання та техніко-економічні показники можливих варіантів.

У бакалаврській роботі доцільно розглянути декілька можливих варіантів зовнішнього електропостачання залежно від наявних джерел живлення. Остаточне рішення приймається на основі порівняння зведених витрат, які враховують капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, вартість втрат електроенергії та можливі збитки від перерв в електропостачанні.

Зведені витрати для кожного варіанта визначаються за виразом:

$$Z_i = E_n \cdot K_i + C_i + C_{\text{втр}} + Y_i.$$

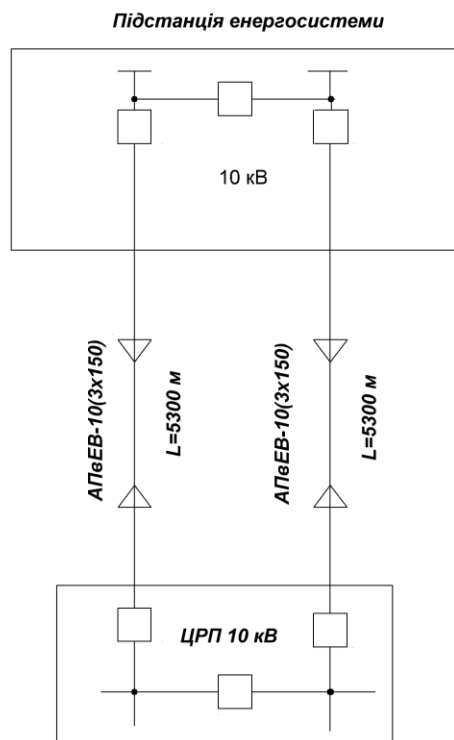
Найбільш доцільним вважається варіант, який забезпечує необхідний рівень надійності електропостачання при мінімальних зведених витратах.

Варіанти зовнішнього електропостачання підприємства металообробки та машинобудування, що прийняті до розгляду, наведено на рисунку 5.1.

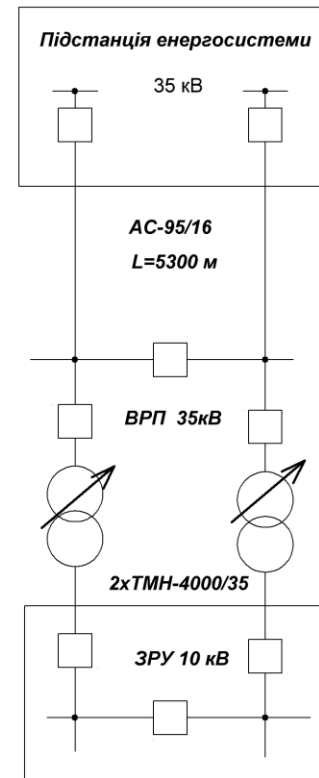
Перший варіант (рис.3.1, а). Електропостачання підприємства передбачається від підстанції енергосистеми кабельними лініями напругою 10 кВ довжиною 5,3 км. У цьому варіанті передбачається встановлення центрального розподільчого пункту 10 кВ, виконаного на базі комплектних шаф напругою 10 кВ.

Другий варіант (рис.3.1, б). Електропостачання підприємства здійснюється від підстанції енергосистеми дволанцюговою лінією напругою 35 кВ довжиною

5,3 км. Для реалізації цього варіанта необхідно передбачити встановлення
головної знижувальної підстанції 35/10 кВ.



a)



6)

Рис. 3.1 - Варіанти організації зовнішнього електропостачання підприємства
металообробки та машинобудування

Для варіанта І лінію 10 кВ потрібно вибрати з урахуванням роботи в нормальному та післяаварійному режимах.

Розрахунковий струм в КЛ 10 кВ:

$$I_p = \frac{S_p}{2\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{5161,90}{2\sqrt{3} \cdot 10,5} = 141,92 \text{ A.}$$

Перевірка КЛ для нормального: $I_p \leq k_n \cdot I_{mp, \text{дон.}}$;

$$141,91A \leq 0,92 \cdot 240 = 220,8A;$$

та післяаварійному режимах роботи: $I_{p.ав.} = 2 \cdot I_p \leq k'_n \cdot k_{ав.н} I_{mp.дон.}$;

$$2 \cdot 141,91 = 283,82 \text{ A} \leq 1,25 \cdot 0,9 \cdot 240 = 270 \text{ A.}$$

Оскільки: $283,82 \text{ A} > 270 \text{ A}$, кабель АПвЕВ (3×120) у післяаварійному режимі не проходить за допустимим струмом.

Повторюємо перевірку у післяаварійному режимі для кабеля АПвЕВ (3×150):

$$283,82 \text{ A} \leq 1,25 \cdot 0,9 \cdot 280 = 315 \text{ A}.$$

Отже, для електропостачання підприємства металообробки та машинобудування за варіантом І приймаємо дві кабельні лінії напругою 10 кВ марки АПвЕВ (3×150). Обраний кабель забезпечує передачу розрахункового навантаження як у нормальному, так і в післяаварійному режимі роботи системи електропостачання.

Перевірка завантаження кабелю в нормальному режимі::

$$k_3 = \frac{I_p}{I_{\text{доп.}}} = \frac{283,82}{2 \cdot 280} = 0,507.$$

Втрати потужності та електроенергії в кабельних лініях для І варіанту визначаються за такими залежностями:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \Delta P_{1\text{км}} \cdot l_{\Sigma} \cdot k_3^2 = 56 \cdot 2 \cdot 5,3 \cdot 0,507^2 = 152,58 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{\text{кл}} = \Delta P_{\text{кл}} \cdot \tau_m = 152,58 \cdot 2739,08 = 417940,57 \text{ кВт·год};$$

$$C_{\text{вт.10}} = \Delta W_{\text{кл}} \cdot C_0 = 417940,57 \cdot 10,52 = 4396,73 \text{ тис.грн.}$$

Розрахунковий струм у лінії для другого варіанту визначається за виразом:

$$I_{p.35} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{5161,90}{\sqrt{3} \cdot 35} = 85,14 \text{ A}.$$

Розрахунок показників для другого варіанта електропостачання виконується аналогічно до першого варіанта. У цьому випадку передбачається живлення підприємства дволанцюговою повітряною лінією напругою 35 кВ з проводами АС-95 та встановлення двох трансформаторів типу ТМН-4000/35 на ГЗП 35/10 кВ. Основні результати розрахунків наведено в таблиці 3.1.

						Арк.
						34

Таблиця 3.1 - Основні розрахункові показники другого варіанта електропостачання

Найменування показника	Позначення	Значення	Найменування показника	Позначення	Значення
Розрахунковий струм у лінії	I_p	85,14 А	Кількість трансформаторів	n	2
Марка проводу	-	АС-95	Тип трансформатора	-	ТМН-4000/35
Допустимий струм проводу	$I_{доп}$	330 А	Номінальна потужність трансформатора	S_n	4000 кВА
Коефіцієнт завантаження лінії	$K_{з.л}$	0,129	Коефіцієнт завантаження трансформаторів	$K_{з.тр}$	0,645
Довжина одного ланцюга	l	5,3 км	Втрати холостого ходу трансформатора	ΔP_{xx}	5,7 кВт
Сумарна довжина лінії	l_{Σ}	10,6 км	Втрати короткого замикання	ΔP_k	33,5 кВт
Втрати потужності на 1 км	$\Delta P_{1км}$	134 кВт/км	Річні втрати електроенергії в трансформаторах	$\Delta W_{тр}$	176268,46 кВт·год
Втрати потужності в лінії	$\Delta P_{пл}$	23,64 кВт	Загальні втрати електроенергії	ΔW_{Σ}	241025,85 кВт·год
Час максимальних втрат	τ_m	2739,08 год	Вартість електроенергії	C_0	8,86 грн/кВт·год
Річні втрати електроенергії в лінії	$\Delta W_{пл}$	64757,39 кВт·год	Вартість втрат електроенергії	$C_{вт}$	2135,49 тис. грн

За результатами розрахунку для другого варіанта встановлено, що дволанцюгова повітряна лінія 35 кВ з проводами АС-95 забезпечує передачу розрахункового навантаження підприємства. Коефіцієнт завантаження лінії становить 0,129, а трансформаторів ТМН-4000/35 - 0,645, що відповідає допустимим режимам роботи. Загальні річні втрати електроенергії становлять 241025,85 кВт·год, а їх вартість - 2135,49 тис. грн.

Далі виконуються визначення економічних збитків, спричинених можливими перервами електропостачання. Методика проведення розрахунків, а також необхідні довідкові коефіцієнти та статистичні дані наведені в [1].

При живленні напругою 10 кВ розрахунковий ланцюг включає кабельну лінію та вимикач напругою 10 кВ. При живленні напругою 35 кВ розрахункова схема містить повітряну лінію електропередачі, вимикач напругою 35 кВ та силовий трансформатор 35/10 кВ. Для кожного елемента визначаються показники аварійності та інтенсивності відмов.

Для обох схем середньорічне значення активного навантаження підприємства становить:

$$P_{cp} = \frac{P_p \cdot T_m}{8760} = \frac{5115,50 \cdot 4351,78}{8760} = 2541,27 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунку можливого збитку від перерв в електропостачанні для двох варіантів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Розрахунок можливого збитку від перерв в електропостачанні

Показник	Позначення	Варіант I, 10 кВ	Варіант II, 35 кВ
1	2	3	4
Довжина лінії, км	l	5,3	5,3
Параметр потоку відмов вимикача, 1/рік	λ_{a1}	0,02	0,02
Параметр потоку відмов лінії, 1/рік	λ_{a2}	0,133	0,117
Параметр потоку відмов трансформатора, 1/рік	λ_{a3}	—	0,018
Сумарний параметр потоку відмов, 1/рік	λ	0,153	0,175
Середній час відновлення одного ланцюга	T_v	$6,28 \cdot 10^{-3}$	$11,26 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт планового простою	$K_{п}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт аварійного простою при плановому ремонті	$K_{ап}$	$0,803 \cdot 10^{-6}$	$4,54 \cdot 10^{-6}$
Коефіцієнт аварійного простою одного ланцюга	K_a	$0,953 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт аварійного простою двох ланцюгів	K_{a2}	$2,515 \cdot 10^{-6}$	$12,96 \cdot 10^{-6}$ (
Середньорічний час аварійного простою, год/рік	T_a	0,022	0,114
Розрахункове активне навантаження, кВт	P_p	5115,50	5115,50
Час використання максимуму навантаження, год	T_m	4351,78	4351,78
Середньорічне активне навантаження, кВт	P_{cp}	2541,27	2541,27
Питомий збиток, грн/кВт·год	U_0	21	21
Можливий збиток від перерв, тис. грн	U	1,18	6,08

За результатами розрахунків можливий збиток від перерв в електропостачанні для першого варіанта становить 1,18 тис. грн, а для другого варіанта - 6,08 тис. грн. Більше значення збитку у другому варіанті пояснюється наявністю додаткових елементів схеми, зокрема трансформаторів 35/10 кВ, а також більшим коефіцієнтом аварійного простою.

Виконуємо визначення капітальних вкладень для розглянутих варіантів схем зовнішнього електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. Отримані результати розрахунків наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Капітальні вкладення у варіанти схем електропостачання

№ вар.	Елемент схеми	Одиниця вимірювання	Кіл-ть	Вартість одного, тис. грн	Вартість всього, тис. грн
I	Комірки 10 кВ з вакуумними вимикачами	шт.	2	211,20	422,40
	Кабельна лінія АПвЕВ -(3×150) у траншеї	км	10,6	3343,64	35442,58
	Всього за I варіантом				35864,98
II	Повітряна лінія 35 кВ 2×АС-95/16	км	5,3	1814,40	9616,32
	ВРП-35 кВ з трьома вимикачами	комплект	1	1966,06	1966,06
	Силові трансформатори ТМН-4000/35	шт.	2	4900,00	9800,00
	Всього за II варіантом				21382,38

Під час визначення поточних витрат враховуються дві основні складові: витрати на експлуатаційне обслуговування обладнання та амортизаційні відрахування:

$$C = A + E = \frac{K_i \cdot H_a}{100} + \frac{K_i \cdot H_e}{100},$$

Результати розрахунків поточних витрат для прийнятих варіантів електропостачання наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Розрахунок поточних витрат для варіантів електропостачання

Вар-нт	Найменування елементів схеми	K_i , тис. грн	H_a , %	H_e , %	$H_{a,e}$, %	C_i , тис. грн
I	Шафи 10 кВ з вакуумними вимикачами	422,40	5	5	10	42,24
I	Кабельна лінія АПвЕВ (3×150) у траншеї	35442,58	15	5	20	7088,52
	Всього за I варіантом	35864,98				7130,76
II	ПЛ-35 кВ 2×АС-95	9616,32	5	5	10	961,63
II	ВРП-35 кВ з трьома вимикачами	1966,06	15	5	20	393,21
II	Трансформатори ТМН-4000/35	9800,00	15	5	20	1960,00
	Всього за II варіантом	21382,38				3314,84

Зведені витрати (табл.3.5):

$$Z_1 = E_n \cdot K_1 + C_1 + C_{\text{втр}1} + Y_1$$

$$Z_1 = 0,12 \cdot 35864,98 + 7130,76 + 4396,73 + 1,18 = 15832,47 \text{ тис. грн.}$$

$$Z_2 = E_n \cdot K_2 + C_2 + C_{\text{втр}2} + Y_2;$$

$$Z_2 = 0,12 \cdot 21382,38 + 3314,84 + 2135,49 + 6,08 = 8022,30 \text{ тис. грн.}$$

Таблиця 3.5 – Техніко-економічне порівняння варіантів електропостачання

Показники	Варіант I	Варіант II
Капіталовкладення, тис. грн	35864,98	21382,38
Поточні витрати, тис. грн	7130,76	3314,84
Вартість втрат електроенергії, тис. грн	4396,73	2135,49
Збитки від перерв в електропостачанні, тис. грн	1,18	6,08
Зведені витрати, тис. грн	15832,47	8022,30

Оскільки: $Z_2 = 8022,30 \text{ тис. грн} < Z_1 = 15832,47 \text{ тис. грн}$, доцільним для подальшого проектування є II варіант електропостачання - живлення підприємства від мережі 35 кВ із встановленням ГЗП 35/10 кВ. Цей варіант має менші зведені витрати та є економічно вигіднішим.

Внутрішні розподільчі мережі підприємства металообробки та машинобудування виконуються на напрузі 10 кВ, що дозволяє знизити втрати електроенергії у порівнянні з мережами напругою 6 кВ та забезпечити ефективніший розподіл потужності між виробничими підрозділами.

Живлення силових і освітлювальних електроприймачів у цехах передбачається здійснювати від мережі напругою 380/220 В.

Розподільча мережа підприємства металообробки та машинобудування проектується кабельними лініями напругою 10 кВ із застосуванням радіальної схеми електропостачання. Цехові мережі також виконуються за радіальним принципом із живленням електроприймачів від силових пунктів напругою 380/220 В, що забезпечує простоту експлуатації, селективність захисту та достатній рівень надійності електропостачання.

4 КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

4.1 Баланс реактивної потужності підприємства металообробки та машинобудування та вибір пристроїв компенсації

Під час розрахунку балансу реактивної потужності підприємства металообробки та машинобудування враховується, що частина реактивної потужності надходить від енергосистеми. При цьому нормативне значення коефіцієнта реактивної потужності приймається: $\operatorname{tg} \varphi_c = 0,15$.

Тоді реактивна потужність, що передається від енергосистеми, становить:

$$Q_{\text{сист.}} = P_{\text{р.10}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 5115,50 \cdot 0,15 = 767,32 \text{ квар.}$$

Мінімальна необхідна кількість силових трансформаторів для електропостачання підприємства металообробки та машинобудування визначається за виразом:

$$n_{\text{min.пмм}} = P_{\text{р.0,4}} / (K_3 \cdot S_{\text{ТР}}) = 5067,77 / (0,7 \cdot 1000) = 7,24 \text{ шт.}$$

За результатами розрахунку приймається до встановлення вісім трансформаторів потужністю 1000 кВА кожний. Схема електропостачання передбачає чотири двотрансформаторні підстанції.

Для першого варіанта визначається величина реактивної потужності, яка може передаватися в мережу 0,4 кВ ПММ:

$$Q_{\text{н1}} = \sqrt{(n \cdot S_{\text{м1}} \cdot K_3)^2 - P_{\text{н1}}^2} = \sqrt{(8 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 5067,77^2} = 2382,8 \text{ квар.}$$

Необхідна встановлена потужність батарей статичних конденсаторів у мережі 0,4 кВ визначається за формулою:

$$Q_{\text{ку 0,4}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{п}} = 5107,06 - 2382,8 = 2724,25 \text{ квар.}$$

З урахуванням стандартного ряду потужностей конденсаторних установок до встановлення приймаються батареї сумарною потужністю 2750 квар, а саме:

						Арк.
						39

- три установки потужністю 400 квар;
- п'ять установок потужністю 300 квар;
- одна установка потужністю 50 квар.

Після вибору стандартних компенсуючих пристроїв уточнюється значення реактивної потужності, що передається в мережу:

$$Q_{\Pi} = Q_{н.0,4} - Q_{ку.0,4.ст} = 5107,06 - 2750 = 2357,06 \text{ квар.}$$

На наступному етапі визначається доцільна потужність компенсуючих пристроїв у мережі підприємства металообробки та машинобудування напругою 10 кВ:

$$Q_{ку.10} = Q_{р.10} - Q_{ку.0,4.ст} - Q_{еист.} = 5440,60 - 2750 - 767,32 = 1923,28 \text{ квар.}$$

Планується встановлення нерегульованих високовольтних батарей статичних конденсаторів типу УКРМ-10,5-500 квар у кількості чотирьох одиниць [10]. Загальна потужність компенсуючих пристроїв у мережі 10 кВ становитиме:

$$Q_{КУ10} = 4 \cdot 500 = 2000 \text{ квар.}$$

Далі визначаються втрати активної потужності, пов'язані з роботою компенсуючих установок:

$$\Delta P_{ку.0,4} = \Delta P_{пит.0,4} \cdot Q_{ку.0,4} = 0,0045 \cdot 2750 = 12,375 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_{ку.10} = \Delta P_{пит.10} \cdot Q_{ку.10} = 0,003 \cdot 2000 = 6 \text{ кВт.}$$

В цехових комплектних трансформаторних підстанціях ПММ:

Наступним етапом розраховується вартість комплектних трансформаторних підстанцій та конденсаторних батарей:

$$K_{ктп} = n_{тп(1)} \cdot \kappa_{тп(1)} + n_{тп(2)} \cdot \kappa_{тп(2)} = 0 \cdot 1980 + 2 \cdot 2450 = 9800 \text{ тис. грн.}$$

$$K_{ку.0,4} = \sum n_{ку.0,4.i} \cdot K_{ку0,4.i} = 3 \cdot 210 + 5 \cdot 155 + 1 \cdot 56 = 1460 \text{ тис.грн.}$$

$$K_{ку.10.} = \sum n_{ку.10.i} \cdot K_{ку10.i} = 4 \cdot 1450 = 5815 \text{ тис. грн;}$$

						Арк.
						40

Після цього обчислюються розрахункові витрати на компенсацію реактивної потужності, що враховують вартість обладнання, експлуатаційні витрати та економічний ефект від зниження перетоків реактивної потужності в мережі:

$$\begin{aligned} Z_{\text{ІПММ}} &= E_{\text{норм.}} \cdot (K_{\text{кТП}} + K_{\text{ку.10.}} + K_{\text{ку.0,4}}) + (\Delta P_{\text{ку.10.}} + \Delta P_{\text{ку.0,4.}} + \Delta P_{\text{тп.прк}}) \cdot C_0 \cdot \tau_{\text{max}} = \\ &= 0,12 \cdot (9800 + 5815 + 1460) + (6 + 12,375 + 7,29) \cdot 8,86 \cdot 10^{-3} \cdot 2739,08 = \\ &= 2848,88 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Для другого та третього варіантів компенсації реактивної потужності, які передбачають збільшення кількості силових трансформаторів до дев'яти та десяти одиниць відповідно, розрахунки виконуються аналогічно. Отримані результати зводяться до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Розрахунок варіантів компенсації реактивної потужності

Вар.	Кількість ТР	$S_{\text{тр}}$, кВА	$Q_{\text{пер}}$, квар	$Q_{\text{ку.10.}}$, квар	$Q_{\text{ку.0,4.}}$, квар	Z_i , тис.грн
II	9	1000	3657,06	3300	1450	3215,64
III	10	1000	34828,84	4450	300	3718,06

За результатами техніко-економічного порівняння остаточно приймається перший варіант компенсації реактивної потужності, оскільки він характеризується найменшим значенням зведених витрат:

$$Z_1 = 2848,88 \text{ тис.грн.} \leq Z_2 = 3215,64 \text{ тис.грн.} \leq Z_3 = 3718,06 \text{ тис.грн.}$$

Прийнятий рівень компенсації реактивної потужності ($Q_{\text{ку.10}} = 2000$ квар. та $Q_{\text{ку.0,4}} = 2750$ квар) повністю відповідає вимогам, що висуваються до системи електропостачання підприємства:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_p}{P_p} = \frac{690,60}{5115,90} = 0,135 \leq \operatorname{tg} \varphi_c = 0,15.$$

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв підприємства

На наступному етапі виконується визначення одиничної потужності низьковольтних конденсаторних установок та їх розподіл між трансформаторними підстанціями підприємства.

Як приклад розглянемо визначення реактивної потужності низьковольтних конденсаторних батарей, які необхідно встановити на першій трансформаторній підстанції ПММ:

$$Q_n = \sqrt{(n \cdot S_m \cdot K_z)^2 - P_n^2} = \sqrt{(2 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 1133,10^2} = 822,24 \text{ квар.}$$

$$Q_{\text{ку.н.тпЗ}} = Q_n - Q_{\text{п}} = 1501,47 - 822,24 = 679,22 \text{ квар.}$$

На шинах 0,4 кВ КТП-1 приймається встановлення конденсаторних установок сумарною потужністю 600 квар. Для компенсації реактивної потужності обираються дві конденсаторні установки потужністю по 300 квар типу УКРМ 0,4-300/7-25.

Для КТП-2...КТП-4 аналогічно виконуються розрахунки необхідної потужності компенсуювальних пристроїв, а результати розрахунків зводяться у таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунок компенсуючих пристроїв 0,4 кВ для КТП системи електропостачання

№ ТП	$N_{\text{тр}}$	$P_{\text{р.кпп.і}}$ кВт	$Q_{\text{р.кпп.і}}$, квар	$Q_{\text{пі}}$, квар	$Q_{\text{ку.розр.}}$, квар	$Q_{\text{ку.дійсн.}}$, квар
1	2	1133,10	1501,47	822,242	679,22	600
2	2	1354,35	1388,29	354,597	1033,70	850
3	2	1340,29	1120,64	404,499	716,14	700
4	2	1329,47	1096,65	438,758	657,90	600

№ ТП	$N_{\text{БСК}}$	Марка БСК	$Q_{\text{р.кТП і з ку, квар}}$	$S_{\text{р.кТП і з ку, кВА}}$	$K_{\text{з.кТП.і}}$
1	2	2хУКРМ 0,4-300/7-25	901,47	1447,95	0,724
2	3	2хУКРМ 0.4-400/10-40 1хУКРМ 0.4-50/10-4	538,29	1457,402	0,7287
3	2	1хУКРМ 0.4-400/10-40 1хУКРМ 0,4-300/7-25	420,64	1404,75	0,7024
4	2	2хУКРМ 0,4-300/7-25	496,65	1419,21	0,7096

У даному розділі виконано розрахунок та вибір засобів компенсації реактивної потужності для системи електропостачання ПММ. Визначено необхідну потужність компенсуючих пристроїв у мережах 0,4 та 10 кВ, проведено техніко-економічне порівняння варіантів компенсації реактивної потужності та обґрунтовано вибір найбільш доцільного варіанта за критерієм мінімальних зведених витрат.

У результаті прийнято встановлення батарей статичних конденсаторів загальною потужністю 2750 квар у мережі 0,4 кВ та 2000 квар у мережі 10 кВ. Реалізація компенсації реактивної потужності дозволяє зменшити перетоки реактивної потужності, знизити втрати електроенергії, підвищити коефіцієнт потужності та покращити режими роботи системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування.

5 ВИБІР КІЛЬКОСТІ, ПОТУЖНОСТІ ТА МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ГЗП ТА ЦЕХОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

5.1 Вибір кількості та потужності трансформаторів

Головна знижувальна підстанція, розподільчі пункти та цехові трансформаторні підстанції є основними елементами системи електропостачання підприємства. Під час вибору кількості, потужності та типу трансформаторів враховуються розрахункове навантаження, категорія споживачів за надійністю електропостачання, допустима перевантажувальна здатність трансформаторів, умови експлуатації, густина електричних навантажень, наявність компенсувальних пристроїв та особливості розміщення виробничих об'єктів.

На промислових підприємствах застосовують одно- та двотрансформаторні цехові підстанції. Кількість трансформаторів визначається величиною навантаження та вимогами до безперервності живлення споживачів. Однотрансформаторні підстанції є простішими й дешевшими, однак для відповідальних споживачів доцільніше використовувати двотрансформаторні підстанції, які забезпечують вищий рівень надійності.

Розміщення ГЗП і ТП повинно забезпечувати мінімальну довжину кабельних ліній, зменшення втрат електроенергії та виключення зворотних потоків потужності. Тому підстанції доцільно розташовувати поблизу центрів електричних навантажень або на межі ділянок, які вони живлять.

Вибір потужності трансформаторів ГЗП виконується з урахуванням нормального та післяаварійного режимів роботи. У разі відключення одного з трансформаторів другий повинен забезпечити живлення найбільш відповідальних споживачів із допустимим аварійним перевантаженням, за потреби з відключенням споживачів III категорії.

Потужність трансформаторів головної знижувальної підстанції вибирається з урахуванням кількості встановлених трансформаторів та допустимого аварійного перевантаження. Для двотрансформаторної підстанції розрахункова потужність одного трансформатора визначається за виразом:

						Арк.
						44

$$S_{\text{т.розр.}} = \frac{S_p}{(n-1) \cdot 1,4};$$

$$S_{\text{т.розр.}} = \frac{5,1619}{(n-1) \cdot 1,4} = 3,69 \text{ МВА.}$$

За результатами розрахунку приймаємо до встановлення два силові трансформатори номінальною потужністю: $S_n = 4,0 \text{ МВА}$. Вибираємо трансформатори типу ТМН-4000/35 [11].

Коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі визначається як відношення розрахункового навантаження до сумарної номінальної потужності встановлених трансформаторів:

$$K_3 = \frac{S_p}{2 \cdot S_n};$$

$$K_3 = \frac{5161,90}{2 \cdot 4000} = 0,645 \approx 0,65.$$

Отже, у нормальному режимі кожен трансформатор буде завантажений приблизно на 65 %, що відповідає допустимим умовам роботи.

У післяаварійному режимі, при відключенні одного з трансформаторів, другий трансформатор повинен забезпечити живлення навантаження з урахуванням допустимого аварійного перевантаження:

$$S_{\text{ав}} = 1,4 \cdot S_n;$$

$$S_{\text{ав}} = 1,4 \cdot 4000 = 5600 \text{ кВА.}$$

Оскільки $S_p = 5161,90 \text{ кВА} < S_{\text{ав}} = 5600 \text{ кВА}$, обраний трансформатор потужністю 4 МВА забезпечує живлення споживачів у післяаварійному режимі. Отже, встановлення двох трансформаторів типу ТМН-4000/35 є технічно допустимим для ГЗП підприємства.

Потужність цехових трансформаторів вибирається з урахуванням розрахункового навантаження відповідної підстанції, кількості встановлених трансформаторів, категорії споживачів за надійністю електропостачання та допустимих режимів перевантаження.

						Арк.
						45

Для правильного вибору номінальної потужності трансформаторів необхідно перевірити виконання таких умов:

- допустиме систематичне перевантаження: $S_n \geq S_p / (n \cdot K_1)$;
- аварійне перевантаження: $S_n \geq K_{I,II} \cdot S_p / ((n-1) \cdot K_2)$,

Остаточний вибір трансформаторів виконується за найбільшим значенням потужності, отриманим із наведених умов, з подальшим округленням до найближчого стандартного номіналу.

Для м. Кропивницький еквівалентна річна температура приймається: $\theta_{\text{охол}} = 10^\circ\text{C}$. За умови двозмінного режиму роботи коефіцієнт допустимого систематичного перевантаження становить: $K_1 = 1,09$. Коефіцієнт допустимого аварійного перевантаження при тривалості перевантаження від 8 до 24 год приймається: $K_2 = 1,4$.

Для живлення споживачів підприємства передбачається встановлення комплектних трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ вбудованого типу. Приймається, що навантаження між трансформаторами підстанції розподіляється рівномірно.

Далі виконаємо розрахунок навантаження для ТП-1 з метою обґрунтування вибору номінальної потужності цехових трансформаторів. Для ТП №1 передбачається встановлення двох силових трансформаторів. Номінальна потужність одного трансформатора визначається за двома умовами за виразами:

$$S_{n1} \geq \frac{S_p}{n \cdot K_1} = \frac{1513,07}{2 \cdot 1,16} = 652,19 \text{ кВА}.$$

Частка споживачів I та II категорій надійності електропостачання для даної підстанції становить 85 %:

$$S_{n2} \geq \frac{K_{I,II} \cdot S_p}{(n-1) \cdot K_2} = \frac{0,85 \cdot 1513,07}{(2-1) \cdot 1,4} = 918,65 \text{ кВА}.$$

За результатами розрахунку найбільше необхідне значення потужності становить: $S_n \geq 918,65 \text{ кВА}$. Тому для ТП-1 приймаємо до встановлення два силові трансформатори типу ТМ-1000/10/0,4 номінальною потужністю: $S_n = 1000 \text{ кВА}$.

						Арк.
						46

Технічні характеристики вибраного трансформатора наведено [8].
Коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_n};$$

$$K_3 = \frac{1513.07}{2 \cdot 1000} = 0.757.$$

У післяаварійному режимі, при відключенні одного трансформатора, живлення споживачів I та II категорій забезпечується другим трансформатором. Коефіцієнт його завантаження становить:

$$K_{3.ав} = \frac{K_{I,II} \cdot S_p}{S_n};$$

$$K_3 = \frac{0.85 \cdot 1513.07}{1000} = 1.286 \leq 1.4.$$

Оскільки отримане значення не перевищує допустимого аварійного перевантаження, вибрані трансформатори забезпечують роботу ТП-1 у післяаварійному режимі. Відключення споживачів III категорії в аварійному режимі становить 15 % від загального навантаження підстанції. Результати розрахунків для інших цехових ТП зводяться до таблиці 7.1.

Таблиця 5.1 - Вибір трансформаторів цехових ТП комплексу.

№ ТП	S _{розр.тп} , кВА	n, шт	Тип ТР	S _{н1} , систем. навантаження	S _{н2} , аварійне перевантаження	k _{з.і}	k _{з.ав.і}
1	1513,07	2	ТМ-1000/10/0,4	652,19	918,65	0,757	1,286
2	1498,57	2	ТМ-1000/10/0,4	645,9353	909,85	0,749	1,274
3	1443,01	2	ТМ-1000/10/0,4	621,9871	876,11	0,722	1,227
4	1462,02	2	ТМ-1000/10/0,4	630,181	887,66	0,731	1,243

Для всіх цехових ТП приймаємо до встановлення по два трансформатори типу ТМ-1000/10/0,4. Отримані коефіцієнти аварійного завантаження не перевищують допустимого значення 1,4, тому вибрані трансформатори забезпечують роботу підстанцій як у нормальному, так і в післяаварійному режимах.

5.2 Розташування та компоновка трансформаторних підстанцій підприємства металообробки та машинобудування

Цехові трансформаторні підстанції доцільно розміщувати якомога ближче до центрів електричних навантажень. Залежно від планування виробничих приміщень вони можуть встановлюватися всередині цеху, вбудовуватися у будівлю або прибудовуватися до неї. Рациональне місце розташування ТП уточнюється за картограмою електричних навантажень, яка дозволяє визначити ділянки з найбільшою концентрацією споживаної потужності.

Для підприємства металообробки та машинобудування остаточно приймається встановлення таких цехових трансформаторних підстанцій:

- ТП-1 - механоскладальний виробничий цех;
- ТП-2 - цех високоточної інструментальної обробки;
- ТП-3 - насосна станція;
- ТП-4 - цех механообробки.

У проєкті передбачається застосування комплектних трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ. КТП являє собою готовий до монтажу електротехнічний комплекс, до складу якого входять силовий трансформатор, розподільчі пристрої високої та низької напруги, комутаційна апаратура, засоби захисту та автоматики. Основні елементи підстанції розміщуються в одному металевому або бетонному корпусі.

Перевагами комплектних трансформаторних підстанцій є компактність, скорочення строків монтажу, зменшення витрат на будівельно-монтажні роботи, зручність експлуатації та можливість подальшої модернізації. Завдяки наближенню КТП до центрів навантаження зменшується довжина мереж 0,4 кВ, що сприяє зниженню втрат електроенергії та покращенню показників якості напруги.

КТП можуть оснащуватися приладами обліку активної та реактивної електроенергії, захистом від коротких замикань, перевантажень, перенапруг і перегріву. За потреби передбачається встановлення пристроїв автоматичного повторного вмикання, дистанційного керування, контролю навантаження та телеметрії.

						Арк.
						48

У бакалаврській роботі для цехових трансформаторних підстанцій прийнято трансформатори типу ТМ-1000/10/0,4. Зовнішній вигляд трансформатора та його технічні характеристики наведено на рисунку 5.1.



S , кВ·А	Напруга		f , Гц
	$U_{\text{вн}}$, кВ	$U_{\text{нн}}$, кВ	
1000	10	0,4	50

Втрати		u_k , %	$i_{\text{хх}}$, %
$\Delta P_{\text{хх}}$, Вт	$\Delta P_{\text{кз}}$, Вт		
2000	10800	5,5	1,2

Рис. 5.1 – Зовнішній вигляд та технічні характеристики трансформатора ТМ-1000/10/0,4

Трансформатор типу ТМ-1000/10/0,4 характеризується надійністю, достатньою продуктивністю та простотою експлуатації. Його корпус по периметру обладнаний сталевими охолоджувальними елементами, що забезпечують ефективне відведення тепла під час роботи.

Регулювання напруги здійснюється за допомогою перемикачів без збудження - ПБЗ. Таке перемикач виконується лише при повністю відключеному трансформаторі від мережі з боку високої та низької напруги. Діапазон регулювання становить $\pm 2,5-5\%$ від номінального значення напруги.

До основних переваг трансформатора належать відносно невисока вартість, надійність у роботі, простота конструкції та можливість використання в комплектних трансформаторних підстанціях промислових підприємств.

Таким чином, у розділі виконано вибір цехових трансформаторів типу ТМ-1000/10/0,4, наведено їх основні технічні характеристики, перевірено допустимі режими роботи та обґрунтовано місця встановлення трансформаторних підстанцій на території підприємства.

6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПММ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

Розрахунок струмів короткого замикання є необхідним етапом проектування системи електропостачання підприємства. Його результати використовуються для вибору та перевірки високовольтного обладнання, кабельних і повітряних ліній, шин, ізоляторів, вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму та іншої комутаційно-захисної апаратури.

Під час розрахунку струмів короткого замикання визначаються основні параметри, які характеризують аварійний режим роботи електричної мережі:

- I'' - діюче значення періодичної складової струму короткого замикання в початковий момент, тобто надперехідний струм КЗ;
- $i_{уд}$ - найбільше миттєве значення повного струму короткого замикання, або ударний струм КЗ;
- I_{∞} - діюче значення усталеного струму короткого замикання.

Отримані значення струмів КЗ надалі використовуються для перевірки електрообладнання за умовами електродинамічної та термічної стійкості, а також для вибору параметрів апаратів захисту і комутації.

6.1 Розрахунок струмів короткого замикання

Перед виконанням розрахунку струмів короткого замикання складається розрахункова схема системи електропостачання підприємства ММ. На ній позначаються основні елементи мережі та точки, у яких необхідно визначити значення струмів КЗ (рис.6.1).

На основі розрахункової схеми будується схема заміщення (рис.6.2), у якій елементи системи електропостачання подаються у вигляді відповідних активних та індуктивних опорів. Такий підхід дозволяє спростити розрахунок і визначити еквівалентні опори до кожної точки короткого замикання.

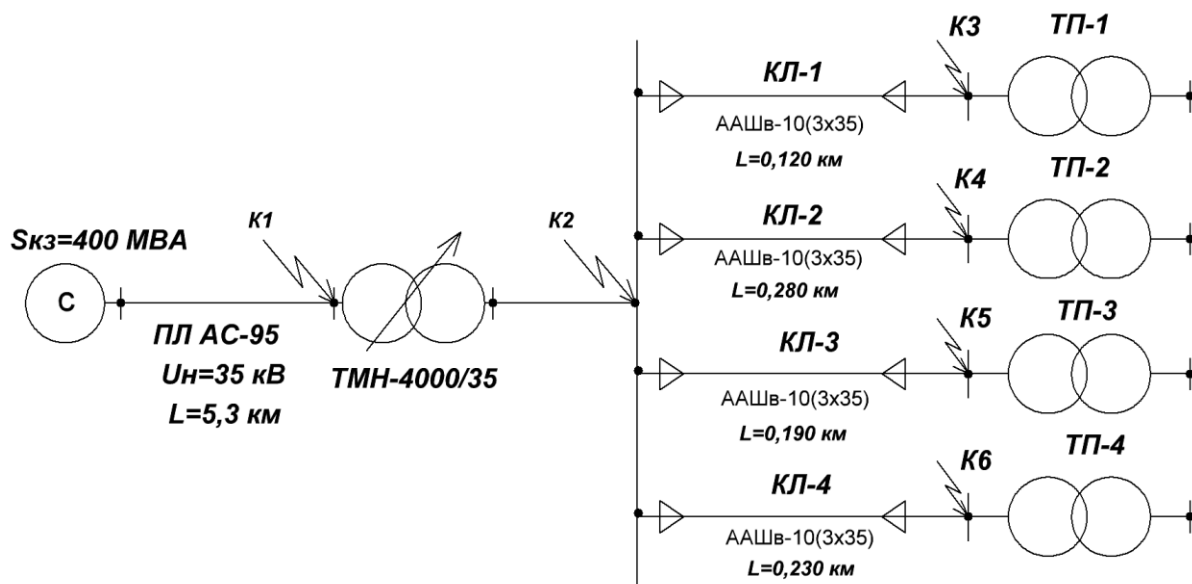


Рис.6.1 - Розрахункова схема для визначення струмів короткого замикання

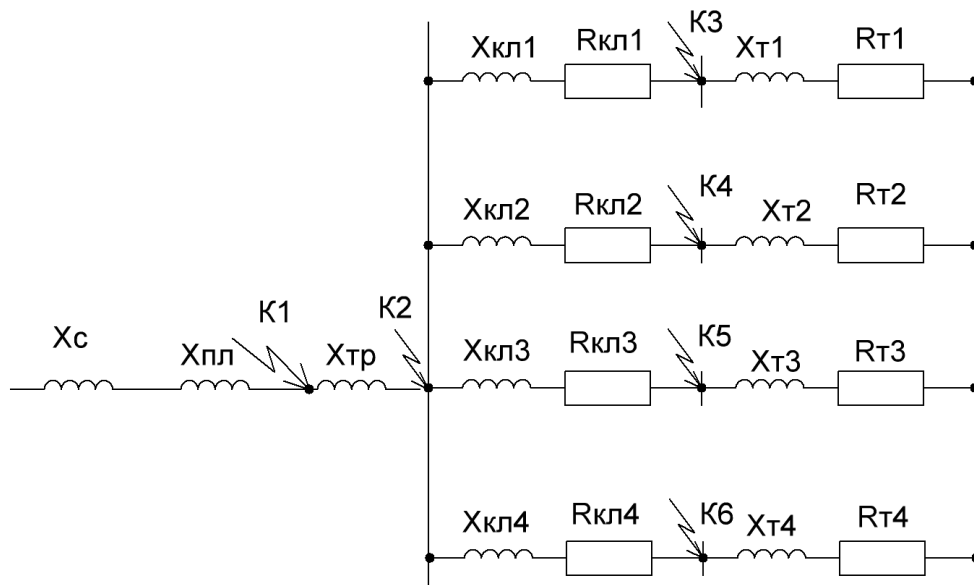


Рис. 6.2 - Схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання

Отримана схема заміщення використовується для подальшого визначення надперехідного, ударного та усталеного струмів короткого замикання у вибраних точках мережі.

Вихідними даними для розрахунку струмів короткого замикання є:

- потужність короткого замикання енергосистеми: $S_{K3} = 400$ МВА;
- повітряна лінія 35 кВ: провід АС-95, довжина лінії: $L = 5,3$ км;

- силовий трансформатор типу ТМН-4000/35: $S_H = 4,0$ МВА; $U_H = 35$ кВ; $U_K = 7,5\%$;
- базисна потужність: $S_6 = 400$ МВА.

Розрахунок струмів короткого замикання виконується у відносних одиницях з приведенням параметрів елементів схеми до базисних умов. Базисний струм на стороні 10,5 кВ:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{61}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 35} = 6,60 \text{ кА}$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{62}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 22,0 \text{ кА.}$$

Опір енергосистеми у відносних одиницях, приведений до базисних умов, визначається як:

$$x_c = \frac{S_6}{S_{kc}} = \frac{400}{400} = 1.$$

Опір повітряної лінії 35 кВ з проводом АС-95, приведений до базисних умов, визначається за активною та індуктивною складовими:

$$x_{nl} = x_o \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 5,3 \cdot \frac{400}{35^2} = 0,692;$$

$$r_{nl} = r_o \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,42 \cdot 5,3 \cdot \frac{400}{35^2} = 0,727.$$

Опір силового трансформатора у відносних одиницях, приведений до базисних умов, визначається за напругою короткого замикання:

$$x_T = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{400}{4,0} = 7,5.$$

Далі визначаємо опори кабельних ліній 10 кВ, що живлять цехові трансформаторні підстанції. Для прикладу виконаємо розрахунок для кабельної лінії до ТП-1:

						Арк.
						52

$$x_{\text{кл-1}} = x_0 \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,095 \cdot 0,12 \cdot \frac{400}{10,5^2} = 0,041;$$

$$r_{\text{кл-1}} = r_0 \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,868 \cdot 0,12 \cdot \frac{400}{10,5^2} = 0,378.$$

Опори інших кабельних ліній визначаються аналогічно з урахуванням їх довжин та питомих параметрів. Отримані результати доцільно звести до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1- Результати розрахунку струмів короткого замикання

№ КЛ	Позначення	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом	R^*_6	X^*_6
КЛ-1	ГЗП–ТП-1	0,12	0,868	0,095	0,104	0,011	0,378	0,041
КЛ-2	ГЗП–ТП-2	0,28	0,868	0,095	0,243	0,027	0,882	0,097
КЛ-3	ГЗП–ТП-3	0,19	0,868	0,095	0,165	0,018	0,598	0,065
КЛ-4	ГЗП–ТП-4	0,23	0,868	0,095	0,200	0,022	0,724	0,079

Знаходимо результуючи опори до точок K_1 та K_2 . Точка K_1 знаходиться на стороні 35 кВ, тому враховуємо опір системи та повітряної лінії:

$$x_{\text{к1}} = x_c + x_{\text{пл}} = 1,0 + 0,692 = 1,692;$$

$$r_{\text{к1}} = r_{\text{пл}} = 0,727;$$

$$z_{\text{к1}} = \sqrt{(x_{\text{к1}}^2 + r_{\text{к1}}^2)} = \sqrt{1,692^2 + 0,727^2} = 1,842.$$

Надперехідний струм короткого замикання в точці K_1 :

$$I_{\text{к1}}'' = \frac{I_{61}}{z_{\text{к1}}} = \frac{6,60}{1,842} = 3,58 \text{ кА.}$$

Точка K_2 знаходиться на стороні 10 кВ після трансформатора, тому додатково враховується опір трансформатора:

$$x_{\text{к2}} = x_{\text{к1}} + x_m = 1,692 + 7,5 = 9,192;$$

$$r_{\text{к2}} = r_{\text{к1}} = 0,727;$$

$$z_{\text{к2}} = \sqrt{(x_{\text{к2}}^2 + r_{\text{к2}}^2)} = \sqrt{9,192^2 + 0,727^2} = 9,221;$$

$$I_{\text{к2}}'' = \frac{I_{62}}{z_{\text{к2}}} = \frac{22,0}{9,221} = 2,39 \text{ кА.}$$

						Арк.
						53

Ударні струми короткого замикання. Для визначення ударного струму використовуємо залежність:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I''_k \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}\right),$$

$$T_a = \frac{x}{\omega r}, \quad \omega = 314 \text{ с}^{-1}$$

Для точки K_1 :

$$T_{a1} = \frac{x_{k1}}{314 \cdot r_{k1}} = \frac{1,692}{314 \cdot 0,727} = 0,0074 \text{ кА};$$

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 3,58 \cdot \left(1 + e^{\frac{-0,01}{0,0074}}\right) = 6,38 \text{ кА}.$$

Для точки K_2 :

$$T_{a2} = \frac{x_{k2}}{314 \cdot r_{k2}} = \frac{9,192}{314 \cdot 0,727} = 0,0403 \text{ кА};$$

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 2,39 \cdot \left(1 + e^{\frac{-0,01}{0,0403}}\right) = 6,00 \text{ кА}.$$

Для інших точок схеми розрахунок виконуємо аналогічно. За основу приймаємо результуючий опір до точки K_2 : $x_{k2} = 9,192$; $r_{k2} = 0,727$; $I_{62} = 22,0$ кА. Для точок K_3 – K_6 до опорів точки K_2 додаються відповідні опори кабельних ліній до цехових ТП.

$$x_{k3} = x_{k2} + x_{к71} = 9,192 + 0,041 = 9,233;$$

$$r_{k3} = r_{k2} + r_{к71} = 0,727 + 0,378 = 1,105;$$

$$z_{k3} = \sqrt{(x_{k3}^2 + r_{k3}^2)} = \sqrt{9,233^2 + 1,105^2} = 9,299;$$

$$I''_{k3} = \frac{I_{62}}{z_{k3}} = \frac{22,0}{9,299} = 2,366 \text{ кА}.$$

Аналогічно визначаються струми короткого замикання в інших точках. Результати розрахунків наведено в таблиці 6.2.

						Арк.
						54

Таблиця 6.2 - Результати розрахунку струмів короткого замикання

№ точки КЗ	X_{Σ}	R_{Σ}	Z_{Σ}	I'' , кА	i_y , кА
K1	1,692	0,727	1,842	3,58	6,38
K2	9,192	0,727	9,221	2,39	6,00
K3	9,233	1,105	9,299	2,37	5,64
K4	9,289	1,609	9,427	2,33	5,22
K5	9,257	1,325	9,351	2,35	5,45
K6	9,271	1,451	9,384	2,34	5,34

Розрахунок струмів короткого замикання в точках КЗ–К6 виконано з урахуванням опорів відповідних кабельних ліній, що живлять цехові трансформаторні підстанції. Отримані значення надперехідних та ударних струмів КЗ використовуються для подальшого вибору і перевірки високовольтного обладнання, кабельних ліній та апаратів захисту за умовами електродинамічної й термічної стійкості.

6.2 Вибір високовольтних ліній для живлення цехових підстанцій

Виконаємо вибір кабельної лінії від ГЗП до ТП-1. Для живлення трансформаторної підстанції передбачається прокладання двох кабельних ліній, тому розрахунковий струм однієї лінії в нормальному режимі визначається за формулою:

$$I_p = \frac{S_{P.mn1}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{1513,07}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 44,35 \text{ А.}$$

Для живлення ТП-1 приймаємо дві кабельні лінії марки ААШВ-10 (3×35) мм² з допустимим тривалим струмом: $I_d = 115 \text{ А}$. Перевіримо кабель за допустимим струмовим навантаженням у післяаварійному режимі. У разі відключення однієї кабельної лінії друга повинна забезпечити передачу всього навантаження ТП-1:

$$I_{p.max} = \frac{S_{P.mn1}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{1513,07}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 88,70 \text{ А.}$$

					Арк.
					55

Допустимий струм кабелю з урахуванням умов прокладання та аварійного перевантаження становить:

$$I_{ав} = K_{п} \cdot K_{ав} \cdot I_{д} = 0,9 \cdot 1,25 \cdot 115 = 129,38 > I_{р.мах} = 88,70 \text{ А.}$$

Умова допустимого струмового навантаження виконується. Отже, для живлення ТП-1 можна прийняти дві кабельні лінії ААШв-10 (3×35) мм².

Для перевірки кабелю за умовою термічної стійкості приймаємо значення надперехідного струму короткого замикання у точці K_2 з попереднього розрахунку:

$$B_{к} = I''^2 \cdot (t_{в} + t_{рз.мах})$$

$$B_{к} = 2,39^2 \cdot (0,025 + 1) = 5,86 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Мінімальний переріз кабелю за умовою термічної стійкості:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_{к}}}{C} = \frac{\sqrt{5,86 \cdot 10^6}}{94} = 25,74 \text{ мм}^2.$$

Оскільки: $F_{min} = 25,74 \text{ мм}^2 < 35 \text{ мм}^2$, кабель ААШв-10 (3×35) мм² проходить перевірку за умовою термічної стійкості. Отже, для живлення ТП-1 остаточно приймаємо дві кабельні лінії ААШв-10 (3×35) мм². Розрахунки по ТП-2...ТП-4 наведено в таблиці 6.3.

Отже, для живлення цехових ТП приймаємо по дві кабельні лінії ААШв-10 (3×35), а для зовнішнього електропостачання ГЗП - дволанцюгову повітряну лінію 35 кВ з проводом АС-95.

6.3 Вибір високовольтної комутаційної апаратури, трансформаторів струму та напруги

Вибір вимикачів напругою 35 кВ. Високовольтні вимикачі вибираються за номінальною напругою, номінальним струмом, родом установки, комутаційною здатністю та стійкістю до дії струмів короткого замикання. Обране обладнання повинно забезпечувати надійне вимикання аварійних струмів і відповідати умовам електродинамічної та термічної стійкості.

						Арк.
						56

Таблиця 6.3 - Вибір кабельних ліній 10 кВ та повітряної лінії 35 кВ

Призначення лінії	U_n , кВ	S_p , кВА	n , шт.	$I_{p.норм}$, А	$I_{p.ав}$, А	$K_{ав}$	K_p	Прийнятий переріз, мм ²	F_{min} , мм ²	Марка проводу / кабелю	I_d , А	$I_{ав.д}$, А	L , км
Система - ГЗП	35	5161,90	2	42,57	85,15	-	-	95	—	АС-95	330	330	5,3
ЦРП - ТП-1	10,5	1513,07	2	44,35	88,70	1,25	0,9	35	25,53	ААШВ-10 (3×35)	115	129,38	0,12
ЦРП - ТП-2	10,5	1498,57	2	41,20	82,40	1,25	0,9	35	25,10	ААШВ-10 (3×35)	115	129,38	0,28
ЦРП - ТП-3	10,5	1443,01	2	39,67	79,34	1,25	0,9	35	25,31	ААШВ-10 (3×35)	115	129,38	0,19
ЦРП - ТП-4	10,5	1462,02	2	40,20	80,39	1,25	0,9	35	25,20	ААШВ-10 (3×35)	115	129,38	0,23

На стороні 35 кВ приймаємо до встановлення вимикач типу ВБЗЕ-35 з електромагнітним приводом. Перевірку вибраного вимикача виконуємо за основними розрахунковими параметрами мережі. Розрахунковий струм у лінії визначається за виразом:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{5161,90}{\sqrt{3} \cdot 35} = 85,14 \text{ А.}$$

Перевірку вимикача 35 кВ наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4- Вибір високовольтних вимикачів $U_H = 35 \text{ кВ}$.

Розрахункова умова	Параметри мережі	Параметри вимикача ВБЗЕ-35
$U_{\text{мер.}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{мер}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$
$I_{\text{мах}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_p = 85,14 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$I''_{\text{к1}} \leq I_{\text{відк.ном}}$	$I''_{\text{к1}} = 3,58 \text{ кА}$	$I_{\text{відк.ном}} = 20 \text{ кА}$
$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	$i_{\text{уд}} = 6,38 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 52 \text{ кА}$
$I'' \leq I_{\text{терм.ном}}$	$I''_{\text{к1}} = 3,58 \text{ кА}$	$I_{\text{терм.ном}} = 20 \text{ кА}$
$B_k \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}$	$B_k = 13,13 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

На всіх ділянках схеми електропостачання напругою 10 кВ приймаємо до встановлення вимикачі типу RV-12 [12]. Вибір вимикачів напругою 10 кВ виконується за умовами таблиці 6.4. Для перевірки приймаємо параметри вакуумного вимикача RV-12: $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$; $I_{\text{відк.ном}} = 20 \text{ кА}$; $i_{\text{дин}} = 52 \text{ кА}$; $I_{\text{терм.ном}} = 20 \text{ кА}$; $I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

Розрахунковий струм для ввідного вимикача:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{5161,90}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 283,83 \text{ А.}$$

Розрахунковий струм для секційного вимикача:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{5161,90}{2\sqrt{3} \cdot 10,5} = 141,92 \text{ А.}$$

Розрахунковий струм для вимикачів ліній до ТП:

$$I_{pi} = \frac{S_{pi}}{\sqrt{3} \cdot U_H} \text{ А.}$$

Вибір вимикачів напругою 10 кВ зведено до таблиці 6.5.

За результатами перевірки встановлено, що всі розрахункові параметри мережі не перевищують допустимих параметрів вакуумного вимикача RV-12. Номінальний струм вимикача 630 А перевищує розрахункові струми всіх приєднань, а його комутаційна, електродинамічна та термічна стійкість є достатньою для роботи в умовах можливих коротких замикань. Отже, вимикачі типу RV-12 приймаються для встановлення у ЗРУ 10 кВ.

Для головної знижувальної підстанції 35/10 кВ приймається комбінована схема виконання розподільчих пристроїв. З боку вищої напруги 35 кВ передбачається встановлення відкритого розподільчого пристрою зовнішньої установки, що є доцільним для даного класу напруги та забезпечує зручність монтажу й обслуговування обладнання.

З боку напруги 10 кВ приймається закритий розподільчий пристрій, виконаний на базі комплектних шаф внутрішньої установки з вакуумними вимикачами. Таке рішення забезпечує підвищену надійність, безпеку обслуговування, захист обладнання від атмосферних впливів та компактність розміщення.

Усі вимикачі напругою 10 кВ передбачається встановити у типові комплектні шафи КУ-10 внутрішньої установки. Таке виконання забезпечує компактне розміщення обладнання, зручність експлуатації, підвищену безпеку обслуговування та захист апаратури від впливу зовнішнього середовища.

У шафах КУ-10 приймаємо до встановлення вакуумні вимикачі типу RV-12 з пружинним приводом. Вимикачі призначені для комутації електричних кіл у нормальних та аварійних режимах роботи мережі 10 кВ, а також забезпечують необхідну комутаційну, електродинамічну та термічну стійкість.

Основні технічні характеристики шаф КУ-10 з вимикачами RV-12 наведено в таблиці 6.6.

						Арк.
						59

Таблиця 6.5 - Вибір та перевірка вимикачів напругою 10 кВ

Призначення вимикача	S_p , кВА	I_p , А	Перевірка за $I_p \leq I_{ном}$	$I''_{кз}$, кА	Перевірка за $I''_{кз} \leq I_{відк.ном}$	$i_{уд}$, кА	Перевірка за $i_{уд} \leq i_{дин}$	B_k , кА ² ·с	Перевірка за $B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	Тип вимикача
Ввідний вимикач ЗРУ 10 кВ	5161,90	283,83	$283,83 < 630$	2,39	$2,39 < 20$	6,00	$6,00 < 52$	5,85	$5,85 < 1200$	RV-12
Секційний вимикач ЗРУ 10 кВ	2580,95	141,92	$141,92 < 630$	2,39	$2,39 < 20$	6,00	$6,00 < 52$	5,85	$5,85 < 1200$	RV-12
Лінійний вимикач до ТП-1	1513,07	44,35	$44,35 < 630$	2,39	$2,39 < 20$	6,00	$6,00 < 52$	5,85	$5,85 < 1200$	RV-12
Лінійний вимикач до ТП-2	1498,57	41,20	$41,20 < 630$	2,39	$2,39 < 20$	6,00	$6,00 < 52$	5,85	$5,85 < 1200$	RV-12
Лінійний вимикач до ТП-3	1443,01	39,67	$39,67 < 630$	2,39	$2,39 < 20$	6,00	$6,00 < 52$	5,85	$5,85 < 1200$	RV-12
Лінійний вимикач до ТП-4	1462,02	40,20	$40,20 < 630$	2,39	$2,39 < 20$	6,00	$6,00 < 52$	5,85	$5,85 < 1200$	RV-12

Таблиця 6.6 - Технічна характеристика шаф КУ-10

Параметр	Каталожні дані	Параметр	Каталожні дані
Номинальна напруга	10 кВ	Номинальний струм відключення	20 кА
Номинальний струм збірних шин	1000 А	Електродинамічна стійкість	52 кА
Номинальний струм шафи	630 А	Тип приводу вимикача	пружинний
Кількість і переріз силових кабелів	4×(3×240) мм ²	Тип вимикача	RV-12

Вибір роз'єднувачів 35 кВ. Роз'єднувачі напругою 35 кВ вибираються за номінальною напругою, допустимим тривалим струмом, електродинамічною та термічною стійкістю до струмів короткого замикання. Роз'єднувач не призначений для вимикання струмів навантаження або короткого замикання, тому його основне призначення - створення видимого розриву електричного кола під час ремонту або оперативних перемикачів.

Для сторони 35 кВ приймаємо до встановлення роз'єднувач типу РНД(3)-35/630Т1. Перевірку вибраного роз'єднувача наведено в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 - Вибір роз'єднувачів 35 кВ

Параметри мережі	Розрахункові формули	Параметри роз'єднувача
$U_{\text{мер.}} = 35 \text{ кВ}$	$U_{\text{мер.}} \leq U_{\text{ном}}$	$U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$
$I_{\text{max}} = 85,14 \text{ А}$	$I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$i_{\text{уд}} = 6,38 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	$i_{\text{дин}} = 63 \text{ кА}$
$B_{\text{к}} = 13,13 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\text{к}} \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}$	$I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}} = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Вибір трансформаторів власних потреб. Трансформатори власних потреб призначені для живлення допоміжних споживачів розподільчого пункту 10 кВ та обладнання, необхідного для нормальної роботи підстанції. До таких споживачів належать кола керування, сигналізації, освітлення, обігріву, вентиляції, релейного захисту, автоматики та інші допоміжні пристрої.

Потужність трансформаторів власних потреб вибирається за розрахунковим навантаженням власних потреб з урахуванням коефіцієнтів попиту, одночасності та завантаження. Це дозволяє забезпечити надійне живлення допоміжного обладнання у нормальному та післяаварійному режимах роботи.

Розрахункове навантаження власних потреб визначається за виразом:

$$S_p = K_n \cdot \sqrt{P_{вст}^2 + Q_{вст}^2}.$$

Номінальна потужність трансформатора власних потреб вибирається за умовою:

$$S_{mp} \geq \frac{S_{розр}}{1,4 \cdot n_{mp}}.$$

Для подальшого вибору трансформаторів власних потреб виконується розрахунок навантаження допоміжних споживачів РП-10 кВ (табл.6.8).

Таблиця 6.8 - Розрахунок потужності споживачів власних потреб

№	Споживач	n, шт	P _{ном} , кВт	P _Σ , кВт	cosφ/tgφ	P _{вст} , кВт	Q _{вст} , квар
1	Електродвигуни обдуву трансформаторів 4 МВА	4	2,2	8,8	0,8/0,75	8,8	6,60
2	Обладнання підігріву вимикачів 35 кВ	3	3,0	9,0	0,97/0,25	9,0	2,25
3	Підігрів комірок КРП	32	0,6	19,2	0,97/0,25	19,2	4,80
4	Опалення та освітлення приміщення	3	2,0	6,0	0,97/0,25	6,0	1,50
5	Навантаження оперативних ланцюгів	2	3,0	6,0	0,97/0,25	6,0	1,50
6	Зовнішнє освітлення	4	4,6	18,4	0,97/0,25	18,4	4,60
	Разом			67,4		67,4	21,25

Розрахункова потужність з урахуванням коефіцієнта попиту:

$$S_p = 0,8 \cdot \sqrt{67,25^2 + 21,28^2} = 56,54 \text{ кВА}$$

Оскільки для живлення власних потреб передбачається встановлення двох трансформаторів, по одному на кожну секцію шин 10 кВ, розрахункова потужність розподіляється між ними. Потужність одного трансформатора власних потреб визначається за умовою:

$$S_{mp} \geq \frac{56,54}{1,4 \cdot 2} = 20,19 \text{ кВА}.$$

За результатами розрахунку приймаємо до встановлення два трансформатори власних потреб типу ТМ-25/10 номінальною потужністю: $S_{\text{ном}}=25$ кВА.

Вибір обмежувачів перенапруги (ОПН). Обмежувачі перенапруги призначені для захисту ізоляції електрообладнання від небезпечних перенапруг, що можуть виникати внаслідок грозових розрядів або комутаційних процесів у мережі.

На стороні вищої напруги 35 кВ приймаємо до встановлення полімерний обмежувач перенапруги типу ОПНп-35/40,5/10/2 УХЛ1. Дані обмежувачі застосовуються для захисту обладнання розподільчих пристроїв і мереж класу напруги 35 кВ з ізолюваною або компенсованою нейтраллю. Вони забезпечують обмеження грозових і комутаційних перенапруг у межах допустимої пропускної здатності.

Обмежувачі перенапруги типу ОПНп-35 кВ призначені для роботи на відкритому повітрі в умовах помірного та холодного клімату при температурі навколишнього середовища від -60 до +60°C.

На стороні 10 кВ для захисту обладнання ЗРП приймаємо до встановлення обмежувачі перенапруги типу ОПНп-10/12/1 УХЛ1. Вони забезпечують захист ізоляції електрообладнання мережі 10 кВ від грозових і комутаційних перенапруг та відповідають умовам експлуатації розподільчого пристрою підприємства.

Вибір запобіжників. Для захисту допоміжного обладнання у шафах КРП передбачається встановлення високовольтних запобіжників. Запобіжники призначені для автоматичного вимкнення пошкодженої ділянки мережі при виникненні струмів короткого замикання або перевантаження.

Для захисту трансформаторів власних потреб приймаємо запобіжники типу ПКТ, які забезпечують вимкнення аварійних струмів та захист трансформаторів від пошкоджень. Для захисту трансформаторів напруги встановлюємо запобіжники типу ПКТН, призначені для роботи в колах вимірювальних трансформаторів напруги.

						Арк.
						63

Обрані запобіжники відповідають номінальній напрузі мережі 10 кВ та мають достатню вимикальну здатність для роботи в умовах можливих коротких замикань у колах трансформаторів напруги.

Для забезпечення комерційного та технічного обліку електричної енергії на ПММ приймаємо до встановлення лічильники типу Альфа А1800 та АСЕ 3000. Дані прилади працюють через вимірювальні трансформатори струму та напруги, тому правильний вибір параметрів ТС і ТН є необхідною умовою точності та надійності обліку електроенергії.

Вибір трансформаторів струму. На вводі 35 кВ приймаємо до встановлення трансформатори струму, вбудовані у ввід силового трансформатора, типу ТВ-35-100/5. Перевірка виконується за номінальною напругою, струмом та допустимим вторинним навантаженням: $U_{\text{мер.}}=35 \text{ кВ} \leq U_{\text{ном}}=35 \text{ кВ}$; $I_{\text{мах}}=85,14 \text{ А} \leq I_{\text{ном}}=100 \text{ А}$; $Z_2=0,333 \text{ Ом} \leq Z_{2 \text{ ном}}=0,6 \text{ Ом}$.

На вводі 10 кВ приймемо трансформатори струму типу ТЛК-10-150У3. Перевірка: $U_{\text{мер.}}=10 \text{ кВ} \leq U_{\text{ном}}=10 \text{ кВ}$; $I_{\text{мах}}=141,92 \text{ А} \leq I_{\text{ном}}=150 \text{ А}$; $i_{\text{уд}}=6,0 \text{ кА} \leq i_{\text{дин}}=81 \text{ кА}$; $Z_2=0,321 \text{ Ом} \leq Z_{2 \text{ ном}}=0,4 \text{ Ом}$.

На відхідних лініях 10 кВ до ТП приймемо до установки трансформатори струму типу ТЛК-10-50У3. Перевірка: $U_{\text{мер.}}=10 \text{ кВ} \leq U_{\text{ном}}=10 \text{ кВ}$; $I_{\text{мах}}=44,35 \text{ А} \leq I_{\text{ном}}=50 \text{ А}$; $i_{\text{уд}}=6,0 \text{ кА} \leq i_{\text{дин}}=52 \text{ кА}$; $Z_2=0,15 \text{ Ом} \leq Z_{2 \text{ ном}}=0,4 \text{ Ом}$.

Для всіх обраних ТС умови вибору виконуються.

Вибір трансформаторів напруги. На шинах 35 кВ головної знижувальної підстанції приймаємо до встановлення два трансформатори напруги типу НОМ-35-72У1 з номінальною потужністю вторинної обмотки: $S_{2\text{ном}}=150 \text{ В}\cdot\text{А}$ в класі точності 0,5. Перевірка по вторинному навантаженню трансформатора напруги: $S_2=4,99 \text{ ВА} \geq S_{\text{ном.тр-ра}}=2\cdot150=300 \text{ ВА}$.

Вибираємо трансформатори напруги на шинах ЗРП типу НАМІ-10 з потужністю $S_{2\text{ном}}=120 \text{ В}\cdot\text{А}$ в класі точності 0,5. Перевіряємо по вторинному навантаженню: $S_2=60,36 \text{ ВА} \leq S_{\text{ном.тр-ра}}=120 \text{ ВА}$.

Як показує розрахунок вторинне навантаження менше номінального, тому трансформатори будуть працювати в обраному класі точності.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Асинхронні двигуни є основним типом електроприводів на підприємствах металообробки та машинобудування, де вони застосовуються для приводу металорізальних верстатів, компресорів, насосів та допоміжних механізмів.

Особливістю їх роботи є значні пускові струми, динамічні перевантаження та змінні режими навантаження, що впливають як на сам електропривод, так і на систему електропостачання підприємства.

Для дослідження таких режимів доцільно застосовувати методи математичного моделювання, які дозволяють аналізувати як усталені, так і перехідні процеси без проведення натурних експериментів.

У даному розділі проведено дослідження асинхронного двигуна потужністю 55 кВт із використанням двох підходів: структурного та імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

7.1 Математична модель АМ в нерухомій системі координат α - β

Математична модель асинхронного двигуна базується на рівняннях електромагнітних процесів у обмотках статора та ротора, а також рівнянні руху ротора.

Для побудови математичної моделі асинхронного двигуна доцільно використовувати нерухому комплексну систему координат, у якій кутова швидкість системи координат дорівнює нулю. У такій системі координат дійсна вісь позначається як α , а уявна - як β .

Перехід до α - β координат дозволяє замінити трифазну систему змінних двома взаємно перпендикулярними складовими, що значно спрощує математичний опис електромагнітних процесів у машині.

У цій системі напруга, струм та потокозчеплення статора і ротора представляються у вигляді комплексних величин, які розкладаються на складові за осями α та β . Це дає можливість описувати процеси в асинхронному двигуні за допомогою двох рівнянь замість трьох фазних.

						Арк.
						65

Після підстановки отриманих складових у загальну систему рівнянь асинхронної машини та розділення дійсної і уявної частин формується система диференціальних рівнянь у координатах α - β :

$$\left. \begin{aligned} u_{S\alpha} &= r i_{S\alpha} + L_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}, \\ u_{S\beta} &= r i_{S\beta} + L_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + p \omega_m \psi_{R\beta}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_{\hat{N}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Представимо систему рівнянь (7.1) в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} u_{S\alpha} &= r(1 + T_S s) i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}, \\ u_{S\beta} &= r(1 + T_S s) i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R s) \psi_{R\alpha} + p \omega_m \psi_{R\beta}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R s) \psi_{R\beta} - p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\ J \omega_m s &= M - M_C. \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

Якщо систему рівнянь (7.2) виразити через струми і потокозчеплення, вона прийме вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 i_{S\alpha} &= (u_{S\alpha} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} + k_R p \omega_m \psi_{R\beta}) \frac{1}{r(1 + T_S s)}, \\
 i_{S\beta} &= (u_{S\beta} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} - k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}) \frac{1}{r(1 + T_S s)}, \\
 \psi_{R\alpha} &= (k_R R_R i_{S\alpha} - p \omega_m \psi_{R\beta}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}, \\
 \psi_{R\beta} &= (k_R R_R i_{S\beta} + p \omega_m \psi_{R\alpha}) \frac{T_R}{(1 + T_R s)}, \\
 M &= \frac{3}{2} p \cdot k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\
 \omega_m &= (M - M_C) \frac{1}{J_S}.
 \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

Отримана система рівнянь (7.3) описує взаємозв'язок між напругами, струмами, потокозчепленнями та кутовою швидкістю двигуна і є основою для побудови структурної моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

Використання нерухомої системи координат є доцільним при дослідженні пускових і перехідних режимів, оскільки дозволяє безпосередньо аналізувати зміну електромагнітних та механічних величин у часі.

7.2 Розрахунок параметрів математичної моделі

Для побудови моделі необхідно визначити параметри схеми заміщення асинхронного двигуна. Розрахунок параметрів математичної моделі виконано для асинхронного двигуна потужністю 55 кВт. Основні технічні характеристики досліджуваного двигуна наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 - Технічні характеристики двигуна 4A225M2У3

P_n ,	U_{1n} ,	S_n ,	η ,	$S_{кр}$,	p	$\cos \varphi$	Відносні параметри					J ,
							$X_{\mu*}$	R'_{1*}	X'_{1*}	R''_{2*}	X''_{1*}	
кВт	В	%	%	%	-	-	-	-	-	-	-	кг·м ²
55	220	1.8	91	11	1	0.92	6.6	0.026	0.092	0.019	0.12	0.25

Таблиця містить номінальні та довідкові параметри, необхідні для визначення електричних і механічних характеристик двигуна, а також для подальшого розрахунку параметрів його схеми заміщення. До них належать номінальна потужність, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, напруга, ковзання в номінальному режимі, критичне ковзання та момент інерції, які використовуються при дослідженні динамічних режимів роботи двигуна, а також відносні параметри, що характеризують електромагнітні властивості машини.

Для аналізу електромагнітних процесів у двигуні використовуються еквівалентні схеми заміщення, зокрема Γ -подібна та T -подібна схеми, які наведені на рисунку 7.1.

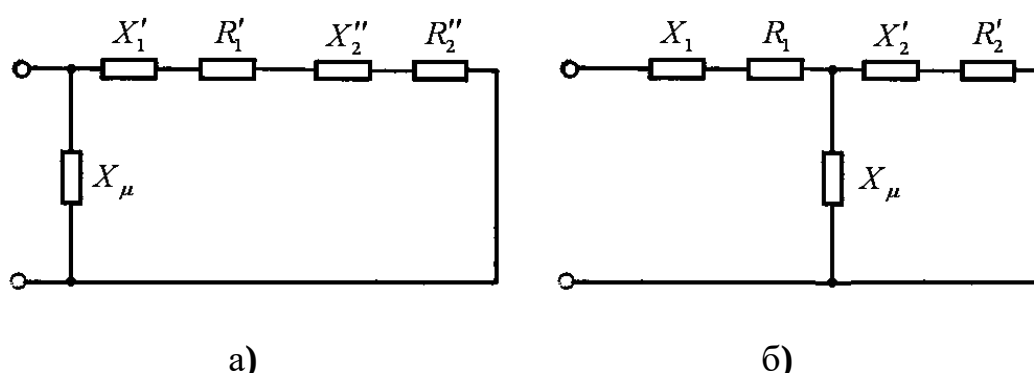


Рис. 7.1 - Схеми заміщення АД: а) Γ -подібна; б) T -подібна

Γ -подібна схема заміщення застосовується для представлення електричних параметрів двигуна у спрощеному вигляді, тоді як T -подібна схема дозволяє більш точно врахувати взаємозв'язок між параметрами статора та ротора, що є важливим при дослідженні перехідних процесів.

На основі відомих технічних характеристик двигуна та параметрів Γ -подібної схеми заміщення здійснюється розрахунок параметрів T -подібної схеми. Отримані значення використовуються для визначення коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь математичної моделі, а також для налаштування параметрів блоків у структурній та імітаційній моделях асинхронного двигуна.

На основі паспортних даних двигуна визначаються:

- номінальний струм;
- базовий опір;
- активні опори статора і ротора;

- індуктивності розсіювання;
- взаємна індуктивність;
- механічні параметри.

Розрахунок параметрів здійснюється на основі відносних значень параметрів двигуна з подальшим переходом до абсолютних одиниць.

Статорний струм АД:

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.91 \cdot 0.92} = 99,54 \text{ A}.$$

Кутова частота статорного струму АД:

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Значення опорів:

- базісного, Ом:

$$z_{баз} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}} = \frac{220}{99.54} = 2.21$$

- реактивного опору
розсіювання фази
статора, в.о.:

$$X_{1*} = \frac{2 X'_{1*} \cdot X_{\mu*}}{X_{\mu*} \cdot \sqrt{X_{\mu*}^2 + 4 \cdot X'_{1*} \cdot X_{\mu*}}} = \frac{2 \cdot 0.092 \cdot 6.6}{6.6 \cdot \sqrt{6.6^2 + 4 \cdot 0.092 \cdot 6.6}} = 0.091$$

- коефіцієнту c_1 :

$$c_1 = \frac{X'_{1*}}{X_{1*}} = \frac{0.092}{0.091} = 1.0138$$

- реактивного опору
розсіювання фази
статора, Ом:

$$X_1 = \frac{X'_{1*} \cdot Z_{\delta}}{c_1} = \frac{0.092 \cdot 2.21}{1.0138} = 0.201$$

- активного опору
фази статора, Ом:

$$R_1 = R_s = \frac{R'_{1*} \cdot Z_{\delta}}{c_1} = \frac{0.026 \cdot 2.21}{1.0138} = 0.0567$$

- реактивний опору
розсіювання фази
ротора, Ом:

$$X'_2 = \frac{X''_{2*} \cdot Z_{\delta}}{c_1^2} = \frac{0.12 \cdot 2.21}{1.0138^2} = 0.2581$$

- активного опору
фази ротора, Ом:

$$R'_2 = R_r = \frac{R''_{2*} \cdot Z_{\delta}}{c_1^2} = \frac{0.041 \cdot 2.21}{1.0138^2} = 0.0409$$

- реактивний опору
взаємоіндукції, Ом:

$$X_{\mu} = X_{\mu^*} \cdot Z_{\sigma} = 6,6 \cdot 2,21 = 14,5874$$

Значення індуктивностей:

- розсіювання фази
статора, Гн:

$$L_{1S} = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{0.201}{314} = 0.0006388$$

- розсіювання фази
ротора, Гн:

$$L_{2S} = \frac{X'_2}{\omega_1} = \frac{0.2581}{314} = 0.000822$$

- взаємоіндукції, Гн:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{1.5 \cdot \omega_1} = \frac{14.5874}{1.5 \cdot 314} = 0.031$$

- повної для фази
статора, Гн:

$$L_S = L_{\mu} + L_{1S} = 0.031 + 0.0006388 = 0.0316$$

- повної для фази
ротора, Гн:

$$L_R = L_{\mu} + L_{2S} = 0.031 + 0.000822 = 0.0318$$

Втрати потужності в двигуні:

- сумарні, Вт:

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_{2H} = \frac{55000}{0.91} - 55000 = 5440$$

- електричні в
обмотці
статора, Вт:

$$\Delta P_{e1} = m \cdot I_{1H}^2 \cdot R_S = 3 \cdot 99.538 \cdot 0.0567 = 1685$$

-
намагнічуючий
струм, А:

$$I_{\mu} = \frac{U_{1H}}{X_1 + X_m} = \frac{220}{0.2006 + 14.5874} = 14.88$$

- в сталі
статора, Вт:

$$\Delta P_{cm1} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_{\mu}^* \cdot Z_{\sigma\sigma\sigma} = 3 \cdot 14.88^2 \cdot 0.1 \cdot 2.21 = 147$$

- основні в
обмотці
ротора, Вт:

$$\Delta P_{e2} = s_H \cdot \left(\frac{P_{2H}}{\eta} - \Delta P_{e1} - \Delta P_{e2} \right) = 0.018 \cdot \left(\frac{55000}{0.91} - 1685 - 147 \right) = 1055$$

- загалом в
сталі та ме-
ханічні, Вт

$$(\Delta P_{cm1} + \Delta P_{mex}) = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{e1} - \Delta P_{e2} = 5440 - 1685 - 1055 = 2700$$

-механічні, Вт

$$\Delta P_{mex} = (\Delta P_{cm1} + \Delta P_{mex}) - \Delta P_{cm1} = 2700 - 147 = 2553$$

						Арк.
						70

Швидкість ідеального ХХ та номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ с}^{-1}.$$

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n) = 314 \cdot (1 - 0,018) = 308,3 \text{ с}^{-1}.$$

Значення коефіцієнту в'язкого тертя:

$$B_m = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega_n^2} = \frac{2553}{308,3^2} = 0,025 \text{ Н} \cdot \text{мс}.$$

Результати розрахунків зведено до таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 - Основні розрахункові параметри двигуна

P, кВт	I_{1n} , А	$Z_{\text{баз}}$, Ом	X_1 , Ом	R_1 , Ом	L_{1s} , 10^{-3} Гн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн	L_s , Гн
55	99.54	2.21	0.201	0.0567	0.6388	14.5874	0.031	0.0316
ω_0 , с^{-1}	X_{1*}	c_1	X'_2 , Ом	R'_2 , Ом	L_{2s} , 10^{-3} Гн	L_R , Гн	ω_n , с^{-1}	B_m , Н·мс
314	0.091	1.0138	0.2581	0.0409	0.822	0.0318	308.3	0.025

Розрахунок коефіцієнтів, що входять в модель:

$$r = R_1 + \frac{L_{\mu}^2}{L_R^2} \cdot R'_2 = 0.0567 + \frac{0.031^2}{0.0318^2} \cdot 0.0409 = 0.095463 \text{ Ом}.$$

$$L'_S = L_S - \frac{L_{\mu}^2}{L_R^2} = 0.0316 - \frac{0.031^2}{0.0318} = 0.0014 \text{ Гн}. \quad k_R = \frac{L_{\mu}}{L_R} = \frac{0.031}{0.0318} = 0.97.$$

$$T'_S = \frac{L'_S}{r} = \frac{0.0014}{0.095463} = 0.015 \text{ с}. \quad T_R = \frac{L_R}{R'_2} = \frac{0.0318}{0.0409} = 0.778 \text{ с}.$$

Коефіцієнти структурної моделі представлені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Розрахункові коефіцієнти структурної моделі

Потужність двигуна, кВт	r	L'_S	k_R	T_R	T'_S
55	0,0955	0,97	0,015	0,778	0,0014

Отримані параметри використовуються при побудові як структурної, так і імітаційної моделей двигуна.

7.3 Структурне моделювання асинхронного двигуна

Структурне моделювання полягає у представленні математичної моделі двигуна у вигляді системи функціональних блоків, які реалізують відповідні диференціальні рівняння.

Модель реалізована в середовищі Simulink із використанням стандартних блоків (рис.7.2):

- інтеграторів;
- підсилювачів;
- суматорів;
- передавальних функцій.

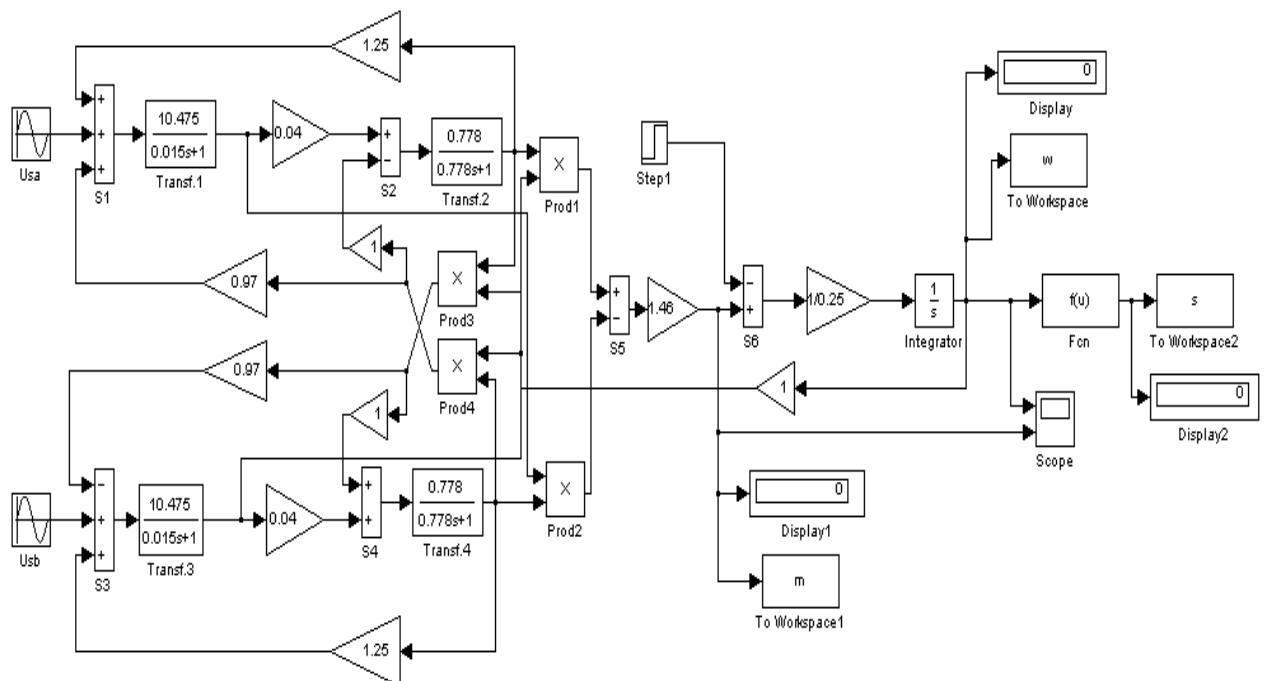


Рис.7.2 - Схема структурної моделі АД в середовищі Simulink

У структурній моделі асинхронного двигуна джерела живлення реалізуються за допомогою блоків *Usa* та *Usb*, які формують гармонічні сигнали. При цьому сигнал *Usa* задається у вигляді косинусоїдальної функції, а *Usb* - синусоїдальної, що відповідає представленню трифазної системи в нерухомій системі координат $\alpha-\beta$.

$$U_{sa} = U_{1n} \cdot \cos \omega_1 \cdot t; \quad U_{sb} = U_{1n} \cdot \sin \omega_1 \cdot t.$$

Налаштування генераторів сигналів включає вибір типу сигналу (*Time-Based*), задання амплітуди, яка відповідає номінальному значенню фазної напруги, відсутність постійної складової, а також встановлення кутової частоти, що відповідає частоті мережі. Початкова фаза сигналів задається таким чином, щоб забезпечити ортогональність складових: для косинусоїдального сигналу - $\pi/2$, для синусоїдального - 0. Дискретність моделювання приймається нульовою, що відповідає безперервному режиму.

Для реалізації динамічних властивостей двигуна використовується блок *Transfer Fcn*, який дозволяє моделювати ланки з передаточними функціями. За допомогою цього блоку реалізуються залежності, що описують електромагнітні процеси в статорі та роторі.

Візуалізація результатів моделювання здійснюється за допомогою блоку *Scope*, який забезпечує відображення перехідних процесів зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту у функції часу.

Навантаження на валу двигуна задається блоком *Step*, який формує ступінчасту зміну моменту опору, що дозволяє дослідити реакцію двигуна на зміну режиму роботи.

Для визначення ковзання використовується блок *Fcn*, у якому реалізується відповідна аналітична залежність, що пов'язує швидкість ротора із синхронною швидкістю обертання.

Збереження результатів моделювання здійснюється за допомогою блоку *Workspace*, який записує отримані дані у вигляді масивів у робочу область

MATLAB. Це дозволяє виконувати подальшу обробку результатів, зокрема побудову графіків та аналітичний аналіз.

Параметри блоку збереження включають задання імен змінних, під якими результати зберігаються у робочому середовищі, необмежену кількість точок моделювання, одиничний коефіцієнт дискретизації, а також формат збереження даних у вигляді масивів.

Після запуску моделі та завершення процесу моделювання здійснюється аналіз отриманих результатів (рис.7.3). Відображення динамічних характеристик виконується за допомогою графічного блоку *Scope*, який дозволяє спостерігати залежності кутової швидкості та електромагнітного моменту від часу, тобто $\omega=f(t)$ та $M=f(t)$.

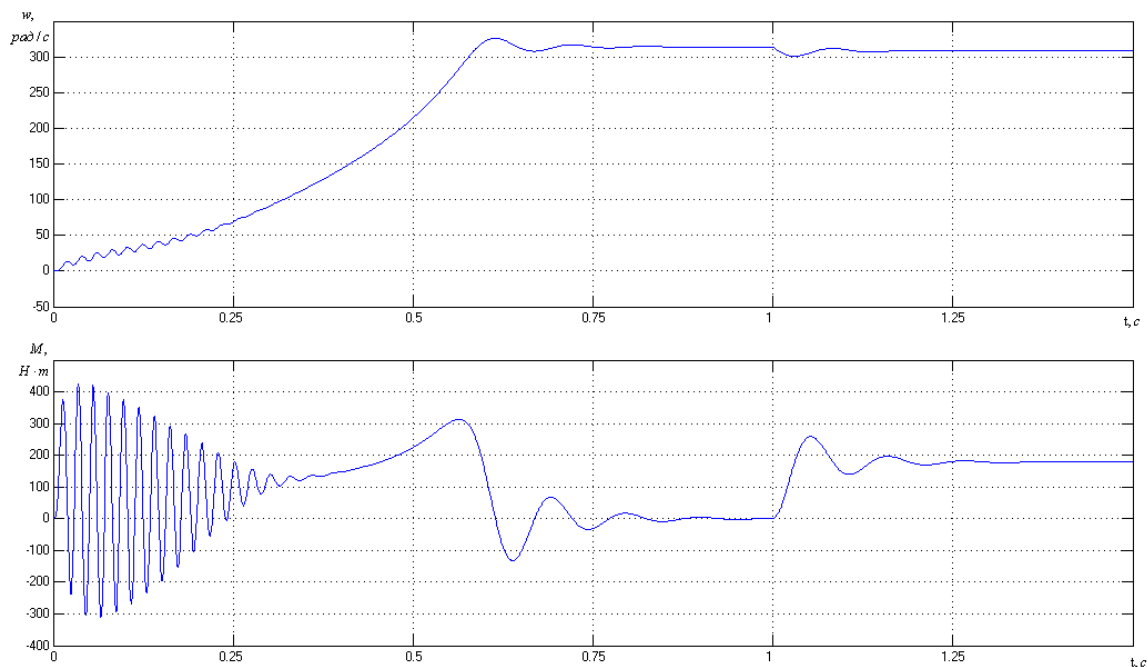


Рис. 7.3 - Результати моделювання $\omega=f(t)$ та $M=f(t)$

На початковому етапі пуску двигуна спостерігаються коливальні процеси швидкості та моменту, що зумовлено перехідним характером електромагнітних процесів. У подальшому двигун розганяється до швидкості, близької до швидкості холостого ходу ω_0 , при якій електромагнітний момент зменшується і наближається до нуля.

При прикладанні навантаження на вал двигуна відбувається зниження швидкості обертання до номінального значення ω_n , при цьому електромагнітний момент зростає та встановлюється на рівні номінального значення M_n .

Для більш повного аналізу роботи асинхронного двигуна виконаємо побудову його природних механічних характеристик $\omega=f(M)$ та $s=f(M)$ двома способами: аналітичним методом та із використанням структурної моделі.

Аналітичний розрахунок базується на визначенні електромагнітного моменту двигуна як функції ковзання, а також залежності кутової швидкості від ковзання. Основними розрахунковими параметрами при цьому є номінальне ковзання, критичне ковзання та відповідні значення моменту.

Основні формули:

$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_R}{s}}{\omega \cdot \left[\left(R_s + c_1 \cdot \frac{R_R}{s} \right)^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_2)^2 \right]}$	$s_j = \frac{\omega_0 - \omega_j}{\omega_0}$
$s_{\hat{E}\hat{D}} = \frac{R'_R}{\sqrt{R_s^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_2)^2}}$	$\omega_p = \frac{(1-s) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}$

Номінальне ковзання визначається як відносна різниця між синхронною та фактичною швидкістю ротора, тоді як критичне ковзання відповідає режиму, при якому двигун розвиває максимальний електромагнітний момент.

Кутова швидкість ротора пов'язана з ковзанням оберненою залежністю, що дозволяє визначити робочі точки двигуна при різних навантаженнях.

Для побудови механічних характеристик виконано розрахунок значень електромагнітного моменту та кутової швидкості при різних значеннях ковзання. Отримані результати зведено до таблиці 7.4.

Аналіз розрахункових даних показує, що зі збільшенням ковзання швидкість обертання ротора зменшується, тоді як електромагнітний момент спочатку зростає, досягаючи максимального значення, а потім поступово зменшується.

Таблиця 7.4 – Результати розрахунку МХ АД

s	0	0.018	0.09	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
M , Н·м	0	181.78	436.57	333.61	250.39	197.41	162.1	137.27	118.87	104.77	93.64	84.5
ω , рад/с	314	308.39	286.12	251.22	219.77	188.42	157,0	125.59	94.19	62.79	31.38	0

Побудовані за отриманими даними механічні характеристики асинхронного двигуна наведені на рисунку 7.4.

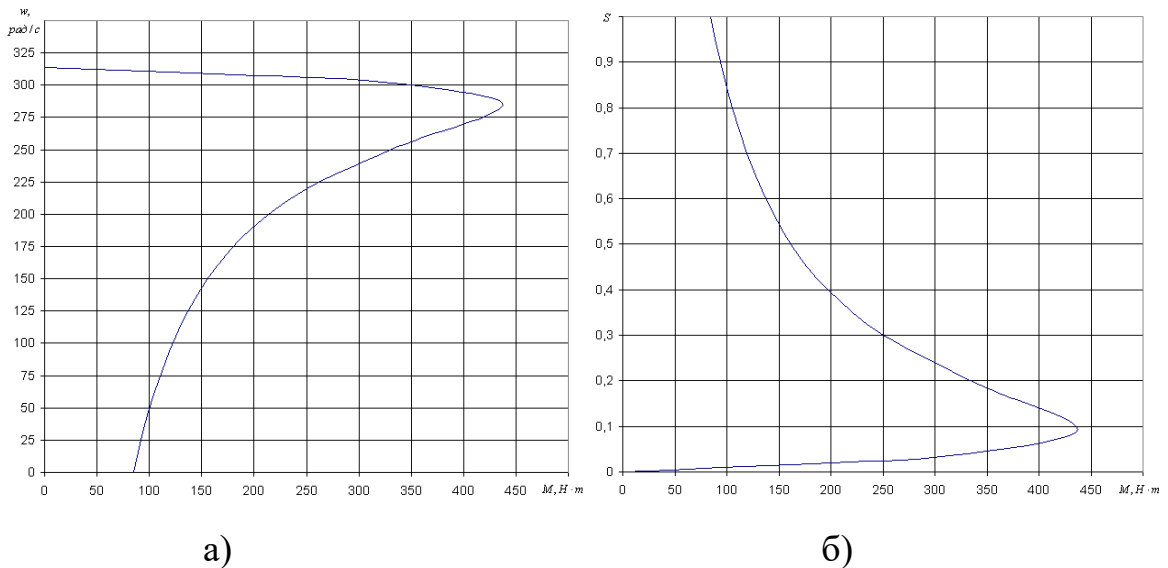


Рис.7.4 – Розрахункові МХ АД:

а) $\omega = f(M)$; б) $s = f(M)$

Для побудови природних механічних характеристик асинхронного двигуна в середовищі MATLAB/Simulink можуть бути застосовані два підходи:

- задання моменту навантаження вручну;
- використання моделі допоміжної електричної машини, наприклад двигуна постійного струму, що формує навантаження на валу асинхронного двигуна.

Спочатку розглянемо побудову характеристик АД за першим методом, який полягає у поетапній зміні моменту навантаження на валу двигуна.

Для отримання механічних характеристик значення моменту опору задається в блоці моделі та змінюється в діапазоні від нуля до значення, близького до критичного моменту $M_{кр}$. При кожному значенні навантаження фіксуються

відповідні значення кутової швидкості та ковзання, які відображаються на вимірювальних блоках моделі.

Слід зазначити, що при такому підході формується лише робоча ділянка механічної характеристики, яка відповідає стійким режимам роботи двигуна.

Розраховані залежності швидкості та ковзання від моменту навантаження наведені у таблиці 7.5.

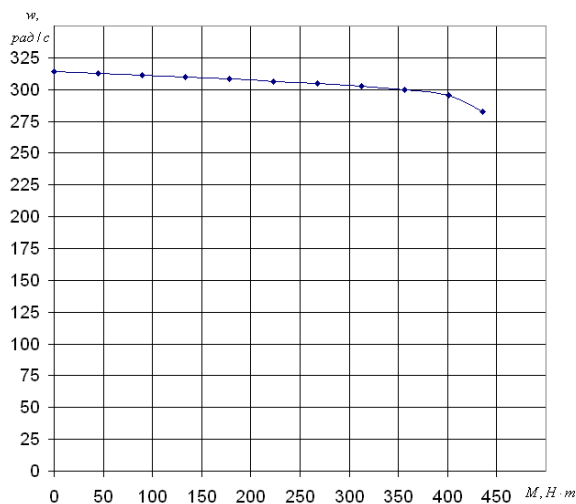
Таблиця 7.5 - Дані характеристик $\omega = f(M)$ и $s = f(M)$ при завдані моменту навантаження на валу вручну

$M, H \cdot m$	0	44.56	89.27	133.7	178.4	223.2
$\omega, \text{рад/с}$	314	312.7	311.3	309.9	308.4	306.1
s	0	0.042	0.0085	0.013	0.0179	0.023

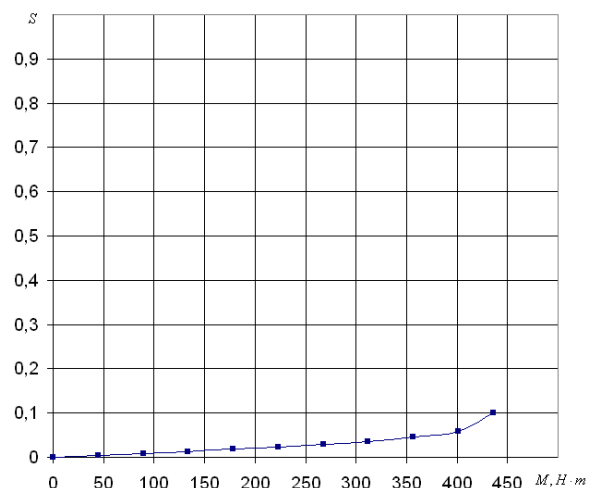
Продовження таблиці 7.5

$M, H \cdot m$	267.6	312.1	356.7	401.2	435.8
$\omega, \text{рад/с}$	304.8	302.6	299.7	295.5	282.5
s	0.029	0.036	0.045	0.059	0.1

На основі цих даних побудовано робочу область природної механічної характеристики, яка наведена на рисунку 7.5.



а)



б)

Рис.7.5 – Робочі ділянки природної МХ, що отримані за допомогою структурної моделі: а) $M = f(\omega)$; б) $M = f(s)$

Аналіз отриманих даних показує, що зі зростанням моменту навантаження кутова швидкість ротора поступово зменшується, тоді як ковзання збільшується, що відповідає фізичній природі роботи асинхронного двигуна.

Розглянемо використання моделі допоміжної електричної машини. Структурна схема моделі з використанням двигуна постійного струму як навантаження наведена на рисунку 7.6.

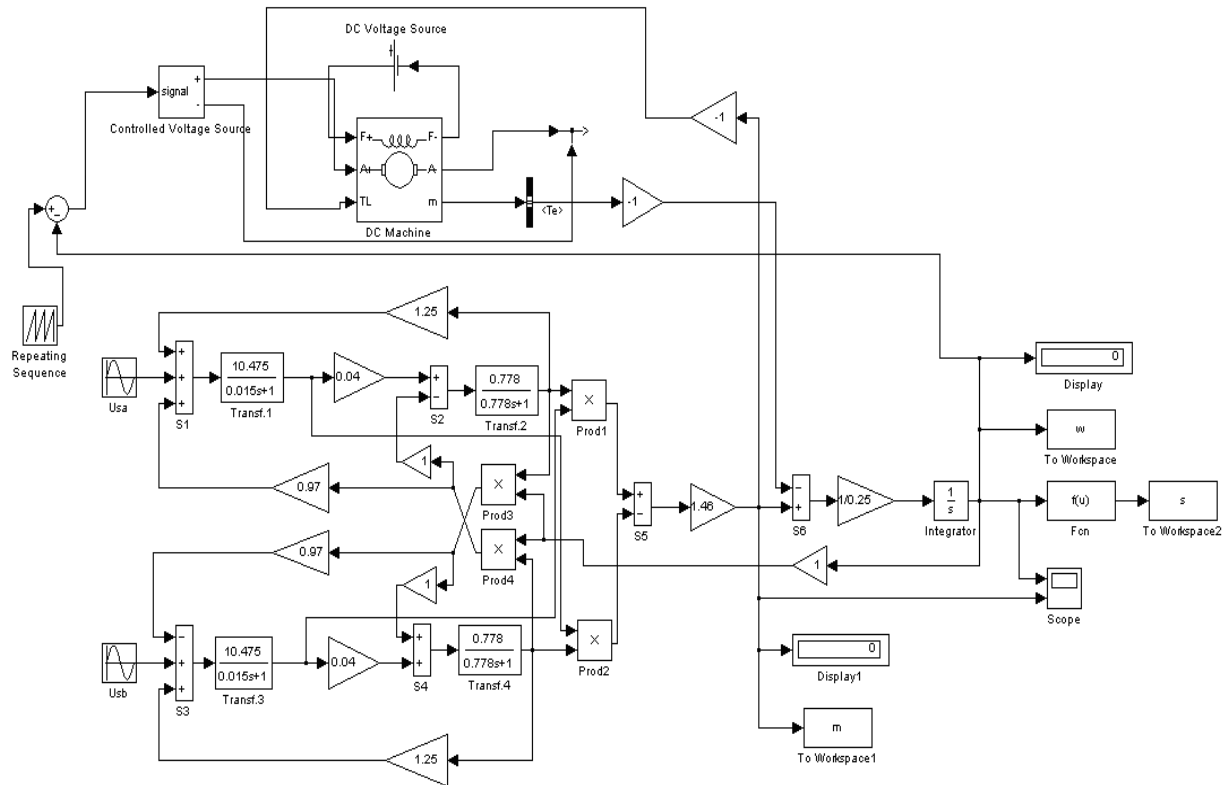


Рис. 7.6 - Структурна модель АД в нерухомій системі координат с ДПС

Дана модель включає дві електричні машини: асинхронний двигун, який досліджується, та двигун постійного струму, що виконує роль регульованого навантаження. Кожна машина має власне джерело живлення: асинхронний двигун підключений до трифазної мережі, а двигун постійного струму - до джерел живлення якоря та обмотки збудження.

Взаємодія між машинами реалізується через спільний вал: електромагнітний момент асинхронного двигуна діє як навантаження для двигуна постійного струму, тоді як момент ДПС створює навантаження для асинхронного двигуна. У сталому

У результаті моделювання отримано природні механічні характеристики асинхронного двигуна $\omega=f(M)$ та $s=f(M)$, які добре узгоджуються з результатами аналітичних розрахунків.

Побудовані характеристики для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором потужністю 55 кВт наведені на рисунку 7.7.

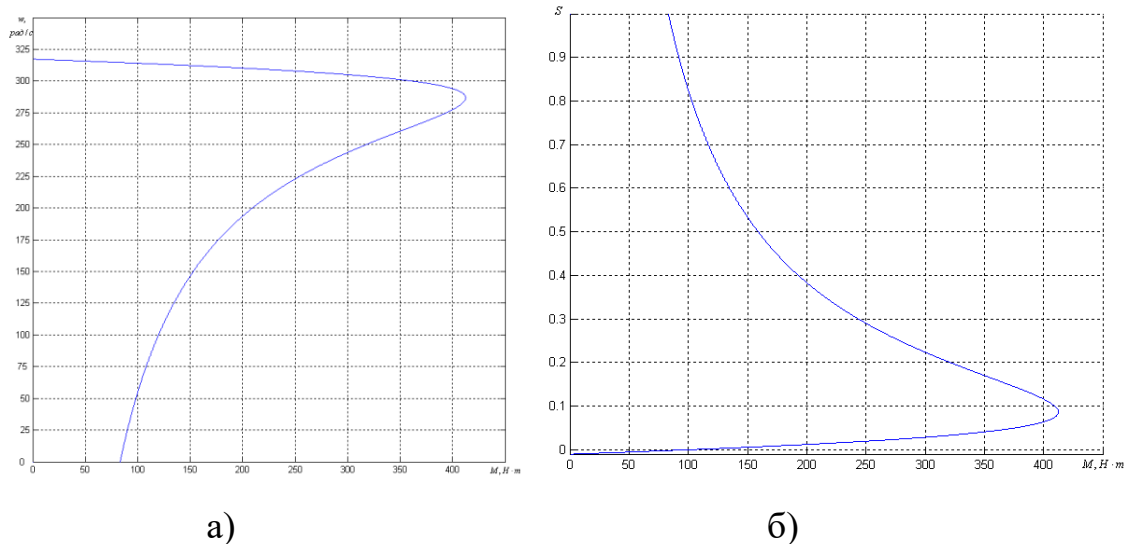


Рис.7.7 – Природні механічні характеристики, отримані за допомогою структурної моделі з ДПС: а) $M = f(\omega)$; б) $M = f(s)$

Порівняння методів побудови механічних характеристик. Для оцінки ефективності підходів до побудови механічних характеристик асинхронного двигуна було використано два методи: задання моменту навантаження вручну та моделювання навантаження за допомогою двигуна постійного струму.

Перший метод відзначається простотою реалізації та не потребує ускладнення моделі. Він дозволяє отримати основні робочі ділянки механічної характеристики шляхом поетапної зміни моменту навантаження. Однак його можливості обмежені, оскільки таким способом можна дослідити лише стійкі режими роботи двигуна. При цьому процес отримання характеристик є дискретним і залежить від кількості заданих точок.

Другий метод, що базується на використанні двигуна постійного струму як регульованого навантаження, забезпечує більш повне відтворення реальних умов роботи електропривода. Такий підхід дозволяє автоматично формувати

навантаження та отримувати безперервні механічні характеристики у широкому діапазоні режимів, включаючи як стійкі, так і нестійкі області.

Крім того, застосування ДПС дає можливість досліджувати динамічні процеси, плавно змінювати швидкість та момент, а також більш точно оцінювати поведінку двигуна при різних режимах навантаження. Порівнювальну характеристику методів наведено в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Порівняння методів побудови механічних характеристик

Критерій	Ручне задання моменту	Метод з ДПС
Складність моделі	Низька	Вища
Точність	Середня	Висока
Тип характеристик	Дискретні	Безперервні
Стойкі режими	+	+
Нестойкі режими	-	+
Динамічні процеси	Обмежено	+
Зручність	Висока	Середня

Таким чином, метод ручного задання моменту є доцільним для спрощеного аналізу та навчальних цілей, тоді як використання моделі двигуна постійного струму забезпечує більш точне дослідження механічних характеристик асинхронного двигуна. Метод з ДПС є більш універсальним і точним, оскільки дозволяє отримати повну механічну характеристику двигуна, включаючи нестійкі режими, що неможливо при ручному задання навантаження.

Структурна модель дозволяє детально досліджувати перехідні процеси, що є особливо важливим при аналізі пускових режимів.

7.4 Імітаційне моделювання АД в MATLAB/Simulink

Імітаційне моделювання асинхронного двигуна виконується у середовищі MATLAB/Simulink із використанням бібліотеки Simscape Electrical (SimPowerSystems), яка містить готові моделі електричних машин.

Для дослідження використовується віртуальна модель асинхронного двигуна, варіанти якої наведені на рисунку 7.8. Бібліотека дозволяє обирати між моделями двигунів із фазним ротором та короткозамкненим ротором. У даній

роботі застосовано модель з короткозамкненим ротором як найбільш характерну для промислових електроприводів.

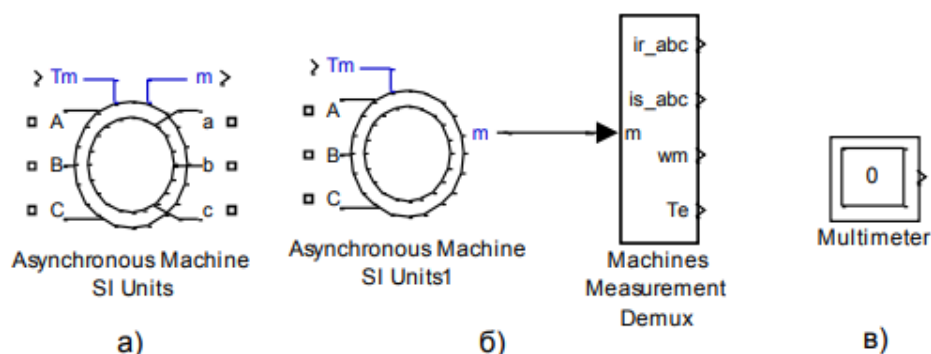


Рис. 7.8 - Віртуальна модель АД: а) з фазним ротором;
б) з КЗ ротором; в) вимірювання параметрів

Підключення двигуна до мережі здійснюється через клема статора А, В, С, які призначені для подачі трифазної напруги. Для моделі з фазним ротором передбачені також додаткові виводи обмотки ротора (а, b, с), що можуть використовуватися для підключення зовнішніх елементів.

Налаштування параметрів двигуна виконується через діалогове вікно моделі, у якому всі величини задаються в абсолютних одиницях відповідно до системи SI. Це дозволяє безпосередньо використовувати паспортні та розрахункові дані двигуна.

У процесі налаштування обирається тип ротора (*Rotor type*), де доступні два варіанти: двигун з фазним ротором (*Wound*) або з короткозамкненим ротором (*Squirrel-cage*).

Також задається система координат (*Reference frame*), у якій здійснюється опис процесів у машині. Доступні три варіанти:

- система координат, пов'язана з ротором (*Rotor*);
- нерухома система координат (*Stationary*), яка є найбільш зручною для аналізу перехідних процесів;
- синхронно обертаюча система координат (*Synchronous*).

Для подальшого аналізу роботи двигуна до його виходу підключається вимірювальний блок, який через спеціальний демультиплексор (*Machine Measurement Demux*) дозволяє отримувати необхідні електромеханічні параметри.

Приклад реалізації віртуальної моделі асинхронного двигуна у середовищі Simulink наведено на рисунку 7.9.

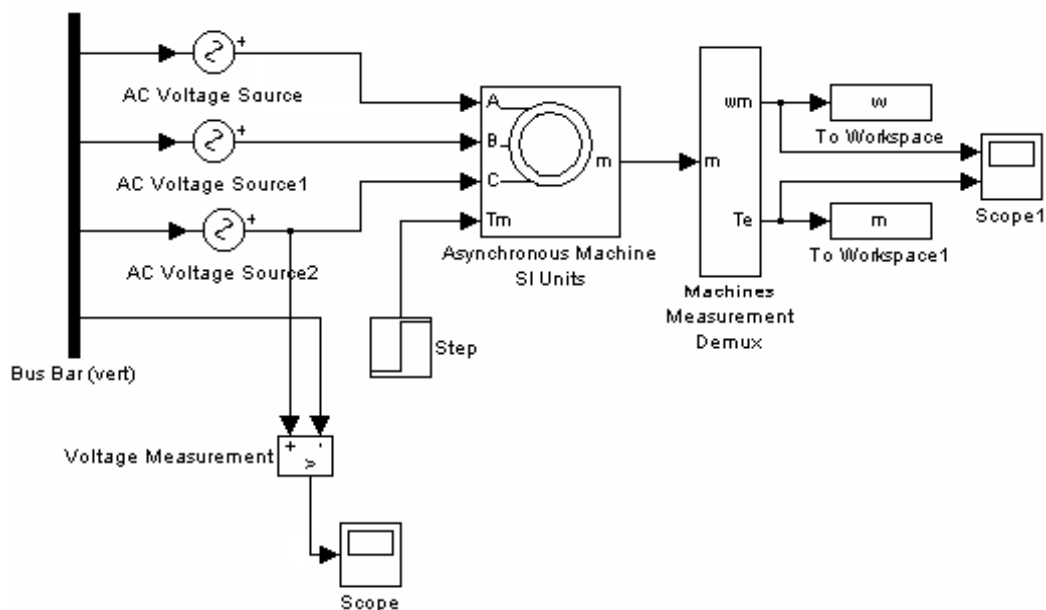


Рис. 7.9 - Схема віртуальної моделі АД в середовищі Simulink

Віртуальна модель трифазного асинхронного двигуна, представлена на рисунку 7.9, відтворює роботу машини з короткозамкненим ротором на основі її математичного опису. Реалізація моделі здійснюється шляхом задання параметрів двигуна у відповідному блоці Simulink, що дозволяє відтворити його електромеханічні характеристики в реальних умовах роботи.

У процесі налаштування моделі вводяться основні номінальні та конструктивні параметри двигуна. До них належать номінальна потужність, лінійна напруга та частота живлення, а також електричні параметри обмоток - активні опори та індуктивності розсіювання статора і ротора. Крім того, задається взаємна індуктивність, яка характеризує магнітний зв'язок між обмотками, а також механічні параметри, зокрема момент інерції та коефіцієнт втрат на тертя. Число пар полюсів визначає синхронну швидкість обертання двигуна.

Для контролю роботи моделі використовується вимірювальний вихід, який дозволяє отримувати основні електромеханічні величини. У даній схемі аналізуються кутова швидкість обертання ротора та електромагнітний момент, що відображаються у вигляді часових залежностей.

Живлення двигуна реалізується за допомогою блоку *AC Voltage Source*, який формує трифазну систему синусоїдальних напруг. Параметрами цього блоку є амплітуда напруги, частота та фазовий зсув між фазами, що забезпечує моделювання симетричної трифазної мережі.

З'єднання елементів електричної схеми виконується за допомогою блоку *Bus Bar*, який забезпечує коректну передачу сигналів між компонентами моделі та спрощує структуру схеми.

У результаті моделювання досліджується процес пуску двигуна та його робота при зміні навантаження (рис.7.10). На початковому етапі спостерігаються перехідні процеси, що проявляються у вигляді коливань електромагнітного моменту та швидкості. У подальшому двигун виходить на режим холостого ходу, при якому момент наближається до нуля.

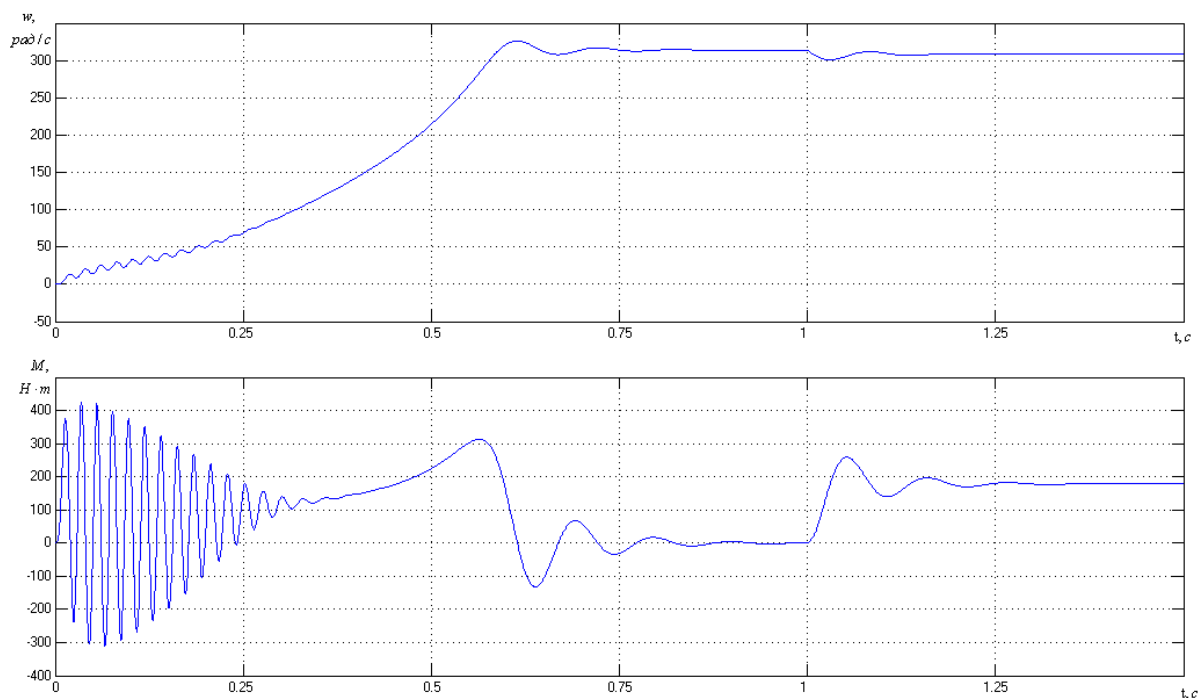


Рис.7.10 - Криві швидкості і моменту у функції часу при пуску на холостому ході $M_c=0$ і збільшенні навантаження $M_c=M_H$ отримані на віртуальній моделі

При прикладанні навантаження відбувається зниження швидкості обертання до номінального значення, а електромагнітний момент встановлюється на рівні, що відповідає заданому навантаженню. Подальше дослідження виконано шляхом побудови природних механічних характеристик $\omega=f(M)$ та $s=f(M)$ із використанням імітаційної моделі при ручному заданні моменту навантаження на валу двигуна.

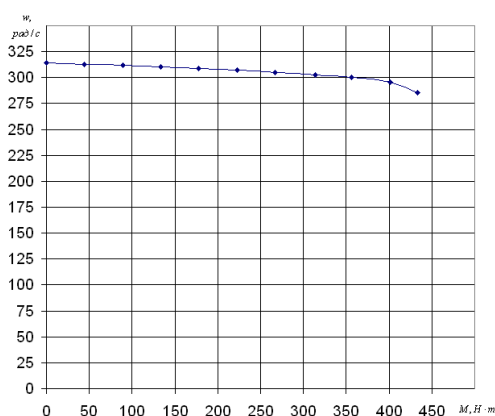
Для цього момент опору змінюється в заданому діапазоні, а відповідні значення кутової швидкості та ковзання визначаються за результатами моделювання. Отримані дані наведено в таблиці 7.8.

Таблиця 7.8 - Дані характеристик при ручному заданні навантаження

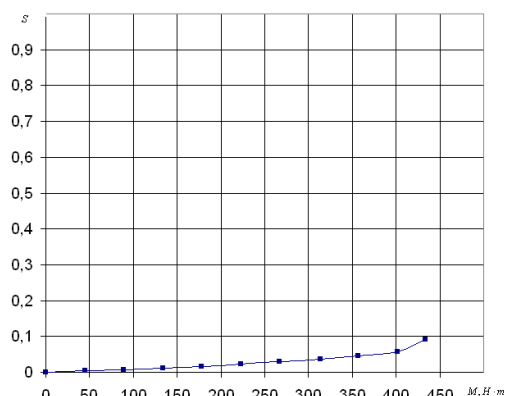
M , Н·м	0	45.02	90.13	135.04	179.88	224.83	269.27	316.74	359.96	405.52	435,81
ω , рад/с	314	316.03	314.62	313.20	311.69	309.97	308.05	305.83	303.00	298.66	287.95
s	0	0.0036	0.0081	0.0126	0.0172	0.0232	0.0293	0.0364	0.0455	0.0586	0.0929

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням моменту навантаження кутова швидкість ротора поступово зменшується, тоді як ковзання зростає. Це відповідає фізичним закономірностям роботи асинхронного двигуна.

На основі наведених даних побудовано робочу ділянку природної механічної характеристики, яка представлена на рисунку 7.11.



а)



б)

Рис.7.11 – Робочі ділянки природної МХ, з використанням віртуальної моделі: а) $\omega = f(M)$; б) $s = f(M)$

Для більш повного дослідження характеристик застосовано метод із використанням двигуна постійного струму як регульованого навантаження. Відповідна структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та ДПС наведена на рисунку 7.12.

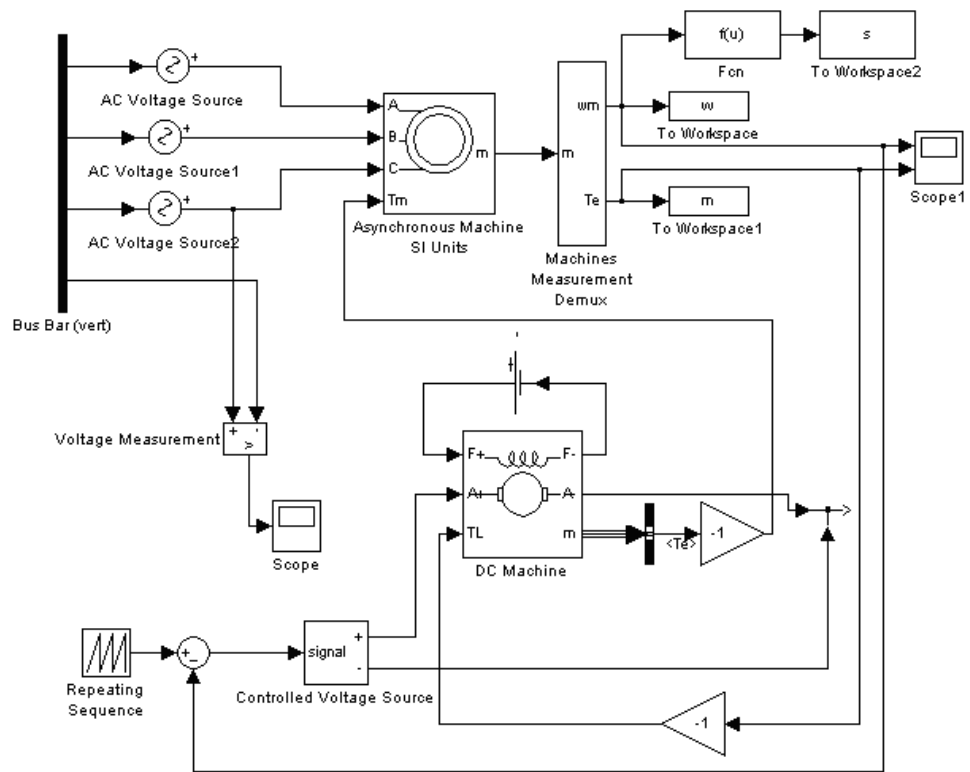


Рис. 7.12 - Структурна модель АД з КЗ ротором з ДПС для отримання природніх механічних характеристик $s = f(M)$ і $\omega = f(M)$

У даній моделі навантаження формується автоматично, що дозволяє отримати безперервні механічні характеристики у широкому діапазоні режимів роботи.

Результати моделювання, отримані із застосуванням цього підходу, наведені на рисунку 7.13.

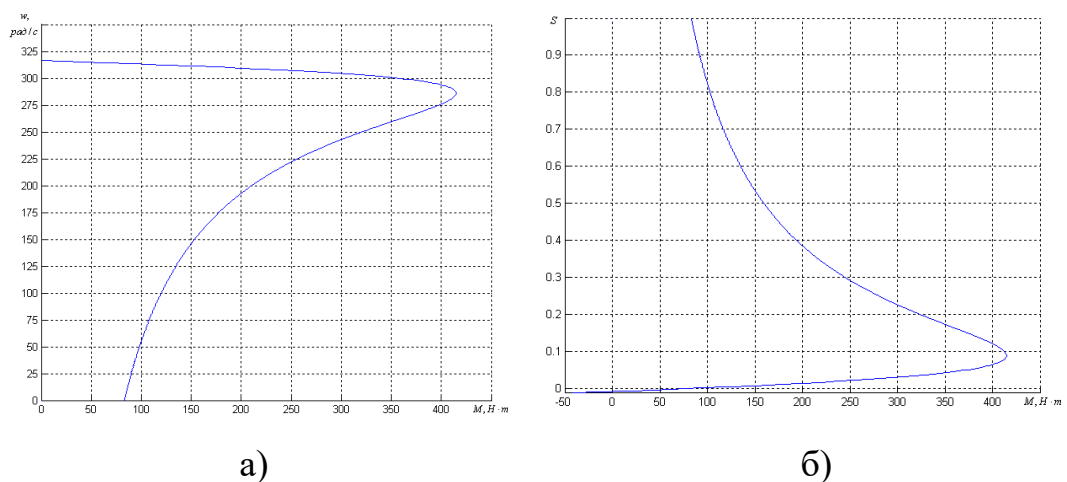


Рис.7.13 – Застосування віртуальної моделі з ДПС для побудови механічних природніх характеристик: а) $\omega = f(M)$; б) $s = f(M)$

Побудовані механічні характеристики $\omega=f(M)$ та $s=f(M)$, отримані за допомогою різних методів моделювання, мають однаковий характер і добре узгоджуються між собою. Це підтверджує адекватність використаних моделей та правильність виконаних розрахунків.

Для оцінки ефективності застосованих підходів проведено порівняння структурної та імітаційної моделей (табл.7.9).

Таблиця 7.9 – Побудова МХ за допомогою структурної та імітаційної моделей

Критерій	Структурна модель	Імітаційна модель
Точність	Висока	Достатня
Гнучкість	Висока	Обмежена
Складність реалізації	Висока	Низька
Аналіз пускових режимів	Детальний	Узагальнений
Побудова характеристик	Повна	Обмежена
Швидкість моделювання	Середня	Висока

Структурна модель забезпечує більш детальний аналіз процесів, зокрема при дослідженні пуску двигуна. Імітаційна модель є більш зручною для швидкого отримання загальних характеристик.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що математичне моделювання є ефективним інструментом аналізу режимів роботи асинхронного двигуна.

Структурне моделювання дозволяє з високою точністю досліджувати перехідні процеси та пускові режими, що є важливим при проектуванні систем електропостачання підприємств.

Імітаційне моделювання забезпечує швидке отримання основних характеристик двигуна та може використовуватися для попереднього аналізу його роботи.

Отримані результати можуть бути використані як при інженерних розрахунках, так і в навчальному процесі при виконанні лабораторних робіт з дисципліни «Електричні машини».

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розглянуто питання проєктування системи електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. Основною метою роботи було розроблення надійної, економічно доцільної та технічно обґрунтованої системи електропостачання з урахуванням виробничих навантажень, вимог до якості електроенергії та безперервності живлення споживачів.

У першому розділі виконано розрахунок електричних навантажень підприємства. Визначено силові та освітлювальні навантаження окремих цехів і підрозділів, розраховано сумарні активні, реактивні та повні навантаження на шинах 0,4 кВ і 10 кВ. На основі отриманих даних побудовано графіки електричних навантажень для різних режимів роботи підприємства, що дозволило оцінити зміну споживання електроенергії протягом доби та року.

Побудовано картограму електричних навантажень, за допомогою якої визначено центр електричних навантажень підприємства. Це дало змогу обґрунтувати раціональне місце розташування головної знижувальної підстанції та цехових трансформаторних підстанцій. Таке розміщення дозволяє зменшити довжину кабельних ліній, знизити втрати електроенергії та покращити техніко-економічні показники системи електропостачання.

У роботі розглянуто два варіанти зовнішнього електропостачання підприємства: живлення кабельними лініями 10 кВ та живлення повітряною лінією 35 кВ із встановленням ГЗП 35/10 кВ. Для кожного варіанта виконано розрахунок струмів, втрат потужності та електроенергії, поточних витрат, капітальних вкладень і можливих збитків від перерв в електропостачанні. За результатами техніко-економічного порівняння встановлено, що більш доцільним є другий варіант, який забезпечує менші зведені витрати та достатній рівень надійності електропостачання.

Окрему увагу приділено компенсації реактивної потужності. У роботі визначено необхідність встановлення компенсуювальних пристроїв, що дозволяє підвищити коефіцієнт потужності, зменшити реактивне навантаження мережі, розвантажити трансформатори та кабельні лінії, а також знизити втрати електроенергії.

Виконано вибір силових трансформаторів головної знижувальної підстанції та цехових трансформаторних підстанцій. Для ГЗП прийнято два трансформатори типу ТМН-4000/35, а для цехових ТП - трансформатори типу ТМ-1000/10/0,4. Їх потужність перевірено за умовами нормального та післяаварійного режимів роботи. Також обґрунтовано розташування і компоновку трансформаторних підстанцій на території підприємства.

Для перевірки працездатності та безпечності системи електропостачання виконано розрахунок струмів короткого замикання. Визначено результуючі опори до точок КЗ, надперехідні та ударні струми короткого замикання. Отримані значення використано для вибору та перевірки високовольного обладнання за умовами комутаційної здатності, електродинамічної та термічної стійкості.

На основі розрахунків обрано кабельні лінії 10 кВ для живлення цехових ТП, повітряну лінію 35 кВ, високовольні вимикачі, роз'єднувачі, обмежувачі перенапруги, запобіжники, трансформатори струму та напруги. Вибране обладнання відповідає розрахунковим параметрам мережі та забезпечує надійну роботу системи електропостачання в нормальних і аварійних режимах.

У спеціальному розділі бакалаврської роботи було досліджено режими роботи асинхронного двигуна на основі математичного моделювання. Розглянуто математичну модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, виконано розрахунок параметрів моделі та побудовано структурну модель. Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink дозволило дослідити електромеханічні процеси, що відбуваються під час роботи двигуна, а також оцінити характер зміни основних параметрів у часі.

Таким чином, у бакалаврській роботі було розроблено технічно обґрунтовану систему електропостачання підприємства металообробки та машинобудування. Виконані розрахунки підтверджують правильність вибору схеми електропостачання, силових трансформаторів, кабельних і повітряних ліній, компенсувальних пристроїв та високовольного обладнання. Прийняті технічні рішення забезпечують необхідний рівень надійності, економічності та безпеки електропостачання підприємства, а отримані результати можуть бути використані для проєктування або модернізації систем електропостачання промислових об'єктів із подібною структурою навантажень.

						Арк.
						89

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В.В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А.І., Величко Т.В., Плешков С.П.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т.- Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2021.-209 с.
2. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В. Навчальний посібник. Видавець Лисенко В.Ф., м.Кропивницький, 2020р. – 272 с.
3. Енергоефективні системи освітлення для промислових та комунально-побутових споживачів / [Плешков П. Г., Орлович А. Ю., Серебренніков С. В., Бегун А. П., Різуненко А. О., Гарасьова Н. Ю., Зінзура В. В] ;– Харків: ТОВ «Цифра Принт», 2018.– 242с.
4. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ, 2015. 83с.
5. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017 . -617 с.
6. Плешков П.Г., Орлович А.Ю., Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування.- Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2007.
7. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков та ін.]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 80 с.
8. Трансформатори ТМ-1000/10/0,4. Львівський трансформаторний завод (ЛТЗ). [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://axiomplus.com.ua/ua/silovyie-transformatoryi/product-86119/>
9. Кабельні лінії [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://ukrprovod.com.ua/uk/provid-kabel/kabel-asbl>

10. Комплектні конденсаторні установки АКУ, КРМ, УКРМ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrocontrol.com.ua/ua/elektroshhitovoe-oborudovanie/kondensatornye-ustanovki-aku-04>
11. Трансформатор ТМН 4000/35/10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energyservice.com.ua/p/1692291597-transformator-tmn-4000-35-10/>
- 12.Вакуумні вимикачі RV-12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rva.rv.ua/product/rv-12/>
13. Трансформатори струму та напруги. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://slavgorenergo.com.ua/ua/g114156745-tplu>
- 14.Лозинський А.О., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Розв’язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 166 с.
- 15.Толочко О.І. Пакети прикладних програм для ПЕОМ. Частина 1 MATLAB, SIMULINK, SIMPOWERSYSTEM. Основи програмування. Лабораторний практикум Київ, НТУУ «КПІ», 2020. – 226 с. Іл.
- 16.Моделювання електромеханічних систем: підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001. – 376 с.
- 17.Кузьмінська О. Г., Шевчук І. В. Комп’ютерні технології в економіці та інженерних розрахунках : навч. посіб. / О. Г. Кузьмінська, І. В. Шевчук. – Київ : КНЕУ, 2017. – 384 с.
- 18.Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.
- 19.W.D. Pietruszka. MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis. Modelbildung, Berechnung und Simulation. – Der B.G. Teubner Verlag, 2006. – 402 S.
20. MATLAB und SIMULINK. Beispielorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme / Josef Hoffman – Bonn Addison-Wesley-Longman. –1998.
- 21.Шевченко І.С., Морозов Д.І. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка асинхронного електропривода: навч. посібник / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Київ: Кафедра, 2014. – 328 с.