

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Проектування системи електропостачання машинобудівного
підприємства з дослідженням впливу тиристорних
перетворювачів на систему обліку електроенергії
Design of an electricity supply system for a machine-building
enterprise, including an investigation into the impact of thyristor
converters on the electricity metering system»**

Виконав здобувач IV курсу групи ЕЕ-23мбз
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Тетяна МИРОНЕНКО
« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ЦЗДО

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ *Петро ПЛЕСШКОВ*

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

_____ *Мироненко Тетяни Олександрівн*

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Проектування системи електропостачання машинобудівного підприємства з дослідженням впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку електроенергії*

Design of an electricity supply system for a machine-building enterprise, including an investigation into the impact of thyristor converters on the electricity metering system

2. Керівник роботи (проекту) *Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор*

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту *02.06.2026 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

Вступ; Визначення електричних навантажень машинобудівного підприємства; Картограма електричних навантажень та визначення центру електричних навантажень; Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємства; Компенсація реактивної потужності; Трансформаторні підстанції; Розрахунок струмів коротких замикань та вибір електрообладнання і високовольтних мереж; Аналіз впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку електричної енергії; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	1.05.26	
2	<i>Визначення електричних навантажень машинобудівного підприємства</i>	5.05.26	
3	<i>Картограма електричних навантажень та визначення центру електричних навантажень</i>	8.05.26	
4	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємства</i>	15.05.26	
5	<i>Компенсація реактивної потужності</i>	19. 05.26	
6	<i>Трансформаторні підстанції</i>	22.05.26	
7	<i>Розрахунок струмів коротких замикань та вибір електрообладнання і високовольтних мереж</i>	25. 05.26	
8	<i>Аналіз впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку електричної енергії</i>	27. 05.26	
9	<i>Висновки</i>	30. 05.26	
10	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	01.06.26	
11	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	02.06.26	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 79 с.; 13 рис.; 22 табл.; 15 джерел.

Мироненко Т. О. Проектування системи електропостачання машинобудівного підприємства з дослідженням впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку електроенергії – Рукопис.

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

В роботі розроблено систему електропостачання машинобудівного підприємства. Виконано розрахунок силових та освітлювальних навантажень, побудовано картограму навантажень. На основі отриманих результатів розроблено схему зовнішнього та внутрішнього електропостачання напругою 10 кВ, обрано кількість і потужність КТП та електропічних трансформаторів, виконано компенсацію реактивної потужності, розрахунок струмів короткого замикання та вибір основного електротехнічного обладнання.

У спеціальному розділі досліджено вплив тиристорних перетворювачів та інших нелінійних навантажень на систему обліку електричної енергії. Розглянуто причини виникнення вищих гармонік, їх вплив на роботу електрообладнання та засобів обліку електроенергії, а також запропоновано заходи щодо покращення якості електроенергії в промислових мережах.

Ключові слова: система електропостачання, електричні навантаження, трансформаторна підстанція, компенсація реактивної потужності, струми короткого замикання, електропічний трансформатор, якість електричної енергії.

ANNOTATION

Qualification work: 79 p.; 13 fig.; 22 tables; 15 sources.

Myronenko T. O. Design of a power supply system for a machine-building enterprise with a study of the influence of thyristor converters on the electricity metering system – Manuscript.

Qualification work in the 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 work develops a power supply system for a machine-building enterprise. The calculation of power and lighting loads is performed, and a load map is constructed. Based on the results obtained, a scheme of external and internal power supply with a voltage of 10 kV was developed, the number and power of KTP and electric furnace transformers were selected, reactive power compensation was performed, short-circuit currents were calculated, and the main electrical equipment was selected.

In a special section, the influence of thyristor converters and other nonlinear loads on the electric energy metering system was investigated. The causes of higher harmonics, their influence on the operation of electrical equipment and electric energy metering devices were considered, and measures were proposed to improve the quality of electric energy in industrial networks.

Keywords: electric power supply system, electric loads, transformer substation, reactive power compensation, short-circuit currents, electric furnace transformer, electric energy quality.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	7
1	ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	8
1.1	Визначення електричних навантажень машинобудівного підприємства до 1000 В.	8
1.2	Визначення освітлювальних навантажень машинобудівного підприємства.....	10
1.3	Визначення електричних навантажень машинобудівного підприємства понад 1000 В.	10
1.4	Дослідження графіків електричних навантажень підприємства.....	19
2	КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	23
3	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	25
3.1	Вибір напруги живлення.....	25
3.2	Вибір схем електропостачання.....	25
4	КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	30
4.1	Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв компенсації.....	30
4.2	Розподіл потужності компенсуючих пристроїв.....	32
4.3	Порівняння варіантів компенсації.....	33
5	ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ.....	35
5.1	Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій.....	35
5.2	Перевірка прийнятих трансформаторів.....	36
5.3	Загальна характеристика вибору трансформаторів.....	37
5.4	Вибір електропічних трансформаторів.....	37
6	РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ.....	40
6.1	Розрахунок струмів коротких замикань.....	40
6.2	Вибір високовольтних вимикачів і комплектного розподільчого пристрою.....	42
6.3	Вибір високовольтних кабелів.....	42

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА				
Розроб	Мироненко				Проектування системи електропостачання машинобудівного підприємства з дослідженням впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірів	Плешков П.Г								
						ЦНТУ, зр.ЕЕ-23мбз			
Н.контр.									
Затв.	Плешков П.Г								

6.4	Вибір трансформаторів струму та напруги.....	43
6.5	Вибір запобіжників для трансформатора власних потреб.....	44
7	АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА СИСТЕМУ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	45
7.1	Вплив несинусоїдальності напруги на технологічне обладнання...	46
7.2	Вплив несиметрії напруги на технологічне обладнання.....	60
7.3	Дослідження впливу несинусоїдальності напруги в системах електропостачання з частотно-керованими приводами.....	62
7.4	Дослідження впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку електроенергії.....	66
7.5	Практичні заходи для зменшення впливу тиристорних перетворювачів.....	73
	ВИСНОВКИ.....	76
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Електроенергетика є однією з базових галузей економіки, від рівня розвитку якої залежить ефективність функціонування промислових підприємств, надійність технологічних процесів та конкурентоспроможність продукції. У сучасних умовах особливого значення набуває підвищення енергоефективності систем електропостачання, зниження втрат електричної енергії та забезпечення належної якості електроенергії для живлення технологічного обладнання.

Машинобудівні підприємства належать до категорії споживачів із значними електричними навантаженнями. В їх складі функціонують електропечі, електроприводи, компресорні установки, зварювальне обладнання та інші потужні електроприймачі, які пред'являють підвищені вимоги до надійності електропостачання. Крім того, широке впровадження напівпровідникових перетворювачів, частотно-керованих електроприводів та інших нелінійних навантажень призводить до появи вищих гармонік, погіршення показників якості електричної енергії та збільшення додаткових втрат у мережі.

Одним із найважливіших завдань під час проектування систем електропостачання промислових підприємств є раціональний вибір структури мережі, визначення електричних навантажень, вибір потужності трансформаторів, компенсація реактивної потужності, розрахунок струмів короткого замикання та вибір електрообладнання. Вирішення цих питань дозволяє забезпечити економічно доцільну та технічно обґрунтовану роботу системи електропостачання.

Практичне значення роботи полягає у розробленні комплексу технічних рішень щодо забезпечення надійного та економічно ефективного електропостачання машинобудівного підприємства, зменшення втрат електричної енергії та підвищення якості електроенергії в умовах використання сучасного електротехнологічного обладнання.

					Арк. 7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

1 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Визначення електричних навантажень машинобудівного підприємства до 1000 В.

Розрахунок електричних навантажень до 1000 В здійснюють для визначення активної, реактивної та повної потужності окремих груп електроприймачів і підприємства загалом. Отримані значення використовують для вибору електрообладнання та елементів мережі.

Для кожної групи електроприймачів визначають встановлену потужність (Електропід відпалу з цифровим керуванням):

$$P_{\Sigma} = n \cdot P_n = 2 \cdot 255 = 510 \text{ кВт}$$

де $n=2$ - кількість електроприймачів;

$P_n=255$ кВт - потужність одного електроприймача.

Далі визначається середнє активне навантаження з урахуванням коефіцієнта використання:

$$P_{зм} = P_{\Sigma} \cdot K_v = 510 \cdot 0,62 = 316,2 \text{ кВт}$$

де $K_v=0,62$ - коефіцієнт використання обладнання.

Середнє реактивне навантаження визначається через тангенс кута зсуву фаз:

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 316,2 \cdot 0,33 = 104,35 \text{ квар}$$

де $\operatorname{tg} \varphi=0,33$, що відповідає $\cos \varphi=0,95$.

Для переходу від середнього до розрахункового навантаження використовують коефіцієнт максимуму:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_m = 316,2 \cdot 1,50 = 474,3 \text{ кВт}$$

Реактивне розрахункове навантаження приймається за даними таблиці або визначається аналогічно:

$$Q_p = 104,35 \text{ квар}$$

					Арк. 8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Повна розрахункова потужність визначається за виразом:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{474,3^2 + 104,35^2} = 485,65 \text{ кВА}$$

Аналогічно виконуються розрахунки для інших груп електроприймачів механоскладальної ділянки.

Нижче наведено приклад розрахунку для підрозділу «Термічна ділянка» за даними таблиці 1.1.

Встановлена потужність визначається як сума потужностей усіх груп електроприймачів ділянки.

$$P_{\Sigma} = \Sigma P_{\text{ні}} = 510 + 110 + 11 + 1,5 + 8 + 5,5 + 3,2 + 42 = 691,20 \text{ кВт}$$

Кожна група обладнання працює не постійно з номінальною потужністю, тому враховується коефіцієнт використання K_v .

Середнє активне навантаження:

$$P_{\text{зм}} = \Sigma(P_{\Sigma i} \cdot K_{vi}) = 316,20 + 24,20 + 6,38 + 0,63 + 4,96 + 3,19 + 1,02 + 28,56 = 385,14 \text{ кВт}$$

Реактивне навантаження залежить від характеру електроприймачів і визначається через $\text{tg}\varphi$. Середнє реактивне навантаження:

$$Q_{\text{зм}} = \Sigma(P_{\Sigma i} \cdot \text{tg}\varphi_i) = 104,35 + 30,73 + 6,12 + 0,54 + 3,47 + 2,74 + 1,30 + 20,56 = 169,83 \text{ квар}$$

Груповий коефіцієнт використання показує фактичний рівень використання встановленої потужності підрозділу:

$$K_v = P_{\text{зм}} / P_{\Sigma} = 385,14 / 691,20 = 0,56$$

Груповий коефіцієнт потужності:

$$\cos\varphi = P_{\text{зм}} / \sqrt{(P_{\text{зм}}^2 + Q_{\text{зм}}^2)} = 385,14 / \sqrt{(385,14^2 + 169,83^2)} = 0,91$$

Розрахункове активне навантаження:

$$P_p = P_{\text{зм}} \cdot K_m = 385,14 \cdot 1,32 = 508,39 \text{ кВт}$$

Розрахункове реактивне навантаження:

$$Q_p = Q_{\text{зм}} = 169,83 \text{ квар}$$

У даному розрахунку реактивне розрахункове навантаження прийнято рівним середньому реактивному навантаженню ділянки.

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

Повна розрахункова потужність:

$$S_p = \sqrt{(P_p^2 + Q_p^2)} = \sqrt{(508,39^2 + 169,83^2)} = 536,00 \text{ кВА}$$

Розрахунок по іншим дільницям проведено у табл.1.1.

1.2 Визначення освітлювальних навантажень машинобудівного підприємства.

Освітлювальне навантаження являється складовою загального електричного навантаження підприємства і враховується під час вибору обладнання та перевірки режимів роботи мережі. Для виробничих та допоміжних приміщень машинобудівного підприємства його доцільно визначати за питомою потужністю освітлення, площею приміщення та з коефіцієнтом попиту.

Як приклад розглянемо приміщення «Механічна дільниця обробки корпусних деталей».

Активне освітлювальне навантаження:

$$P_{po} = \frac{F \cdot P_{уд} \cdot K_c}{1000} = \frac{4290 \cdot 13 \cdot 0,78}{1000} = 43,5 \text{ кВт}$$

Реактивне освітлювальне навантаження:

$$Q_{po} = P_{po} \cdot tg = 43,5006 \cdot 0,75 = 32,62545 \text{ квар}$$

Повна потужність освітлення визначається за активною та реактивною складовими:

$$S_{po} = \sqrt{P_{po}^2 + Q_{po}^2} = \sqrt{43,5006^2 + 32,62545^2} = 54,37 \text{ кВА}$$

Аналогічно розраховуються освітлювальні навантаження по іншим підрозділам. Результати в таблиці 1.2.

1.3 Визначення електричних навантажень машинобудівного підприємства понад 1000 В.

Розрахунок навантаження комплектної трансформаторної підстанції виконується для визначення активної, реактивної та повної потужності на боці 0,4 кВ та 10 кВ. До навантаження КТП входять: силове навантаження

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробничих підрозділів, освітлювальне навантаження та втрати потужності в трансформаторах.

В якості прикладу розглянемо КТП-1 (2×1000 кВА), до якої підключена механічна дільниця обробки корпусних деталей та освітлення.

Активне навантаження на стороні 0,4 кВ:

$$P_{0,4} = P_{\text{р.сил}} + P_{\text{р.осв}} = 1188.4 + 36.3 = 1224.7 \text{ кВт}$$

Реактивне навантаження на стороні 0,4 кВ:

$$Q_{0,4} = Q_{\text{р.сил}} + Q_{\text{р.осв}} = 947.2 + 27.2 = 974.4 \text{ квар}$$

Повна потужність на стороні 0,4 кВ:

$$S_{0,4} = \sqrt{P_{0,4}^2 + Q_{0,4}^2} = \sqrt{1224.7^2 + 974.4^2} = 1565.57 \text{ кВА}$$

Втрати активної потужності в трансформаторах:

$$\Delta P_{\text{тр}} = 17.4 \text{ кВт}$$

Втрати реактивної потужності в трансформаторах:

$$\Delta Q_{\text{тр}} = 101.6 \text{ квар}$$

Активне навантаження на стороні 10 кВ:

$$P_{10} = P_{0,4} + \Delta P_{\text{тр}} = 1224.7 + 17.4 = 1242.1 \text{ кВт}$$

Реактивне навантаження на стороні 10 кВ:

$$Q_{10} = Q_{0,4} + \Delta Q_{\text{тр}} = 974.4 + 101.6 = 1076.0 \text{ квар}$$

Повна потужність на стороні 10 кВ:

$$S_{10} = \sqrt{P_{10}^2 + Q_{10}^2} = \sqrt{1242.1^2 + 1076.0^2} = 1647.87 \text{ кВА}$$

Аналогічно розраховуються навантаження по іншим КТП. Результати в таблиці 1.3.

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Електричні навантаження по підрозділам в мережі 0,4 кВ

№п/п	Найменування вузлів і груп електроприймачів	Кількість ЕП	Встановлена потужність, кВт			m	Кв	cosφ	tgφ	Середнє навантаження, кВт		pe	Км	Розрахункове навантаження, кВт		
			Pmin одного	Pmax одного	Σ					Pзм	Qзм			Pp	Qp	Sp
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Термічна діляниця															
1	Електропіч відпалу з цифровим керуванням	2	255,00	255,00	510,00	<3	0,62	0,95	0,33	316,20	104,35					
2	Мостовий кран з частотним приводом	2	55,00	55,00	110,00	<3	0,22	0,62	1,27	24,20	30,73					
3	Обдирно-шліфувальний верстат	1	11,00	11,00	11,00	<3	0,58	0,72	0,96	6,38	6,12					
4	Автоматизована установка контролю твердості	1	1,50	1,50	1,50	<3	0,42	0,76	0,86	0,63	0,54					
5	Індукційна установка нагріву заготовок	1	8,00	8,00	8,00	<3	0,62	0,82	0,70	4,96	3,47					
6	Галтувальний барабан	1	5,50	5,50	5,50	<3	0,58	0,76	0,86	3,19	2,74					
7	Акумуляторний виробничий візок	1	3,20	3,20	3,20	<3	0,32	0,62	1,27	1,02	1,30					
8	Вентиляційні агрегати термодільниці	6	3,85	7,00	42,00	>3	0,68	0,81	0,72	28,56	20,56					
	Всього по ділянці	15	1,50	255,00	691,20	>3	0,56	0,91	0,44	385,14	169,83	4,00	1,32	508,39	169,83	536,00
	Заготівельно-пресова діляниця															
9	Гідравлічні преси	6	9,35	17,00	102,00	>3	0,58	0,80	0,75	59,16	44,37					
10	Металорізальні верстати заготівельні	25	2,75	5,00	125,00	>3	0,42	0,81	0,72	52,50	37,80					
11	Тиристорні випрямлячі для приводів	12	11,00	20,00	240,00	>3	0,42	0,52	1,64	100,80	165,31					
12	Вентиляційні установки	16	6,05	11,00	176,00	>3	0,58	0,81	0,72	102,08	73,50					

Продовження табл.1.1

1	2	3	4	5	6,0	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
13	Насосна станція мастильно-охолоджувальної рідини	4	4,40	8,00	32,0	>3	0,62	0,81	0,72	19,84	14,28					
14	Електронагрівальні установки підготовки штампів	10	23,10	42,00	420,0	>3	0,42	0,82	0,70	176,40	123,48					
15	Кран мостовий пресової дільниці	4	79,75	145,00	580,0	>3	0,22	0,52	1,64	127,60	209,26					
	Всього по дільниці	80	2,75	145,00	1681,0	>3	0,39	0,69	1,05	649,38	680,01	9,0	1,2	753,3	680,0	1014,8
	Механічна дільниця обробки корпусних деталей															
16	Приводи завантаження обробних центрів	14	8,53	15,50	217,0	>3	0,42	0,72	0,96	91,14	87,49					
17	Приводи вивантаження деталей	14	8,36	15,20	212,8	>3	0,42	0,72	0,96	89,38	85,80					
18	Двигуни систем охолодження і фільтрації	20	9,90	18,00	360,0	>3	0,52	0,81	0,72	187,20	134,78					
19	Вібросито стружковидалення	3	20,90	38,00	114,0	<3	0,42	0,72	0,96	47,88	45,96					
20	Дробарка металевої стружки	4	7,15	13,00	52,0	>3	0,32	0,72	0,96	16,64	15,97					
21	Стрічкові конвеєри	18	9,35	17,00	306,0	>3	0,22	0,81	0,72	67,32	48,47					
22	Горизонтальні дозатори мастила	4	3,03	5,50	22,0	>3	0,52	0,81	0,72	11,44	8,24					
23	Елеватори подачі тари	4	1,65	3,00	12,0	>3	0,32	0,72	0,96	3,84	3,69					
24	Тарілчасті живильники заготовок	8	4,40	8,00	64,0	>3	0,42	0,72	0,96	26,88	25,80					
25	Вентилятори аспірації	12	7,98	14,50	174,0	>3	0,58	0,81	0,72	100,92	72,66					
26	Двовальний змішувач емульсії	4	24,75	45,00	180,0	>3	0,42	0,72	0,96	75,60	72,58					
27	Здвоєні насоси охолодження	4	5,50	10,00	40,0	>3	0,52	0,81	0,72	20,80	14,98					
28	Пропелерні мішалки СОЖ	4	30,25	55,00	220,0	>3	0,32	0,72	0,96	70,40	67,58					
29	Димосос/аспіраційний агрегат	4	30,25	55,00	220,0	>3	0,58	0,81	0,72	127,60	91,87					
30	Крани підвісні та консольні	11	33,55	61,00	671,0	>3	0,22	0,52	1,64	147,62	242,10					
	Всього по дільниці	128	1,65	61,00	2864,8	>3	0,38	0,73	0,94	1084,66	1017,98	11,0	1,0	1117,2	1018,0	1511,4

Продовження табл.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Дільниця металообробки та поточкових ліній															
31	Обробні центри з ЧПК	10	14,30	26,00	260,0	>3	0,52	0,81	0,72	135,20	97,34					
32	Вентилятори локальної аспірації	3	8,80	16,00	48,0	<3	0,58	0,72	0,96	27,84	26,73					
33	Кривошипні преси	3	88,00	160,00	480,0	<3	0,42	0,72	0,96	201,60	193,54					
34	Рольганг-транспортер	3	3,03	5,50	16,5	<3	0,58	0,72	0,96	9,57	9,19					
35	Сушильні камери фарбувального підготовки	25	11,28	20,50	512,5	>3	0,52	0,81	0,72	266,50	191,88					
36	Автоматизовані полірувальні комплекси	13	39,60	72,00	936,0	>3	0,42	0,72	0,96	393,12	377,40					
37	Ланцюговий конвеєр	2	1,80	1,80	3,6	<3	0,58	0,72	0,96	2,09	2,00					
38	Кран-балка	2	10,50	10,50	21,0	<3	0,22	0,52	1,64	4,62	7,58					
39	Верстати у поточкових лініях	12	7,98	14,50	174,0	>3	0,58	0,72	0,96	100,92	96,88					
	Всього по дільниці	73	1,80	160,00	2451,6	>3	0,47	0,75	0,88	1141,46	1002,53	9,0	1,1	1198,5	1002,5	1562,5
	Складально-зварювальна дільниця															
40	Роботизовані складальні пости	60	6,60	12,00	720,0	>3	0,32	0,81	0,72	230,40	165,89					
41	Заливально-монтажні кран-балки	8	10,45	19,00	152,0	>3	0,22	0,62	1,27	33,44	42,47					
42	Зварювальні трансформатори	6	9,62	17,50	105,0	>3	0,38	0,62	1,27	39,90	50,67					
43	Вентиляційні установки зварювальної зони	15	11,00	20,00	300,0	>3	0,68	0,81	0,72	204,00	146,88					
44	Печі опору для термофіксації	6	68,75	125,00	750,0	>3	0,68	0,90	0,48	510,00	244,80					
45	Транспортер складальних вузлів	2	11,00	11,00	22,0	<3	0,58	0,72	0,96	12,76	12,25					
	Всього по дільниці	97	6,60	125,00	2049,0	>3	0,50	0,84	0,64	1030,50	662,96	10,0	1,1	1154,2	663,0	1331,0
	Адміністративно-побутові приміщення															
46	Електронагрівальні прилади	10	1,16	2,10	21,0	>3	0,52	0,95	0,33	10,92	3,60					
47	Промислові холодильні шафи	5	1,32	2,40	12,0	>3	0,68	0,81	0,72	8,16	5,88					

Продовження табл.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
48	Кондиціонери серверної та диспетчерської	2	1,80	1,80	3,6	<3	0,68	0,72	0,96	2,45	2,35					
49	Вентилятори побутових приміщень	2	2,20	2,20	4,4	<3	0,68	0,81	0,72	2,99	2,15					
50	Електричні водонагрівачі	2	5,00	5,00	10,0	<3	0,52	1,00	0,00	5,20	0,00					
	Всього по цеху	24	1,16	5,00	57,0	>3	0,71	0,84	0,64	40,72	25,98	5,0	1,1	45,6	26,0	52,5
	Склад комплектуючих та заготовок															
51	Електротельфери	2	5,50	5,50	11,0	<3	0,32	0,72	0,96	3,52	3,38					
52	Вентилятори складу	3	2,37	4,30	12,9	<3	0,58	0,81	0,72	7,48	5,39					
53	Кран-балка складу	1	11,00	11,00	11,0	<3	0,22	0,62	1,27	2,42	3,07					
	Всього по дільниці	6	2,37	11,00	34,9	>3	0,38	0,75	0,88	13,42	11,84	2,0	1,5	19,5	11,8	22,8
	Ремонтно-механічний цех															
54	Токарні верстати	5	2,75	5,00	25,0	>3	0,32	0,72	0,96	8,00	7,68					
55	Фрезерні верстати	2	4,00	4,00	8,0	<3	0,32	0,72	0,96	2,56	2,46					
56	Шліфувальний верстат	2	2,00	2,00	4,0	<3	0,27	0,72	0,96	1,08	1,04					
57	Свердлильний верстат	2	1,50	1,50	3,0	<3	0,22	0,72	0,96	0,66	0,63					
58	Заточний верстат	2	1,00	1,00	2,0	<3	0,22	0,72	0,96	0,44	0,42					
59	Електропила	2	3,00	3,00	6,0	<3	0,32	0,72	0,96	1,92	1,84					
60	Зварювальний трансформатор ремонтний	3	4,12	7,50	22,5	<3	0,22	0,52	1,64	4,95	8,12					
61	Вентиляційна установка	2	5,50	5,50	11,0	<3	0,68	0,81	0,72	7,48	5,39					
	Всього по дільниці	20	1,00	7,50	81,5	>3	0,33	0,70	1,02	27,09	27,58	4,0	1,3	33,9	27,6	43,7
	Всього: на 0,4 кВ	443	1,00	255,00	9911,0	>3	0,44	0,77	0,82	4372,37	3598,71	21,0	1,1	4830,5	3598,7	6023,6

Таблиця 1.2 – Освітлювальне навантаження підприємства

№	Приміщення / територія	F, м²	Руд, Вт/м²	Kс	Рро, кВт	cos φ	tg φ	Qро, квар	Sро, кВА
1	Термічна дільниця	4450	13,00	0,72	41,65	0,80	0,75	31,24	52,07
2	Заготівельно-пресова дільниця	3380	15,00	0,70	35,49	0,80	0,75	26,62	44,36
3	Механічна дільниця обробки корпусних деталей	4290	13,00	0,78	43,50	0,80	0,75	32,63	54,38
4	Дільниця металообробки та потокових ліній	4980	12,00	0,72	43,03	0,70	1,02	43,89	61,46
5	Складально-зварювальна дільниця	1160	15,00	0,70	12,18	0,70	1,02	12,42	17,40
6	Адміністративно-побутові приміщення	1040	18,00	0,70	13,10	0,80	0,75	9,83	16,38
7	Склад комплектуючих та заготовок	980	6,00	0,55	3,23	0,70	1,02	3,30	4,62
8	Ремонтно-механічний цех	460	15,00	0,70	4,83	0,80	0,75	3,62	6,04
9	Освітлення території підприємства	28600	1,80	0,35	18,02	0,90	0,48	8,65	19,99
	Всього	49340			215,04			172,19	275,48

Таблиця 1.3 - Електричні навантаження в мережі вище 1000 В

№ п/п	Найменування вузлів і груп електроприймачів	Кількість ЕП	P _{мін} одного	P _{мак} одного	Σ, кВт	m	K _B	cosφ	tgφ	P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар	η _е	K _м	P _p , кВт	Q _p , квар	S _p , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	КТП-1 (2×1000)															
1	Механічна дільниця обробки корпусних деталей	128,00	1,65	61,00	2864,80	>3	0,38	0,73	0,94	1084,66	1017,98	11,00	1,03	1117,20	1017,98	1511,43
2	Освітлення									43,50	32,63			43,50	32,63	54,38
	Всього на 0,4 кВ													1160,70	1050,61	1565,57
	Втрати в тр-рах													17,22	101,76	
	Всього по КТП-1													1177,92	1152,37	1647,87
	БСК														-440,00	
	КТП-2 (2×1000)															
3	Термічна дільниця	15,00	1,50	255,00	691,20	>3	0,56	0,91	0,44	385,14	169,83	4,00	1,32	508,38	169,83	536,00
4	Заготівельно-пресова дільниця	77,00	2,75	145,00	1675,00	>3	0,38	0,69	1,05	638,38	668,01	9,00	1,16	740,52	668,01	997,30
5	Освітлення									77,14	57,86			77,14	57,86	96,43
	Всього на 0,4 кВ													1326,05	895,70	1600,21
	Втрати в тр-рах													17,60	104,01	
	Всього по КТП-2													1343,65	999,71	1674,76
	БСК														-190,00	
	КТП-3 (2×1000)															
6	Складально-зварювальна дільниця	97,00	6,60	125,00	2049,00	>3	0,50	0,84	0,64	1030,50	662,96	10,00	1,12	1154,16	662,96	1331,02
7	Адміністративно-побутові приміщення	21,00	1,16	5,00	51,00	>3	0,58	0,90	0,47	29,72	13,98	5,00	1,12	33,29	13,98	36,10
8	Склад комплектуючих та заготовок	6,00	2,37	11,00	34,90	>3	0,38	0,75	0,88	13,42	11,84	2,00	1,45	19,46	11,84	22,78
9	Освітлення									28,52	25,55			28,52	25,55	38,29

Продовження табл.1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Всього на 0,4 кВ													1235,43	714,33	1427,08
	Втрати в тр-рах													15,70	92,76	
	Всього по КТП-3													1251,12	807,09	1488,86
	БСК													-240,00		
	КТП-4 (2×1000)															
10	Дільниця металообробки та потоків ліній	73,00	1,80	160,00	2451,60	>3	0,47	0,75	0,88	1141,46	1002,53	9,00	1,05	1198,53	1002,53	1562,55
11	Ремонтно-механічний цех	20,00	1,00	7,50	81,50	>3	0,33	0,70	1,02	27,09	27,58	4,00	1,25	33,86	27,58	43,67
12	Освітлення									47,86	47,51			47,86	47,51	67,44
	Всього на 0,4 кВ													1280,26	1077,62	1673,42
	Втрати в тр-рах													18,41	108,77	
	Всього по КТП-4													1298,66	1186,39	1758,99
	БСК													-340,00		
	Всього по підприємству															
	Силова	437,00	1,00	255,00	9899,00	>3	0,44	0,77	0,82	4350,37	3574,71	21,00	1,10	4805,41	3574,71	5989,20
	Освітлення									215,04	172,19			215,04	172,19	275,48
	Всього на 0,4 кВ													5020,45	3746,90	6264,51
	Втрати в тр-рах													68,91	407,19	
	Всього по підприємству													5089,36	4154,09	6569,48
	Індукційно-нагрівальна установка 2×800 кВт	2,00	800,00	800,00				0,98	0,13					1600,00	222,00	1615,33
	Пічні трансформатори 2×2800 кВА							0,84	0,61					4750,00	2949,00	5590,98
	Пічні трансформатори 2×2250 кВА							0,84	0,61					3820,00	2368,00	4494,42
	Високовольтне навантаження													10170,00	5539,00	11580,56
	Всього на 10 кВ з урахуванням вв навантаження													15259,36	9693,09	18077,72
	БСК 10 кВ													-7410,00		
	ВСЬОГО ПО ПІДПРИЄМСТВУ													15259,36	2283,09	15429,21

1.4 Дослідження графіків електричних навантажень підприємства

На основі результатів електричних навантажень на машинобудівному підприємстві виконано побудову добових графіків для зимового та літнього періодів із врахуванням робочих і вихідних днів.

Річний графік навантаження за тривалістю формується відповідно до добових графіків споживання електроенергії.

За добовими графіками визначають допустиме навантаження силових трансформаторів, а також максимальні та мінімальні значення потужності, потрібні для подальшого розрахунку режимів електромережі.

Річний графік дає можливість визначити річне споживання активної та реактивної енергії, середньозважений коефіцієнт потужності, тривалість використання максимуму навантаження і час повних втрат потужності.

В розрахунках приймається така кількість днів: робочих зимових - 147, робочих літніх - 105, вихідних зимових - 65, вихідних літніх - 48.

Річні витрати активної енергії визначаються за виразом:

$$W_p = \sum P_i \cdot T_i = 74951208 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Річні витрати реактивної енергії визначаються за формулою:

$$V_p = \sum Q_i \cdot T_i = 11226282 \text{ квар} \cdot \text{год}$$

Тривалість використання максимального навантаження обчислюється за формулою:

$$T_{max} = \frac{\sqrt{W_p^2 + Q_p^2}}{P_p} = \frac{\sqrt{74951208^2 + 11226282^2}}{15429,21} = 4911,935 \text{ год}$$

Час максимальних втрат визначається за залежністю:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{max}}{10^4}\right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{4911,935}{10^4}\right)^2 \cdot 8760 = 3315,337 \text{ год}$$

Побудову графіків електричних навантажень виконано за допомогою програмного середовища Microsoft Excel. Отримані графіки добових та річних навантажень представлені на рисунках 1.1–1.5.

						Арк. 19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

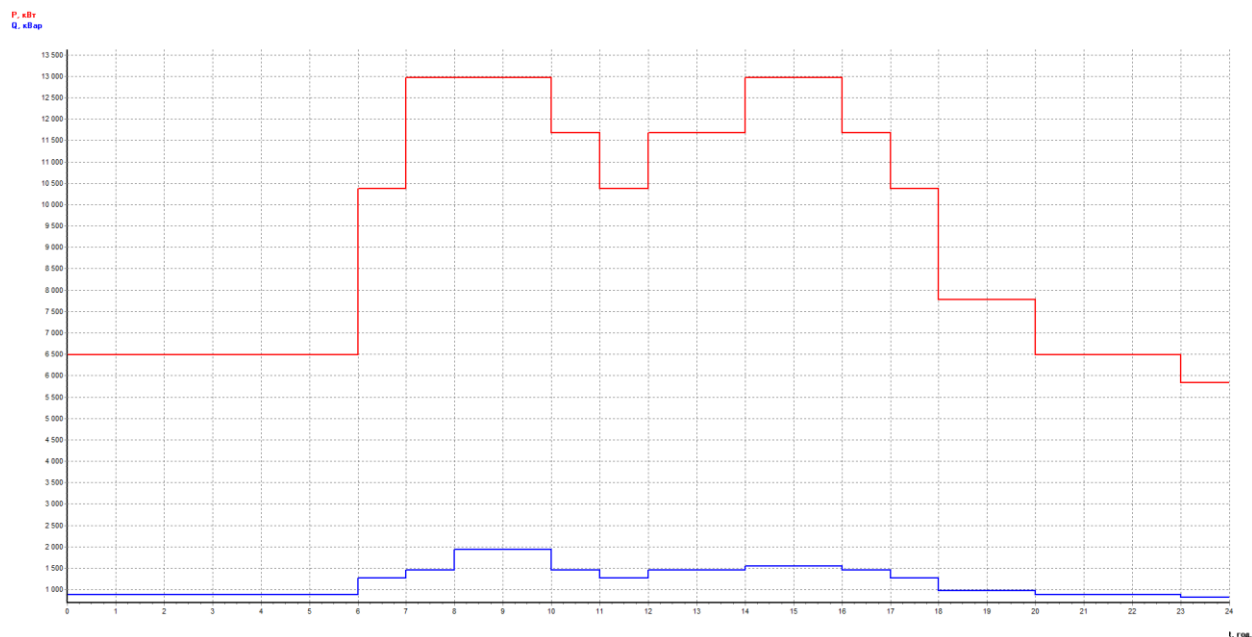


Рисунок 1.1 - Добовий графік навантаження літнього робочого дня



Рисунок 1.2 - Добовий графік навантаження зимового робочого дня

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

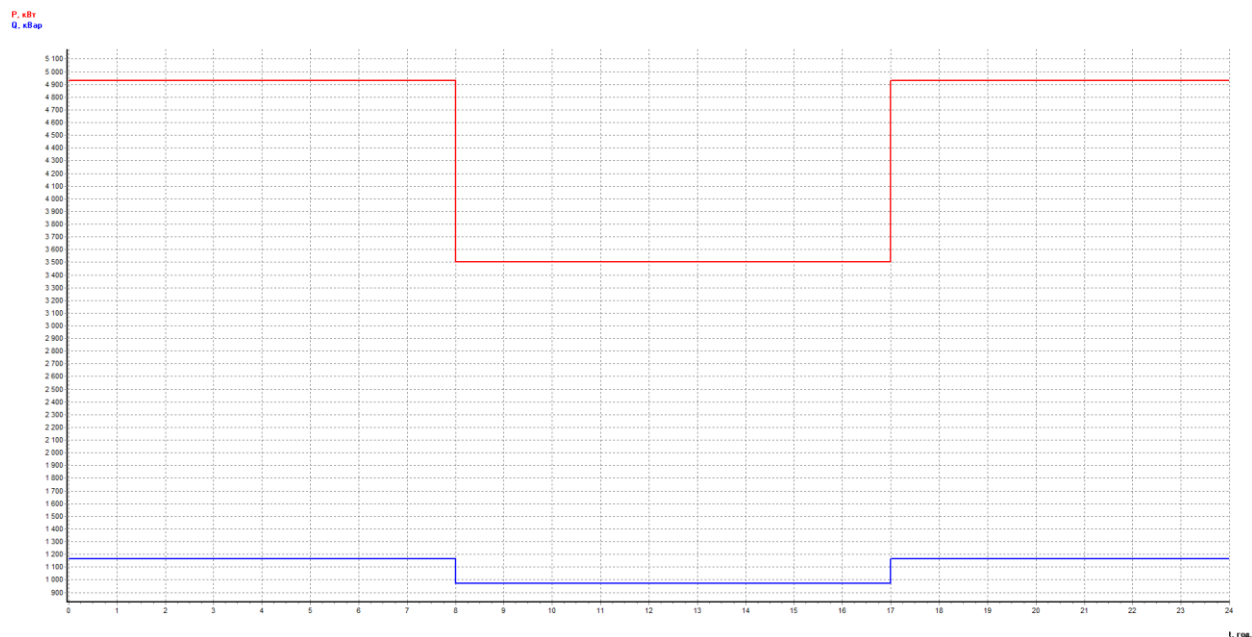


Рисунок 1.3 - Графік електричного навантаження літнього вихідного дня

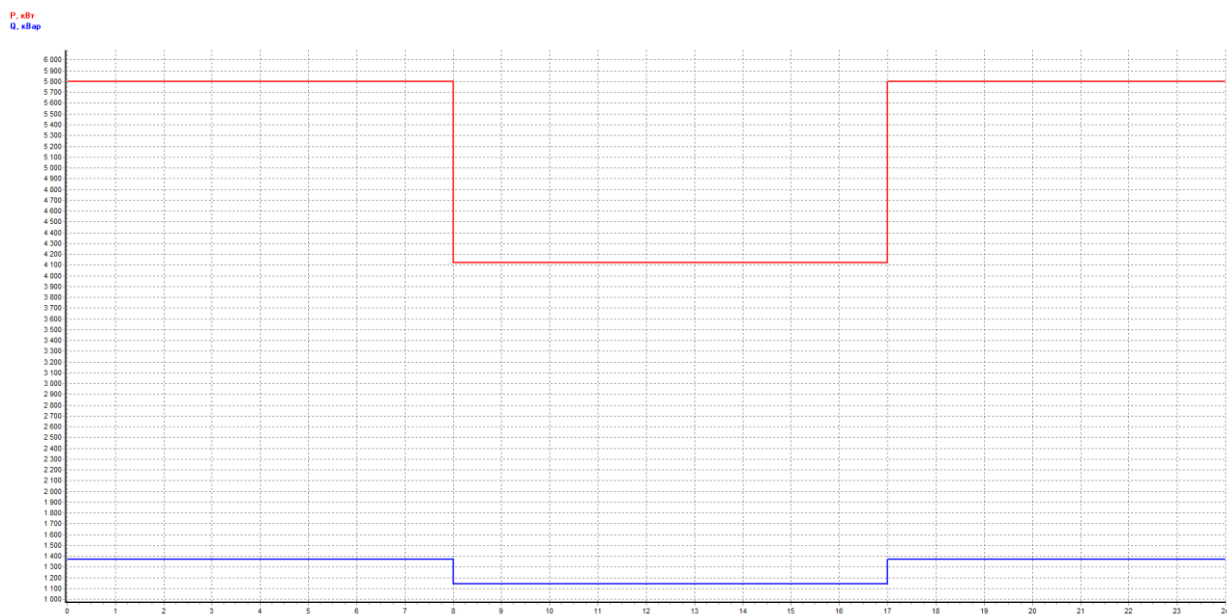


Рисунок 1.4 - Графік електричного навантаження зимового вихідного дня

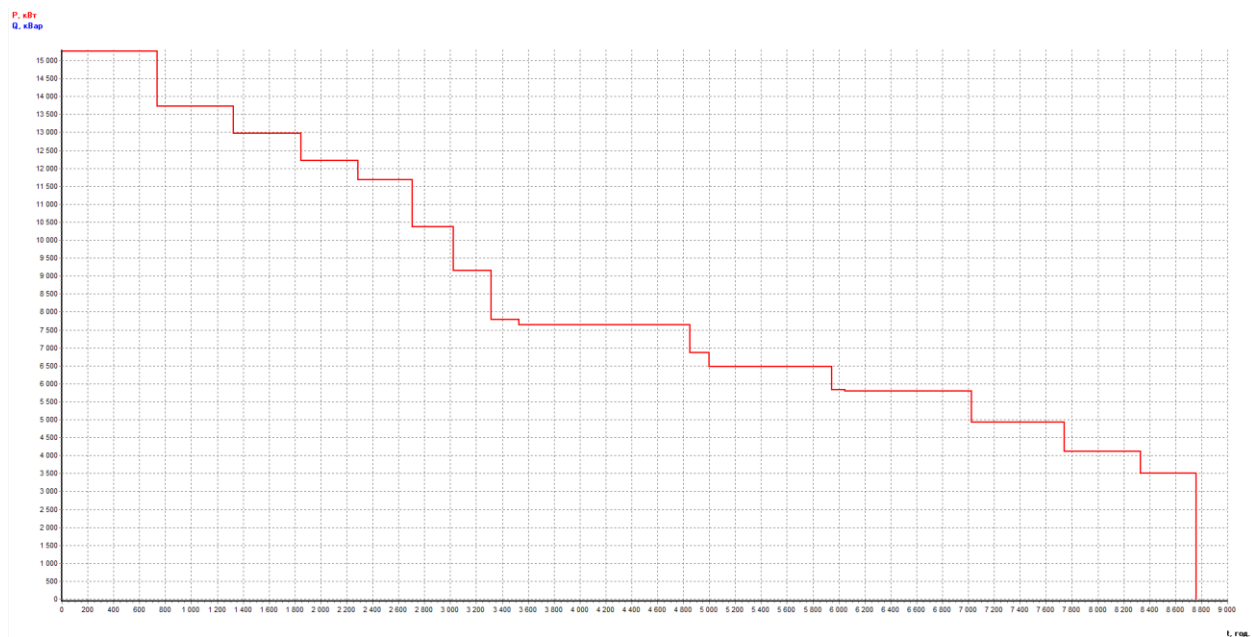


Рисунок 1.5 - Річний графік тривалості електричних навантажень

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Картограма електричних навантажень використовується для відображення розміщення основних споживачів електроенергії на генеральному плані підприємства. Її побудова дає змогу оцінити розподіл активної потужності між окремими цехами, визначити зони максимальної концентрації навантажень і вибрати раціональне місце розташування розподільчого пункту та трансформаторних підстанцій.

До сумарного навантаження входить силове навантаження до 1000 В та освітлювальне навантаження підрозділів. Для підрозділів із високовольтними електроприймачами додатково враховують високовольтне навантаження.

Розглянемо механічну дільницю обробки корпусних деталей. За результатами попередніх розрахунків для неї прийнято: силове навантаження $P_{0,4} = 1117,20$ кВт, освітлювальне навантаження $P_{осв} = 43,50$ кВт. Координати дільниці на генплані прийнято орієнтовно: $X = 41$ см, $Y = 25$ см. Масштаб картограми прийнято $m = 20$ кВт/см².

Сумарне активне навантаження механічної дільниці:

$$P_{сум} = P_{0,4} + P_{осв} = 1117,20 + 43,50 = 1160,70 \text{ кВт}$$

Кут сектора освітлювального навантаження:

$$\alpha = \frac{P_{осв}}{P_{сум}} \cdot 360^\circ = \frac{43,50}{1160,70} \cdot 360^\circ = 13,49^\circ$$

Радіус кола картограми:

$$R = \sqrt{\frac{P_{сум}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{1160,70}{3,14 \cdot 20}} = 4,30 \text{ см}$$

Добутки, необхідні для визначення центра електричних навантажень:

$$P_{сум} \cdot X = 1160,70 \cdot 41 = 47588,70$$

$$P_{сум} \cdot Y = 1160,70 \cdot 25 = 29017,50$$

						Арк. 23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Розрахунок картограми навантажень

№	Приміщення / підрозділ	Росв, кВт	P _{0,4} силове, кВт	P _{сум} , кВт	α, град	R, см	X, см	Y, см	P _{сум} ·X	P _{сум} ·Y
1	Термічна дільниця	41,65	508,39	550,04	27,26	2,96	32	47	17601,28	25851,88
2	Заготівельно-пресова дільниця	35,49	740,52	776,01	16,46	3,51	38	37	29488,38	28712,37
3	Механічна дільниця обробки корпусних деталей	43,50	1117,20	1160,70	13,49	4,30	41	25	47588,70	29017,50
4	Дільниця металообробки та потокових ліній	43,03	1198,53	1241,56	12,48	4,45	65	37	80701,40	45937,72
5	Складально-зварювальна дільниця	12,18	1154,16	1166,34	3,76	4,31	15	37	17495,10	43154,58
6	Адміністративно-побутові приміщення	13,10	33,29	46,39	101,66	0,86	11	29	510,29	1345,31
7	Склад комплектуючих та заготовок	3,23	19,46	22,69	51,25	0,60	22	26	499,18	589,94
8	Ремонтно-механічний цех	4,83	33,86	38,69	44,94	0,78	22	18	851,18	696,42
9	Високовольтне навантаження	0,00	10185,00	10185,00	0,00	12,73	65	37	662025,00	376845,00
	Всього	197,01	14990,41	15187,42					856760,51	552150,72

Координати центру електричних навантажень

X ₀ , см	56,41
Y ₀ , см	36,36

Визначення центру електричних навантажень

Центр електричних навантажень визначають методом статичних моментів. Координати центра розраховують відношенням суми добутків навантажень на координати до сумарного навантаження машинобудівного підприємства.

За результатами розрахунку картограми отримано:

$$\sum P_i = 15187,42 \text{ кВт}$$

$$\sum P_i \cdot X_i = 856760,51$$

$$\sum P_i \cdot Y_i = 552150,72$$

Тоді координата центра електричних навантажень по осі X становить:

$$X_0 = \frac{\sum P_i \cdot X_i}{\sum P_i} = \frac{856760,51}{15187,42} = 56,41 \text{ см}$$

Координата центра електричних навантажень по осі Y становить:

$$Y_0 = \frac{\sum P_i \cdot Y_i}{\sum P_i} = \frac{552150,72}{15187,42} = 36,36 \text{ см}$$

Розподільчий пункт доцільно розміщувати поблизу цієї точки, враховуючи напрямок підведення зовнішнього живлення, планувальні обмеження території та технологічну структуру підприємства.

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

3.1 Вибір напруги живлення

Вибір напруги вище 1000 В розглядається разом з загальною структурою електропостачання машинобудівного підприємства. Оскільки розподільча мережа підприємства виконується на напрузі 10 кВ, для живлення цехових трансформаторних підстанцій приймаємо напругу 10 кВ.

3.2 Вибір схем електропостачання

Під час вибору схеми внутрішнього електропостачання розглянуто два технічно можливі варіанти. Перший варіант передбачає спорудження розподільчого пункту РП-1, від якого живляться всі цехові КТП та високовольтні споживачі. У цьому випадку скорочується сумарна довжина кабельних ліній, що зменшує втрати електроенергії.

Другий варіант передбачає безпосереднє живлення КТП від ГПП, яка розташована на відстані 300 м від цехів промислового майданчика. Перевагою цього варіанта є менша кількість комірок з вимикачами, проте сумарна довжина кабельних ліній зростає.

Критерієм вибору економічно доцільної схеми являється мінімум приведених витрат. Розрахунок виконано за структурою наданого шаблону з використанням заданих величин: $S_p = 15429,21$ кВА, $T_{\max} = 4911,935$ год, $\tau = 3315,337$ год, $S_{tr} = 1000$ кВА.

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

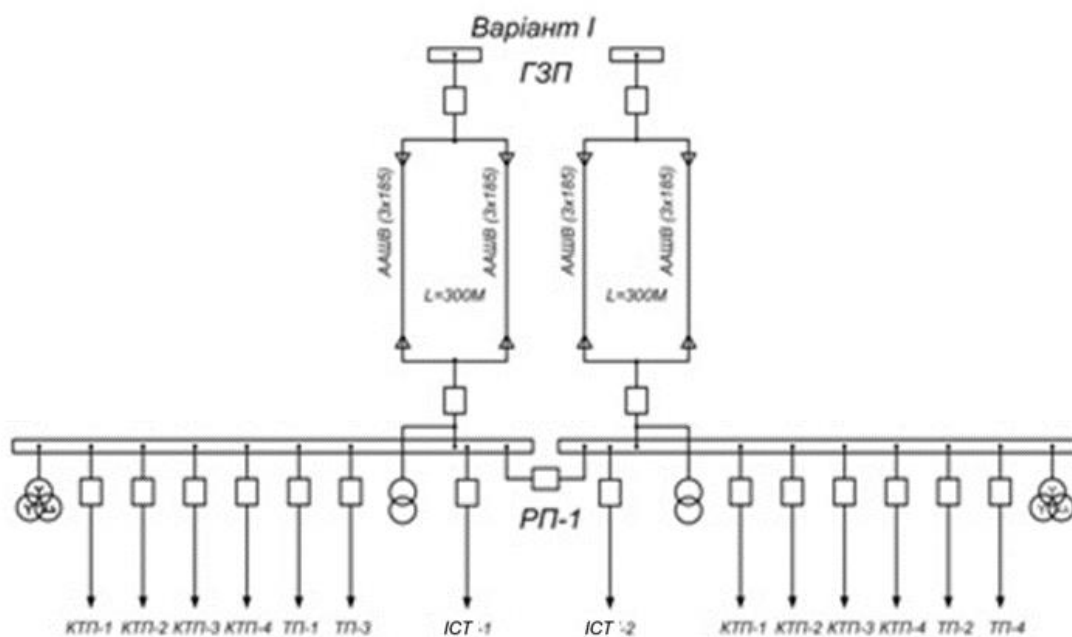


Рисунок 3.1 - Схема 1 електропостачання машинобудівного підприємства

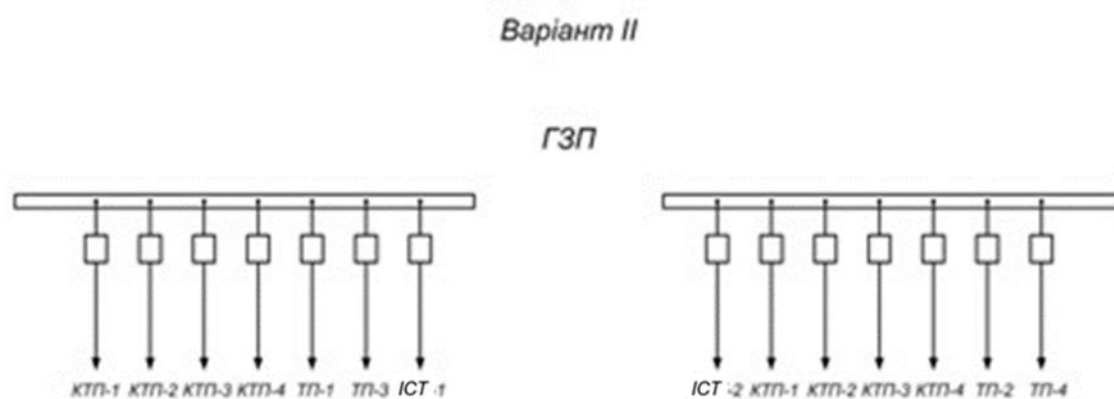


Рисунок 3.2 – Схема 2 електропостачання машинобудівного підприємства

Варіант 1. Живлення виконується від ГПП зі спорудженням РП-1.

Розрахунковий струм у лінії при $S_p = 15429,21$ кВА, кВА визначається за формулою:

$$I_p = S_p / (\sqrt{3} \cdot U_n) = I_p = \frac{15429,21}{\sqrt{3} \cdot 10} = 890,8 \text{ А}$$

Переріз кабелю визначаємо за економічною густиною струму. Для тривалості використання максимуму навантаження $T_{max} = 4911,935$ год

					Арк.
					26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

приймаємо $j_e = 1,2 \text{ А/мм}^2$. Оскільки передбачено прокладання чотирьох паралельних кабельних ліній, економічний переріз однієї лінії становить:

$$F = I_p / (j_e \cdot n) = 890,8 / (1,2 \cdot 4) = 185,6 \text{ мм}^2$$

Приймаємо до прокладання 4 кабельні лінії ААШВ-10 3х240 мм². Для аварійного режиму перевіримо допустиме навантаження кабельної лінії:

$$I_{ав} = 3 \cdot I_{доп} \cdot K_{ап} = 3 \cdot 340 \cdot 1,3 = 1326 \text{ А} > 890,8 \text{ А}$$

Отже, прийнятий переріз забезпечує живлення навантаження в аварійному режимі.

Попередньо для живлення цехових КТП приймаємо кабель ААШВ-10 3х70 мм². Для живлення високовольтних трансформаторів приймаємо кабелі ААШВ-10 3х150 мм² та ААШВ-10 3х120 мм².

Вартість втрат електроенергії визначаємо за середнім тарифом:

$$C_{втр} = C_0 \cdot \Delta W$$

Актуальний тариф на електроенергію $C_0 = 7,50 \text{ грн/(кВт·год)}$. Втрати електроенергії визначаються за таким виразом:

$$\Delta W = \Delta P_m \cdot \tau$$

Максимальні втрати активної потужності в кабельних лініях:

$$\Delta P_m = 3 \cdot I^2 \cdot R_0 \cdot l \cdot n \cdot 10^{-3}$$

де l - довжина кабельної лінії, км; R_0 - питомий активний опір кабелю, Ом/км; n - кількість паралельних або однотипних ліній.

Для варіанта 1 сумарні максимальні втрати активної потужності становлять:

$$\Delta P_{м1} = 25,30 + 2,10 + 2,25 + 1,96 + 0,12 = 31,73 \text{ кВт}$$

$$C_{втр1} = 7,50 \cdot 31,73 \cdot 3315,337 / 1000 = 789,06 \text{ тис. грн}$$

Варіант 2. Живлення корпусу виконується безпосередньо від ГПП підприємства.

Для цього варіанта довжина кабельних ліній до цехових КТП та високовольтних споживачів збільшується на відстань від ГПП до

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислового майданчика. Відповідно зростають втрати активної потужності в кабельних лініях.

$$\Delta P_{\text{м}2} = 9,33 + 12,72 + 9,81 + 1,85 = 33,71 \text{ кВт}$$

$$C_{\text{втр}2} = 7,50 \cdot 33,71 \cdot 3315,337 / 1000 = 838,15 \text{ тис. грн}$$

Таблиця 3.1 – Порівняльний розрахунок капітальних вкладень

Варіант	Елементи схеми	Кількість / довжина	Вартість одиниці, тис. грн	Вартість всього, тис. грн
1	Шафа КРУ 10 кВ з вакуумним вимикачем на РП-1	17	280,00	4 760,00
	НАМІТ-10	2	95,00	190,00
	Трансформатор власних потреб	2	130,00	260,00
	Кабель ААШВ-10 3х240, км	1,200	4 800,00	5 760,00
	Траншея для ввідних кабелів, км	0,300	600,00	180,00
	Кабель ААШВ-10 3х70, км	0,686	1 700,00	1 166,20
	Траншея до цехових КТП, км	0,343	600,00	205,80
	Кабель ААШВ-10 3х150, км	0,129	3 400,00	438,60
	Кабель ААШВ-10 3х120, км	0,150	2 800,00	420,00
	Всього			13 380,60
2	Шафа КРУ 10 кВ з вакуумним вимикачем на ГПП	14	280,00	3 920,00
	Кабель ААШВ-10 3х70, км	3,090	1 700,00	5 253,00
	Траншея для кабельних ліній, км	1,550	600,00	930,00
	Кабель ААШВ-10 3х150, км	0,729	3 400,00	2 478,60
	Кабель ААШВ-10 3х120, км	0,750	2 800,00	2 100,00
	Кабель ААШВ-10 3х70, км	0,640	1 700,00	1 088,00
	Всього			15 769,60

Таблиця 3.2 - Розрахунок поточних витрат

Варіант	Елементи схеми	К _і , тис. грн	Р _а , %	С _{аі} , тис. грн	Р _е , %	С _{еі} , тис. грн	С _і , тис. грн
1	КРУ та обладнання РП-1	5 210,00	15	781,50	5	260,50	1 042,00
	Кабельні лінії з урахуванням траншей	8 170,60	5	408,53	5	408,53	817,06
	Всього						1 859,06
2	КРУ на ГПП	3 920,00	15	588,00	5	196,00	784,00
	Кабельні лінії з урахуванням траншей	11 849,60	5	592,48	5	592,48	1 184,96
	Всього						1 968,96

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 - Техніко-економічні показники варіантів

Показники	Варіант 1	Варіант 2
Капітальні вкладення, тис. грн	13 380,60	15 769,60
Поточні витрати, тис. грн	1 859,06	1 968,96
Вартість втрат електроенергії, тис. грн	789,06	838,15
Приведені витрати за структурою шаблону, тис. грн	16 028,72	18 576,71
Приведені витрати з нормативним коефіцієнтом Ен, тис. грн/рік	4 655,21	5 172,55

Приведені витрати за структурою шаблону визначаються як сума капітальних вкладень, поточних витрат та вартості втрат електроенергії:

$$Z_1 = K_1 + C_1 + C_{\text{втр}1} = 13380,60 + 1859,06 + 789,06 = 16028,72 \text{ тис. грн}$$

$$Z_2 = K_2 + C_2 + C_{\text{втр}2} = 15769,60 + 1968,96 + 838,15 = 18576,71 \text{ тис. грн}$$

З урахуванням нормативного коефіцієнта ефективності капітальних вкладень:

$$\begin{aligned} Z'_1 &= E_n \cdot K_1 + C_1 + C_{\text{втр}1} = 0,15 \cdot 13380,60 + 1859,06 + 789,06 \\ &= 4655,21 \text{ тис. грн/рік} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_2 &= E_n \cdot K_2 + C_2 + C_{\text{втр}2} = 0,15 \cdot 15769,60 + 1968,96 + 838,15 \\ &= 5172,55 \text{ тис. грн/рік} \end{aligned}$$

Техніко-економічне порівняння показує, що варіант 1 зі спорудженням РП-1 має менші приведені витрати. Тому для електропостачання машинобудівного підприємства доцільно прийняти схему із встановленням РП-1 на території підприємства.

ціни; для робочого проекту її необхідно уточнювати за комерційними пропозиціями постачальників.

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв компенсації

Передача реактивної потужності від джерела живлення до електроприймачів не супроводжується виконанням корисної роботи, але збільшує повний струм у кабельних лініях, трансформаторах і комутаційній апаратурі. Унаслідок цього зростають втрати активної енергії, збільшується падіння напруги та погіршується режим роботи мережі. Для зменшення реактивної складової струму в системі електропостачання передбачають встановлення батарей статичних конденсаторів.

Компенсуючі пристрої доцільно розміщувати якомога ближче до центрів споживання реактивної потужності. Частину компенсації виконують на стороні 0,4 кВ біля цехових трансформаторних підстанцій, а частину - на шинах 10 кВ РП-1. Такий підхід дозволяє одночасно зменшити струми в мережі низької напруги та розвантажити живильну мережу 10 кВ.

Активне розрахункове навантаження підприємства: $P_p = 15259,00$ кВт

Реактивне силове навантаження: $Q_p = 3574,71$ квар

Реактивне навантаження освітлення $Q_{осв} = 172,19$ квар

Потужність одного трансформатора $S_{тр} = 1000$ кВА

Активні втрати в трансформаторах комплексу $\Delta P_{тр} = 68,91$ кВт

Реактивні втрати в трансформаторах комплексу $\Delta Q_{тр} = 407,19$ квар

На шинах 10 кВ після компенсації приймається підтримання:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = 0,15$$

Реактивне навантаження на стороні 0,4 кВ визначається як сума реактивного силового та освітлювального навантажень:

$$Q_{0,4} = Q_p + Q_{осв}$$

$$Q_{0,4} = 3574,71 + 172,19 = 3746,90 \text{ квар}$$

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В балансі враховується реактивна складова високовольтного навантаження. Її значення визначаємо з умови забезпечення заданого коефіцієнта реактивної потужності після компенсації.

$$Q_{\text{доп}} = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_k$$

$$Q_{\text{доп}} = 15259,00 \cdot 0,15 = 2288,85 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{ВН}} = Q_{\text{БСК}} + Q_{\text{доп}} - Q_{0,4} - \Delta Q_{\text{тр}}$$

$$Q_{\text{ВН}} = 7410,00 + 2288,85 - 3746,90 - 407,19 = 5544,76 \text{ квар}$$

Тоді реактивне навантаження на шинах 10 кВ до компенсації становить:

$$Q_{10} = Q_{0,4} + \Delta Q_{\text{тр}} + Q_{\text{ВН}}$$

$$Q_{10} = 3746,90 + 407,19 + 5544,76 = 9698,85 \text{ квар}$$

Необхідна потужність компенсуючих пристроїв визначається за виразом:

$$Q_{\text{БСК}} = Q_{10} - P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_k$$

$$Q_{\text{БСК}} = 9698,85 - 15259,00 \cdot 0,15 = 7410,00 \text{ квар}$$

Після встановлення БСК залишкова реактивна потужність становитиме:

$$Q_{\text{після}} = Q_{10} - Q_{\text{БСК}}$$

$$Q_{\text{після}} = 9698,85 - 7410,00 = 2288,85 \text{ квар}$$

Перевіряємо фактичне значення коефіцієнта реактивної потужності після компенсації:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{після}} = \frac{Q_{\text{після}}}{P_p}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{після}} = \frac{2288,85}{15259,00} = 0,150$$

Повна потужність підприємства після компенсації:

$$S_{\text{після}} = \sqrt{P_p^2 + Q_{\text{після}}^2}$$

$$S_{\text{після}} = \sqrt{15259,00^2 + 2288,85^2} = 15429,71 \text{ кВА}$$

Для порівняння повна потужність до компенсації:

						Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{до} = \sqrt{P_p^2 + Q_{10}^2}$$

$$S_{до} = \sqrt{15259,00^2 + 9698,85^2} = 18080,51 \text{ кВА}$$

Отже, встановлення БСК дозволяє зменшити повну потужність, що передається мережею, та забезпечити необхідний режим за $\text{tg}\varphi = 0,15$.

За результатами попереднього вибору в системі електропостачання передбачено чотири комплектні трансформаторні підстанції з двома трансформаторами в кожній. Отже, загальна кількість трансформаторів становить:

$$N = 4 \cdot 2 = 8 \text{ шт.}$$

Сумарна встановлена потужність трансформаторів підприємства:

$$S_{\Sigma\text{тр}} = N \cdot S_{\text{тр}}$$

$$S_{\Sigma\text{тр}} = 8 \cdot 1000 = 8000 \text{ кВА}$$

Оскільки частина навантаження є високовольтною та не проходить через трансформатори 10/0,4 кВ, вибір кількості трансформаторів виконується за навантаженням цехових КТП. Прийняте рішення з вісьмома трансформаторами відповідає структурі підприємства та забезпечує можливість розподілення низьковольтних БСК без перевантаження окремих секцій 0,4 кВ.

4.2 Розподіл потужності компенсуючих пристроїв

Сумарну потужність компенсації приймаємо рівною 7410 квар. Вона поділяється між високовольтними та низьковольтними компенсуючими пристроями. На стороні 10 кВ передбачаються дві високовольтні БСК по 3100 квар, а решта компенсації розміщується на стороні 0,4 кВ біля цехових КТП.

$$Q_{\text{БСК}} = Q_{\text{БСК.10}} + Q_{\text{БСК.0,4}}$$

$$Q_{\text{БСК.10}} = 2 \cdot 3100 = 6200 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{БСК.0,4}} = 7410 - 6200 = 1210 \text{ квар}$$

Розподіл низьковольтної компенсації виконано з урахуванням навантаження окремих КТП.

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 - Розподіл низьковольтної компенсації

Номер КТП / РП	Прийнята БСК, квар	Місце встановлення
КТП-1	$2 \times 220 = 440$	Шини КТП 0,4 кВ
КТП-2	$120 + 70 = 190$	Шини КТП 0,4 кВ
КТП-3	$2 \times 120 = 240$	Шини КТП 0,4 кВ
КТП-4	$220 + 120 = 340$	Шини КТП 0,4 кВ
РП-1	$2 \times 3100 = 6200$	Шини 10 кВ
Всього	7410	-

Перевірка сумарної потужності низьковольтних БСК:

$$Q_{\text{БСК},0,4} = 3 \cdot 220 + 4 \cdot 120 + 1 \cdot 70$$

$$Q_{\text{БСК},0,4} = 660 + 480 + 70 = 1210 \text{ квар}$$

Перевірка загальної потужності компенсації:

$$Q_{\text{БСК}} = 6200 + 1210 = 7410 \text{ квар}$$

Для попереднього техніко-економічного оцінювання приймаємо орієнтовні актуальні ринкові ціни на комплектні установки компенсації реактивної потужності.

Таблиця 4.2 - Вартість БСК

Тип установки	Напруга	Потужність, квар	Кількість	Ціна за одиницю, тис. грн	Вартість, тис. грн
УКРМ-0,4-220	0,4 кВ	220	3	319,0	957,0
УКРМ-0,4-120	0,4 кВ	120	4	174,0	696,0
УКРМ-0,4-70	0,4 кВ	70	1	49,5	49,5
БСК-10-3100	10 кВ	3100	2	1900,0	3800,0
Всього	-	7410	-	-	5502,5

Орієнтовна сумарна вартість прийнятих компенсуючих пристроїв становить:

$$C_{\text{БСК}} = 1702,5 + 3800,0 = 5502,5 \text{ тис. грн}$$

4.3 Порівняння варіантів компенсації

Для перевірки доцільності прийнятого рішення порівнюємо три варіанти: 8, 9 та 10 трансформаторів. Основним критерієм вибору є мінімальні сумарні витрати на компенсацію та додаткові втрати.

						Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3 – Порівняння витрат з N=8, N=9, N=10

Кількість тр-рів, шт.	Q_1 , МВАр	$Q_{кн}$, МВАр	$Q_{кв}$, МВАр	$\Delta P_{ТП}$, кВт	Кап. вкладення, тис. грн	З, тис. грн
8	2,54	1,210	6,200	8,91	5502,5	мінімальні
9	3,85	0,000	7,410	18,75	6350,0	більші
10	4,92	0,000	7,410	28,11	8150,0	найбільші

За результатами порівняння приймаємо варіант з вісьмома трансформаторами та сумарною потужністю компенсації 7410 квар. Цей варіант забезпечує необхідний баланс реактивної потужності, відповідає заданій структурі КТП і дозволяє підтримувати $\text{tg}\varphi$ на шинах 10 кВ на рівні 0,15.

Для компенсації реактивної потужності машинобудівного підприємства прийнято встановити дві високовольтні БСК на шинах 10 кВ: 2х БСК-10-3100 та низьковольтні установки на шинах 0,4 кВ загальною потужністю 1210 квар:

КТП-1: 2 х УКРМ-0,4-220

КТП-2: 1х УКРМ-0,4-120, 1х УКРМ-0,4-70

КТП-3: 2 х УКРМ-0,4-120

КТП-4: 1х УКРМ-0,4-220, 1 х УКРМ-0,4-120

Загальна потужність компенсуючих пристроїв становить 7410 квар. Після компенсації реактивна потужність зменшується до 2283,09 квар, а коефіцієнт $\text{tg}\varphi$ становить 0,15, що відповідає заданій умові.

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ

5.1 Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій

Для машинобудівного підприємства приймаємо двотрансформаторні КТП, оскільки така схема дозволяє зберегти живлення основних споживачів при пошкодженні або виведенні з роботи одного трансформатора.

Номінальну потужність трансформаторів вибираємо за повною розрахунковою потужністю відповідної КТП. В нормальному режимі перевіряється коефіцієнт завантаження трансформаторів:

$$k_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{н.тр}}$$

де S_p - розрахункова повна потужність КТП, кВА; n - кількість трансформаторів у підстанції; $S_{н.тр}$ - номінальна потужність одного трансформатора, кВА.

Для аварійного режиму, коли один трансформатор відключений, другий має забезпечити живлення найбільш відповідальних електроприймачів. Перевірку виконуємо за наступною умовою:

$$S_{доп} = 1,4 \cdot S_{н.тр} \geq S_{ав}$$

де $S_{доп}$ - допустима потужність одного трансформатора в аварійному режимі, кВА; $S_{ав}$ - навантаження, яке залишається після відключення споживачів III категорії.

Для кожної КТП приймаємо два трансформатори потужністю $S_{н.тр} = 1000$ кВА.

					Арк. 35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Таблиця 5.1 - Вибір потужності та кількості трансформаторів КТП

КТП	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА	n , шт.	$S_{н.тр}$, кВА	k_3	$S_{ав}$, кВА
КТП-1	1177,92	1152,37	1647,87	2	1000	0,824	1235,90
КТП-2	1343,65	999,71	1674,76	2	1000	0,837	1256,07
КТП-3	1251,12	807,09	1488,86	2	1000	0,744	1116,65
КТП-4	1298,66	1186,39	1758,99	2	1000	0,879	1319,24

Примітка. Для всіх КТП виконується умова аварійного перевантаження: $S_{доп} = 1400 \text{ кВА} \geq S_{ав}$. В аварійному режимі передбачається відключення електроприймачів III категорії, тому прийнято $S_{ав} = 0,75 \cdot S_p$.

5.2 Перевірка прийнятих трансформаторів

Для кожної КТП сумарна встановлена потужність двох трансформаторів становить:

$$S_{\Sigma тр} = 2 \cdot S_{н.тр} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ кВА}$$

Найбільше розрахункове навантаження має КТП-4:

$$S_{p.max} = 1758,99 \text{ кВА} < 2000 \text{ кВА}$$

Отже, у нормальному режимі всі КТП забезпечують живлення підключених споживачів без перевищення номінальної сумарної потужності трансформаторів.

Для аварійного режиму найбільш несприятливим є також випадок КТП-4. Після відключення споживачів III категорії розрахункове аварійне навантаження становить:

$$S_{ав} = 0,75 \cdot 1758,99 = 1319,24 \text{ кВА}$$

$$S_{доп} = 1,4 \cdot 1000 = 1400 \text{ кВА}$$

$$1400 \text{ кВА} > 1319,24 \text{ кВА}$$

Таким чином, навіть для найбільш завантаженої КТП умова допустимого аварійного перевантаження виконується.

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3 Загальна характеристика вибору трансформаторів

Розташування КТП приймається з урахуванням картограми електричних навантажень. Трансформаторні підстанції доцільно встановлювати максимально ближче до центрів навантажень відповідних груп цехів, що дозволяє скоротити довжину мереж 0,4 кВ, зменшити втрати напруги та втрати електроенергії.

Прийняті КТП 10/0,4 кВ забезпечують живлення силових електроприймачів, освітлювальних установок і допоміжного обладнання машинобудівного підприємства. Для підвищення коефіцієнта потужності на стороні 0,4 кВ передбачається установка низьковольтних компенсуючих пристроїв, а на стороні 10 кВ - високовольтних БСК.

Остаточного до встановлення приймаємо: 4 КТПх2 трансформатори = 8 трансформаторів, $S_{н.тр} = 1000$ кВА.

Такий вибір відповідає розрахунковим потужностям КТП, забезпечує резервування живлення та припускає роботу в аварійному режимі за умови відключення споживачів III категорії.

5.4 Вибір електропічних трансформаторів

Електропічні трансформатори обирають за потужністю плавильних агрегатів з урахуванням енергетичних витрат на один технологічний цикл, тривалості плавки, коефіцієнта використання та коефіцієнта потужності установки. Для машинобудівного підприємства передбачено дві групи електропічних споживачів.

Розрахунок виконуємо за енергетичним балансом плавки. Сумарні витрати електричної енергії за цикл визначаються як сума корисної енергії та витрат:

$$W_{\Sigma} = W_{кор} + W_{т} + W_{е}$$

де $W_{кор}$ - корисна енергія, що витрачається на нагрівання і плавлення металу; $W_{т}$ - теплові втрати через корпус, футеровку та кришку печі; $W_{е}$ -

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	37

електричні втрати у струмопроводах, короткій мережі та обмотках трансформатора.

Розрахункова потужність пічного трансформатора визначається за формулою:

$$S_{тр} = W_{\Sigma} / (\eta_e \cdot K_v \cdot \cos\varphi \cdot t_{п})$$

де η_e - електричний ККД електропічної установки; K_v - коефіцієнт використання трансформатора; $\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності; $t_{п}$ - тривалість плавки, год.

Розрахунок для першої групи електропечей

Для першої групи плавильних агрегатів приймаємо витрати електроенергії за цикл $W_{\Sigma} = 3640$ кВт·год, електричний ККД $\eta_e = 0,94$, коефіцієнт використання $K_v = 0,90$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,85$, тривалість плавки $t_{п} = 1,80$ год.

$$S_{тр1} = 3640 / (0,94 \cdot 0,90 \cdot 0,85 \cdot 1,80) = 2816 \text{ кВА}$$

За результатом розрахунку найближчим стандартним значенням є 2800 кВА. Тому для першої групи електропечей приймаємо два пічні трансформатори потужністю 2800 кВА кожний:

$$S_{н. тр1} = 2 \cdot 2800 \text{ кВА}$$

Розрахунок для другої групи електропечей

Для другої групи плавильних агрегатів приймаємо $W_{\Sigma} = 2785$ кВт·год, $\eta_e = 0,94$, $K_v = 0,90$, $\cos\varphi = 0,85$, $t_{п} = 1,72$ год.

$$S_{тр2} = 2785 / (0,94 \cdot 0,90 \cdot 0,85 \cdot 1,72) = 2256 \text{ кВА}$$

Отримане значення відповідає стандартній потужності 2250 кВА. Для другої групи печей приймаємо два пічні трансформатори потужністю 2250 кВА кожний:

$$S_{н. тр2} = 2 \cdot 2250 \text{ кВА}$$

Перевіримо сумарну встановлену потужність прийнятих пічних трансформаторів:

$$S_{\Sigma} = 2 \cdot 2800 + 2 \cdot 2250$$

$$S_{\Sigma} = 5600 + 4500 = 10100 \text{ кВА}$$

					Арк. 38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Таблиця 5.2 - Вибір електропічних трансформаторів

Група електропечей	W_{Σ} , кВт·год	$\tau_{п}$, год	$S_{розр}$, кВА	Прийнята потужність трансформатора	Кількість
Перша група плавильних агрегатів	3640	1,80	2816	2800 кВА	2
Друга група плавильних агрегатів	2785	1,72	2256	2250 кВА	2

Отже, для електропічного комплексу машинобудівного підприємства приймаються чотири пічні трансформатори: два трансформатори потужністю 2800 кВА та два трансформатори потужністю 2250 кВА. Загальна встановлена потужність електропічних трансформаторів становить 10100 кВА, що відповідає прийнятій схемі електропостачання та заданому складу високовольтних електроприймачів.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	39

6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ

6.1 Розрахунок струмів коротких замикань

Для вибору високовольтного обладнання, кабельних ліній, трансформаторів струму та захисної апаратури необхідно визначити розрахункові струми короткого замикання. Розрахунок виконуємо для мережі 10 кВ із живленням від ГПП через РП-1. За вихідне розрахункове навантаження приймаємо $S_p = 15429,21$ кВА.

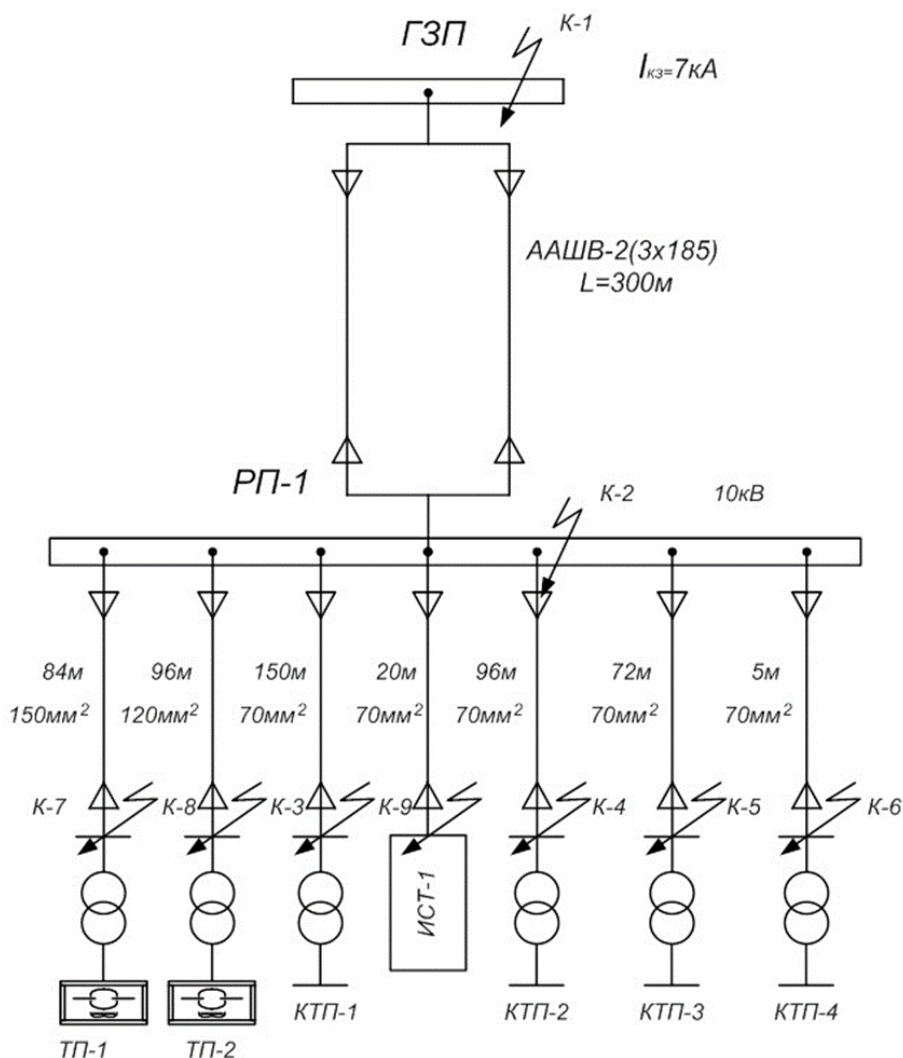


Рис. 6.1. Вихідна схема до розрахунку струмів КЗ

Розрахунковий струм у живильній лінії 10 кВ:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{15429.21}{\sqrt{3} \cdot 10} = 890,8 \text{ А}$$

Оскільки живлення РП-1 ви конується чотирма паралельними кабельними лініями, робочий струм однієї лінії становить:

$$I_1 = I_p / 4 = 890.8 / 4 = 222.7 \text{ А}$$

При аварійному відключенні однієї з чотирьох паралельних ліній струм у кабелі, що залишився в роботі, становитиме:

$$I_{ав} = I_p / 3 = 890.8 / 3 = 296.9 \text{ А}$$

Для подальшого вибору обладнання приймаємо струм трифазного КЗ на шинах РП-1 $I'' = 6,83 \text{ кА}$, ударний струм $i_{уд} = 16,36 \text{ кА}$. Ці значення використовуються для перевірки вимикачів, трансформаторів струму та кабелів на електродинамічну й термічну стійкість.

Постійна часу затухання аперіодичної складової:

$$T_a = X / (\omega \cdot R) = 0,027 \text{ с}$$

Тепловий імпульс для ввідного вимикача при $t_{відкл} = 1,5 \text{ с}$:

$$W_k = I''^2 \cdot (t_{відкл} + T_a) = 6.83^2 \cdot (1,5 + 0,027) = 71.2(\text{кА})^2 \cdot \text{с}$$

Для відхідних ліній приймаємо $t_{відкл} = 0,5 \text{ с}$:

$$W_k = 6.83^2 \cdot (0,5 + 0,027) = 24.6(\text{кА})^2 \cdot \text{с}$$

Результати розрахунку струмів КЗ надано в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Розрахункові струми короткого замикання в мережі 10 кВ

Ділянка	Точка КЗ	$I_{кз \text{ max}}, \text{ кА}$	$i_{уд}, \text{ кА}$	$I_{кз \text{ min}}, \text{ кА}$
ГПП	Шини 10 кВ ГПП	7,02	17,37	6,08
ГПП–РП-1	Шини РП-1	6,83	16,36	5,92
РП-1–КТП-1	Ввід КТП-1	6.39	14.10	5.56
РП-1–КТП-2	Ввід КТП-2	6.54	14.85	5.69
РП-1–КТП-3	Ввід КТП-3	6.61	15.20	5.75
РП-1–КТП-4	Ввід КТП-4	6.81	16.27	5.92
РП-1–ТП-1	Пічний трансформатор 2800 кВА	6,71	15,71	5,82
РП-1–ТП-2	Пічний трансформатор 2800 кВА	6,65	15,45	5,78
РП-1–ТП-3	Пічний трансформатор 2250 кВА	6,65	15,45	5,78
РП-1–ТП-4	Пічний трансформатор 2250 кВА	6,71	15,71	5,82

6.2 Вибір високовольтних вимикачів і комплектного розподільчого пристрою

Для РП-1 приймаємо комплектний розподільчий пристрій 10 кВ із вакуумними вимикачами. Вакуумні вимикачі вибираються за номінальною напругою, тривалим робочим струмом, вимикальною здатністю, електродинамічною та термічною стійкістю.

Для ввідної комірки РП-1 приймаємо вакуумний вимикач на 10 кВ номінальним струмом 1000 А та струмом вимикання 20 кА. Для секційної та відхідних ліній приймаємо вимикачі 10 кВ на 630 А зі струмом вимикання 20 кА.

Таблиця 6.2 – Вибір вимикачів РП-1 10 кВ

Приєднання	U, кВ	Iроб, А	In, А	Iкз, кА	Iвідкл, кА	iуд, кА	iдин, кА	Вк, (кА)²с	It²t, (кА)²с	Тип
Ввід РП-1	10	890.8	1000	6.83	20	16.36	51	71.2	3200	ВВ/TEL-10-20/1000
Секційний вимикач	10	445.4	630	6.83	20	16.36	51	24.6	3200	ВВ/TEL-10-20/630
Лінії до КТП-1...КТП-4	10	до 102	630	6.83	20	16.36	51	24.6	3200	ВВ/TEL-10-20/630
Лінії до ТП-1...ТП-4	10	до 162	630	6.83	20	16.36	51	24.6	3200	ВВ/TEL-10-20/630

6.3 Вибір високовольтних кабелів

Переріз кабельних ліній вибираємо за трьома умовами: за тривалим допустимим струмом, за економічною густиною струму та за термічною стійкістю до струмів короткого замикання. Остаточню приймається найбільше зі стандартних значень, що задовольняє всі умови.

$$F_{ек} = I_p / j_{ек}$$

$$F_{min} = \sqrt{B_k} \cdot 1000 / C$$

Для алюмінієвих жил приймаємо $C = 91$, економічна густина струму $j_{ек} = 1,2$ А/мм². Для ввідної лінії використовується тепловий імпульс ввідного вимикача, для відхідних ліній - тепловий імпульс відхідних приєднань.

$$F_{min. \text{ ввід}} = \sqrt{71.2 \cdot 1000 / 91} = 92.7 \text{ мм}^2$$

$$F_{min. \text{ відх}} = \sqrt{24.6 \cdot 1000 / 91} = 54.5 \text{ мм}^2$$

Таблиця 6.3 – Вибір перерізу високовольтних кабельних ліній

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№	Кабельна лінія	S, кВА	К-сть кабелів	І _p на кабель, А	І _{ав} , А	Feк, мм ²	F _{min} , мм ²	Прийнятий кабель
1	ГПП–РП-1	15429.21	4	222.7	296.9	185.6	92.7	4×АПвПу2г-10 3×240
2	РП-1–КТП-1	1647.87	2	47.6	95.1	39.6	54.5	2×АПвПу2г-10 3×70
3	РП-1–КТП-2	1674.76	2	48.3	96.7	40.3	54.5	2×АПвПу2г-10 3×70
4	РП-1–КТП-3	1488.86	2	43.0	86.0	35.8	54.5	2×АПвПу2г-10 3×70
5	РП-1–КТП-4	1758.99	2	50.8	101.6	42.3	54.5	2×АПвПу2г-10 3×70
6	РП-1–ТП-1	2800	1	161.7	161.7	134.7	54.5	1×АПвПу2г-10 3×150
7	РП-1–ТП-2	2800	1	161.7	161.7	134.7	54.5	1×АПвПу2г-10 3×150
8	РП-1–ТП-3	2250	1	129.9	129.9	108.3	54.5	1×АПвПу2г-10 3×120
9	РП-1–ТП-4	2250	1	129.9	129.9	108.3	54.5	1×АПвПу2г-10 3×120
10	РП-1–ІСТ-1	800	1	46.2	46.2	38.5	54.5	1×АПвПу2г-10 3×70
11	РП-1–ІСТ-2	800	1	46.2	46.2	38.5	54.5	1×АПвПу2г-10 3×70

6.4 Вибір трансформаторів струму та напруги

Трансформатори струму обираємо за номінальною напругою, первинним струмом, класом точності, термічною та динамічною стійкістю. Для ввідних приєднань, де встановлюються розрахункові лічильники, приймаємо клас точності 0,5S.

Таблиця 6.4 – Вибір трансформаторів струму 10 кВ

Приєднання	І _{роб} , А	Коеф. трансф.	Клас точності	U _н , кВ	Стійкість	Тип
Ввід РП-1	890,8	1000/5	0,5S/10P	10	І _{дин} 81 кА, І _{терм} 31,5 кА, 3 с	ТОЛ-10
Секційний вимикач	445,4	600/5	0,5/10P	10	І _{дин} 81 кА, І _{терм} 31,5 кА, 3 с	ТОЛ-10
Лінії до КТП	до 102	150/5	0,5/10P	10	І _{дин} 31,5 кА, І _{терм} 20 кА, 3 с	ТПЛ-10
Лінії до ТП 2800 кВА	162	200/5	0,5/10P	10	І _{дин} 31,5 кА, І _{терм} 20 кА, 3 с	ТПЛ-10
Лінії до ТП 2250 кВА	130	150/5	0,5/10P	10	І _{дин} 31,5 кА, І _{терм} 20 кА, 3 с	ТПЛ-10

Для вторинних кіл вимірювання перевіряємо навантаження трансформатора струму. Опір вторинного кола має не перевищувати допустиме значення для обраного класу точності.

$$Z_2 = Z_{\text{приладів}} + Z_{\text{конт}} + Z_{\text{проводів}} \leq Z_{2н}$$

$$Z_2 = 0,144 + 0,100 + 0,232 = 0,476 \text{ Ом} \leq 0,6 \text{ Ом}$$

Умова виконується, тому прийняті трансформатори струму забезпечують роботу вимірювальних приладів у заданому класі точності.

Трансформатор напруги вибирається за номінальною напругою і сумарним навантаженням вторинних кіл. Для РП-1 приймаємо трансформатор напруги НАМИТ-10 у класі точності 0,5.

Таблиця 6.5 – Вибір трансформатора напруги

Параметр	Умова	Розрахункове значення	Каталожне значення	Висновок
Номінальна напруга	$U_{\text{уст}} \leq U_n$	10 кВ	10 кВ	виконується
Вторинне навантаження	$S_{\Sigma} \leq S_n$	67,4 ВА	120 ВА	виконується
Клас точності	-	0,5	0,5	виконується

6.5 Вибір запобіжників для трансформатора власних потреб

Для захисту трансформатора власних потреб потужністю 60 кВА на стороні 10 кВ визначаємо номінальний струм:

$$I_n = S_n / (\sqrt{3} \cdot U_n)$$

$$I_n = 60 / (\sqrt{3} \cdot 10) = 3,47 \text{ А}$$

Приймаємо високовольтний запобіжник ПКТ-10-5-20 на номінальний струм 5 А зі струмом відключення 20 кА. Умова за струмом КЗ виконується, оскільки 6,83 кА < 20 кА.

7 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА СИСТЕМУ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Тиристорні перетворювачі належать до класу статичних силових перетворювачів електричної енергії та широко застосовуються в промисловості. Їх основною перевагою є можливість плавного регулювання вихідної напруги та струму. Разом з тим кероване комутування тиристорів призводить до виникнення нелінійностей, які є джерелом вищих гармонік, реактивної потужності та електромагнітних завад. Саме тому при дослідженні систем обліку електроенергії необхідно враховувати вплив таких пристроїв на точність вимірювання та якість електроенергії.

Робота тиристорних перетворювачів супроводжується спотворенням форми струму. Найбільший вплив мають гармоніки 5-го, 7-го, 11-го та 13-го порядків. Показником рівня спотворення є коефіцієнт гармонічних спотворень *THD*. Зростання *THD* призводить до збільшення втрат у мережі, перегріву трансформаторів, погіршення коефіцієнта потужності та зниження точності вимірювальних систем.

Нормативна та методична основа оцінювання

Під час аналізу показників якості електричної енергії в Україні доцільно керуватися чинними національними стандартами, гармонізованими з європейськими та міжнародними нормативними документами. Зокрема, вимоги щодо вимірювання гармонік та інтергармонік у системах електропостачання встановлені стандартом ДСТУ EN IEC 61000-4-7, який регламентує методи вимірювання та оцінювання гармонічних складових у мережах змінного струму частотою 50 Гц і визначає порядок спектрального аналізу сигналів у діапазоні частот до 9 кГц [1].

Для оцінювання параметрів якості електричної енергії важливе значення має стандарт ДСТУ EN IEC 61000-4-30, який визначає методи вимірювання показників якості електроенергії, порядок їх оброблення та інтерпретації результатів. Вимоги цього стандарту застосовуються під час контролю таких

					Арк. 45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

параметрів, як відхилення напруги, провали та перенапруги, гармонічні спотворення, несиметрія напруги та флікер у мережах змінного струму [2].

Основні характеристики напруги електричної енергії в мережах загального призначення регламентуються стандартом ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення». Стандарт визначає допустимі межі зміни параметрів напруги в точці приєднання споживача за нормальних умов експлуатації електричних мереж, включаючи частоту, рівень напруги, несиметрію фаз та показники гармонічних спотворень [3].

Вимоги до засобів обліку електричної енергії встановлюються стандартами серії ДСТУ EN IEC 62053. Зокрема, стандарт ДСТУ EN IEC 62053-22 поширюється на статичні лічильники активної електричної енергії високих класів точності, призначені для роботи в мережах змінного струму частотою 50 Гц, та визначає вимоги до їх метрологічних характеристик і процедур випробувань [4].

Слід зазначити, що в умовах експлуатації промислових електроустановок точність обліку електроенергії визначається не лише класом точності лічильника. Значний вплив на результати вимірювань мають характеристики вимірювальних трансформаторів струму та напруги, наявність вищих гармонік, несиметрія навантаження, а також відповідність параметрів якості електричної енергії вимогам чинних нормативних документів. За наявності значних гармонічних спотворень можливе збільшення сумарної похибки системи обліку, що необхідно враховувати під час аналізу роботи тиристорних перетворювачів та інших нелінійних навантажень.

7.1 Вплив несинусоїдальності напруги на технологічне обладнання

Відхилення форми кривої напруги від синусоїдальної негативно позначається на роботі більшості електроприймачів. Такий вплив обумовлений не лише додатковими тепловими втратами, спричиненими проходженням гармонічних складових струму, а й особливостями розподілу

					Арк. 46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

вищих гармонік за послідовностями. Гармоніки порядків 1, 4, 7, 10 та інші формують складові прямої послідовності, гармоніки 2, 5, 8, 11 тощо належать до зворотної послідовності, а гармоніки, кратні трьом, утворюють нульову послідовність. Кожна з них по-різному впливає на режими роботи електротехнічного обладнання через відмінність у чергуванні фаз струму та напруги.

Особливо несприятливим є вплив гармонік нульової послідовності. Вони викликають додаткове намагнічування магнітопроводів електричних машин і трансформаторів, що супроводжується зростанням магнітних втрат, підвищенням температури обмоток та погіршенням експлуатаційних характеристик обладнання. Для асинхронних двигунів це проявляється у збільшенні нагрівання статора, а для силових трансформаторів - у перевантаженні магнітної системи та зниженні ефективності роботи.

Наявність гармонічних складових у напрузі та струмі призводить до додаткових втрат енергії в електричних машинах, трансформаторах, кабельних лініях і розподільчих мережах. Крім того, прискорюється старіння ізоляції, зменшується ресурс електрообладнання, підвищується ймовірність виникнення аварійних режимів. Вищі гармоніки можуть також викликати помилкові спрацьовування систем релейного захисту, порушення роботи засобів автоматики, телемеханіки та каналів зв'язку.

Гармонічні спотворення впливають на коефіцієнт потужності електроустановок і електромагнітний момент електродвигунів. Однак за помірних значень коефіцієнта гармонічних спотворень напруги (THD до 10-15 %) зниження цих показників зазвичай не є критичним. Значно відчутнішими стають додаткові втрати електроенергії. За результатами досліджень встановлено, що в магістральних електричних мережах вони можуть становити декілька відсотків від втрат, характерних для режиму з синусоїдальною напругою. У системах електропостачання промислових підприємств та енергоємних виробництв цей показник інколи досягає 10-15 % від загальних технічних втрат.

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одними з найбільш чутливих до впливу гармонік є кабельні лінії. Зі збільшенням коефіцієнта гармонічних спотворень напруги прискорюються процеси деградації ізоляційних матеріалів, що скорочує термін служби кабельної продукції. Стан ізоляції оцінюють за величиною струму витоку, який характеризує діелектричні втрати. Експериментальні дослідження показують, що за тривалого впливу підвищеного рівня гармонік струм витоку поступово зростає, що свідчить про погіршення електричної міцності ізоляції та збільшення ризику її передчасного руйнування.

З огляду на це контроль гармонічного складу напруги є важливою складовою забезпечення надійності роботи технологічного обладнання та підтримання нормативних показників якості електричної енергії відповідно до вимог чинних українських стандартів.

Несинусоїдальність напруги суттєво впливає на надійність та довговічність роботи електрообладнання. Одним із наслідків такого впливу являється прискорене старіння ізоляції електричних машин, силових трансформаторів, конденсаторних батарей і кабельних ліній. Це зумовлено як додатковим нагріванням струмопровідних елементів, так і перебігом фізико-хімічних процесів у діелектричних матеріалах під дією електричних полів, створених вищими гармоніками струму та напруги.

Результати розрахунків і експлуатаційних досліджень свідчать, що для асинхронних двигунів додаткові втрати активної потужності, спричинені гармонічними складовими напруги, зазвичай є незначними. Це пояснюється тим, що зі збільшенням порядку гармоніки зростає індуктивний опір обмоток статора, унаслідок чого струми вищих гармонік значною мірою обмежуються. Крім того, амплітуди гармонічних складових напруги зменшуються зі зростанням їх порядку. Винятком можуть бути режими, за яких у мережі виникають резонансні явища, що призводять до локального підсилення окремих гармонік.

Досвід експлуатації промислових електроустановок показує, що за значень коефіцієнта гармонічних спотворень напруги $THD_U = 10-15 \%$

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

помітного додаткового нагрівання асинхронних двигунів не спостерігається ані при номінальному навантаженні, ані при роботі в режимі часткового завантаження. Однак тривалий вплив гармонік може сприяти поступовому погіршенню стану ізоляції та зниженню ресурсу обладнання.

Термін служби електричних машин значною мірою визначається тепловим станом їх обмоток. Перевищення допустимої температури прискорює старіння ізоляції та підвищує ймовірність виникнення пошкоджень. Температура обмоток формується під впливом температури навколишнього середовища t_{nc} , коефіцієнта завантаження машини за потужністю β_m , відносного відхилення напруги δU , напруги зворотної послідовності U_2 та гармонічних складових напруги U_v . Сукупна дія зазначених факторів визначає величину перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища та, відповідно, швидкість деградації ізоляційних матеріалів.

Для забезпечення надійної роботи електричних машин у мережах із нелінійними навантаженнями необхідно контролювати рівень гармонічних спотворень, оскільки зростання значень THD_U , U_2 та відхилення напруги δU призводить до погіршення теплового режиму обладнання та скорочення строку його експлуатації.

Максимальне теплове навантаження на асинхронний двигун спостерігається за умов його роботи з номінальним або близьким до номінального завантаженням та при мінімально допустимому значенні напруги живлення. У такому режимі температурний запас практично відсутній, тому додатковий вплив будь-яких факторів, що збільшують втрати потужності, може спричинити перевищення допустимої температури обмоток.

У разі зменшення коефіцієнта завантаження двигуна β_m або підвищення напруги на його затискачах формується певний резерв за температурою нагріву. Наявність такого запасу дає можливість експлуатувати електродвигун за наявності напруги зворотної послідовності U_2 та гармонічних складових U_v без перевищення допустимих температурних режимів.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	49

Струми, що створюються складовими зворотної послідовності та вищими гармоніками в обмотках електродвигуна, залежать не лише від значень U_2 і U_v , а й від конструктивних параметрів машини. Одним із визначальних показників є кратність пускового струму k_n , яка характеризує співвідношення пускового та номінального струмів двигуна. Тому допустимі рівні напруги зворотної послідовності та гармонічних складових для різних типів двигунів можуть істотно відрізнятися.

На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що оцінювання допустимих режимів роботи двигунів доцільно виконувати з урахуванням запасу температурної стійкості за коефіцієнтом завантаження A_β та запасу за відхиленням напруги $A_{\delta U}$. Значення зазначених параметрів визначаються за відповідними довідковими таблицями та залежать від типу електродвигуна і величини кратності пускового струму k_n . Для двигунів з $k_n = 4,5$ характерні більші значення температурного резерву, тоді як для машин з $k_n = 7$ допустимий запас є меншим, що обумовлено особливостями їх електромагнітних і теплових характеристик.

Результати досліджень показують, що допустимий рівень впливу несиметрії напруги та гармонічних спотворень значною мірою визначається наявним температурним резервом електродвигуна. Для його оцінювання використовують запас температурної стійкості за коефіцієнтом завантаження A_β та запас за відхиленням напруги живлення $A_{\delta U}$, значення яких наведено в табл. 7.1 і табл. 7.2.

Таблиця 7.1 - Запас температурної стійкості залежно від коефіцієнта завантаження двигуна

Завантаження β_m , %	100	90	80	70	60
Запас A_β , %	0	3,3-5,2	5,9-9,2	7,2-12,0	8,7-13,6

Таблиця 7.2 - Запас температурної стійкості залежно від відхилення напруги

Відхилення напруги δU , %	-5	0	+5	+10
Запас $A_{\delta U}$, %	0	5,5-8,5	6,9-10,5	7,2-11,1

Наведені значення характеризують допустимий температурний резерв, який може бути використаний для компенсації додаткового нагрівання, викликаного напругою зворотної послідовності U_2 та гармонічними складовими U_v . Для забезпечення нормального теплового режиму електродвигуна сумарний запас температурної стійкості повинен перевищувати температурний вплив, спричинений зазначеними факторами.

Температурну дію складових зворотної послідовності та вищих гармонік визначають за формулою (7.1):

$$A_{2,v} = 120 \sqrt{K_{2U}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{\sqrt{v}}} \quad (7.1)$$

Аналіз отриманих результатів свідчить, що допустимі режими роботи електрообладнання з точки зору нагрівання обмоток не завжди збігаються з нормативними межами показників якості електричної енергії, встановленими для мереж загального призначення. Навіть за дотримання вимог ДСТУ EN 50160:2023 щодо параметрів напруги окремі типи електродвигунів можуть працювати в умовах підвищеного теплового навантаження через вплив складових зворотної послідовності та гармонічних спотворень. Тому під час оцінювання впливу якості електроенергії на електромеханічне обладнання доцільно враховувати не лише нормативні показники мережі, а й індивідуальні теплові характеристики.

Додаткові втрати активної потужності в асинхронних двигунах, зумовлені несиметрією та гармонічними спотвореннями напруги живлення, практично не залежать від ступеня механічного навантаження. Їх величина визначається параметрами якості електричної енергії та конструктивними

					Арк. 51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

особливостями електричної машини. Для оцінювання цих втрат використовується залежність [12]:

$$\Delta P_{\text{Ад}} = \Delta P_{\text{м1ном}} k_{\text{п}}^2 \left(2,41 K_{2U}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right), \quad (7.2)$$

де $\Delta P_{\text{Ад}}$ - додаткові втрати активної потужності в асинхронному двигуні, обумовлені несиметрією та гармонічними спотвореннями напруги;

$\Delta P_{\text{м1ном}}$ - втрати потужності в обмотках статора при номінальному струмі основної гармоніки;

$k_{\text{п}}$ - кратність пускового струму двигуна за номінальної напруги та частоти живлення;

K_{2U} - коефіцієнт несиметрії напруги, що визначається як відношення напруги зворотної послідовності U_2 до номінальної напруги мережі;

U_v - відносне значення напруги гармоніки порядку v , виражене у частках номінальної напруги;

v - порядок гармонічної складової.

Із виразу (7.2) видно, що величина додаткових втрат залежить як від рівня несиметрії напруги K_{2U} , так і від амплітудного складу вищих гармонік U_v . При цьому вплив гармонік різного порядку є неоднаковим і визначається коефіцієнтом, що входить до складу підсумовуваного виразу.

Під час розрахунків знак «+» у чисельнику використовується для гармонік, які створюють магнітне поле, напрямлене протилежно до поля основної гармоніки. Знак «-» відповідає гармонічним складовим, що формують магнітне поле того самого напрямку, що й основна гармоніка. Така особливість пояснюється різним характером взаємодії гармонічних полів із ротором двигуна.

Аналіз формули (7.2) показує, що навіть порівняно невеликі значення K_{2U} та U_v можуть спричиняти відчутне збільшення втрат потужності, особливо для двигунів із високою кратністю пускового струму $k_{\text{п}}$. Наслідком цього є додатковий нагрів обмоток, погіршення енергетичних показників і скорочення ресурсу електричної машини.

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для інженерних розрахунків додаткових втрат потужності в асинхронних двигунах, викликаних несиметрією та гармонічними спотвореннями напруги, доцільно використовувати спрощену розрахункову залежність [10]:

$$P_{\text{АД доп}} = \left(k_2 K_{2U}^2 + k_r \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right) \frac{P_n}{10^4}, \quad (7.3)$$

де P_n - номінальна потужність двигуна.

Величини коефіцієнтів k_2 і k_r визначаються залежностями [10], які враховують параметри конкретного електродвигуна та умови його роботи:

$$k_2 = 2,41k_d; \quad (7.4)$$

$$k_r = 2k_d. \quad (7.5)$$

Коефіцієнт k_d є функцією номінальної потужності двигуна і встановлюється відповідно до емпіричних залежностей або довідкових таблиць, наведених у нормативно-технічній літературі:

$$\begin{aligned} &\text{при } P_n \leq 5 \text{ кВт, } k_d = 3 + 0,3(5 - P_n); \\ &\text{при } 5 < P_n \leq 100 \text{ кВт, } k_d = 1 + 0,02(100 - P_n); \\ &\text{при } 100 < P_n \leq 1000 \text{ кВт, } k_d = 0,4 + 0,0007(1000 - P_n); \\ &\text{при } P_n > 1000 \text{ кВт, } k_d = 0,4. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Додаткове підвищення температури обмоток асинхронного двигуна, спричинене впливом несиметрії та гармонічних спотворень напруги живлення, визначається за формулою:

$$\Delta t = \frac{\Delta P_{\text{млном}} k_p^2}{B} \left(1,55 K_{2U}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v} + 0,39\sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right), \quad (7.7)$$

де B - тепловий параметр АД.

Отримані значення додаткового перегріву дозволяють оцінити вплив показників якості електричної енергії на тепловий стан електричної машини та прогнозувати зміну ресурсу ізоляції. Для визначення очікуваного терміну служби ізоляції застосовується емпірична залежність

					Арк.
					53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$Z = C e^{-b\theta}, \quad (7.8)$$

де C і b - емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу ізоляційного матеріалу; θ - температура ізоляції.

З аналізу залежності (7.8) випливає, що навіть незначне підвищення температури ізоляції призводить до істотного скорочення її ресурсу. Саме тому контроль коефіцієнта несиметрії K_{2U} та рівня гармонічних спотворень THD_U є важливою умовою забезпечення надійної та довготривалої роботи асинхронних двигунів.

Для оцінювання впливу температурного режиму на довговічність ізоляційної системи електричної машини використовують відносний показник ресурсу ізоляції. Відносна тривалість служби ізоляції при робочій температурі τ визначається за залежністю (7.9):

$$z = \frac{T_i}{T_{ном}} = e^{-b\Delta\tau}, \quad (7.9)$$

T_i - розрахунковий термін служби ізоляції при температурі τ ;

$T_{ном}$ - ресурс ізоляції за номінальної температури;

$\Delta\tau = \theta - \theta_{ном}$ - додаткове перевищення температури ізоляції відносно номінального значення.

В практичних розрахунках часто застосовується спрощена залежність для визначення ресурсу ізоляції, наведена у формулі (7.10). Використання такого підходу дозволяє оперативно оцінити вплив перегріву на довговічність електричної машини без виконання складних теплових розрахунків:

$$z = e^{-280 \left(1,55 K_{2U}^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right)}, \quad (7.10)$$

де z - коефіцієнт прискорення старіння ізоляції;

K_{2U} - коефіцієнт спотворення напруги.

Величина, зворотня z - це кратність терміну служби:

					Арк.
					54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$\gamma = \frac{1}{Z} = e^{b\Delta\tau} = e^{k_{\text{спот}}}, \quad (7.11)$$

де $k_{\text{спот}}$ - коефіцієнт спотворення.

Для асинхронних двигунів величина коефіцієнта спотворення визначається за формулою:

$$k_{\text{спот}} = 389K_{2U}^2 + 434 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}. \quad (7.12)$$

З наведених залежностей випливає, що навіть порівняно невелике підвищення температури ізоляції може суттєво скоротити строк служби електричної машини. Це пояснюється експоненціальним характером процесів термічного старіння ізоляційних матеріалів.

Несиметричні та несинусоїдальні режими роботи мережі негативно впливають не лише на електричні машини, а й на інші елементи системи електропостачання. Зокрема, у силових трансформаторах виникають додаткові втрати активної потужності, обумовлені протіканням струмів зворотної послідовності та гармонічних складових. Підвищення рівня гармонік призводить до збільшення втрат у міді обмоток, зростання втрат у магнітопроводі та погіршення теплового режиму трансформатора. Наслідком цього є прискорене старіння ізоляції, зниження енергоефективності та скорочення терміну експлуатації обладнання.

Розглянемо особливості роботи силового трифазного трансформатора в умовах несиметричного режиму електропостачання. Оскільки трансформатор є статичним електротехнічним пристроєм, черговість фаз не впливає на характер електромагнітних процесів, що відбуваються в його обмотках. Саме тому для визначення додаткових втрат від струмів зворотної послідовності можуть використовуватися підходи, аналогічні до методів розрахунку симетричних режимів.

Додаткові втрати активної потужності, викликані несиметрією напруги, визначаються за формулою:

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	55

$$\Delta P'_T = K_{2U}^2 \left(\Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{k.3}}{u_{k.3}^2} \right). \quad (7.13)$$

Перший доданок у формулі (7.13), як правило, є істотно меншим за другий, тому в інженерній практиці його впливом часто нехтують без суттєвого зниження точності розрахунків.

Сумарні додаткові втрати, зумовлені гармонічними складовими напруги та струму, визначаються за залежністю:

$$\Delta P''_T = \Delta P_{xx} \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{k.3}}{u_{k.3}^2} \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 \frac{1 + 0,05v^2}{v\sqrt{v}}. \quad (7.14)$$

Для спрощення подальших розрахунків втрати холостого ходу та короткого замикання доцільно виразити через номінальну повну потужність трансформатора S_H :

$$k_{xx} = \frac{\Delta P_{xx}}{S_H}, \quad (7.15)$$

$$k_{k.3} = \frac{\Delta P_{k.3}}{S_H}. \quad (7.16)$$

З урахуванням співвідношень (7.15) та (7.16) додаткові втрати активної потужності, обумовлені одночасною дією несиметрії та гармонічних спотворень напруги, можуть бути визначені за формулою:

$$\Delta P_{T \text{ дод}} = \left(2,67 K_{2U}^2 + 1,62 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05v^2}{v\sqrt{v}} U_v^2 \right) \frac{S_H}{10^4}, \quad (7.17)$$

де S_H - номінальна потужність трансформатора, кВА.

Аналіз формули (7.17) показує, що величина додаткових втрат залежить як від коефіцієнта несиметрії напруги K_{2U} , так і від амплітуд гармонічних складових U_v . Зі збільшенням рівня несиметрії та гармонічних спотворень зростає нагрівання обмоток і магнітопроводу трансформатора, що призводить до зниження його енергоефективності та прискореного старіння ізоляції.

					Арк.
					56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

На відміну від асинхронних двигунів, трансформатори є більш чутливими до впливу гармонік високих порядків, оскільки втрати на вихрові струми в елементах магнітної системи зростають пропорційно частоті. Тому в мережах із значною часткою нелінійного навантаження контроль показників K_{2U} та THD_U має важливе значення для забезпечення надійної та економічної роботи трансформаторного обладнання.

Додаткові втрати потужності, що виникають у силових трансформаторах під впливом несиметрії напруги та гармонічних спотворень, супроводжуються збільшенням температури обмоток. Підвищення теплового навантаження призводить до прискореного старіння ізоляційної системи та, як наслідок, до зменшення експлуатаційного ресурсу трансформатора.

Додатковий перегрів обмоток, викликаний протіканням струмів зворотної послідовності та вищих гармонік, оцінюється як різниця між перевищенням температури обмоток над температурою навколишнього середовища в досліджуваному режимі та відповідним перевищенням температури за номінальних умов роботи. Таким чином, величина додаткового нагрівання характеризує вплив погіршення якості електричної енергії на тепловий стан трансформатора.

Для визначення додаткового перегріву використовується залежність:

$$\Delta\tau = \tau_{м.н} \left[\left(\frac{\Sigma P}{\Sigma P_n} \right)^{0,7} - 1 \right] + \tau_{об.н} (\beta^{1,4} - 1), \quad (7.18)$$

де $\tau_{м.н}$ - усталене перевищення температури масла над температурою навколишнього середовища за номінального режиму роботи;

$\tau_{об.н}$ - усталене перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища за номінального навантаження;

ΣP - сумарні втрати потужності в трансформаторі при фактичному режимі роботи;

ΣP_n - сумарні втрати потужності за номінальних умов експлуатації;

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

β - коефіцієнт завантаження трансформатора, що визначається як відношення фактичного струму навантаження до його номінального значення, в спотвореному режимі представляють у вигляді

$$\beta = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_v^2}}{I_H}, \quad (7.19)$$

де I_1 - струм прямої послідовності в обмотках трансформатора;

I_2 - струм зворотної послідовності;

I_v - діюче значення струму гармоніки порядку v .

Умови роботи трансформатора в несиметричних та несинусоїдальних режимах супроводжуються появою додаткових втрат потужності, що призводить до погіршення його теплового стану. Для оцінювання впливу цих факторів визначають перевищення температури обмоток над температурою навколишнього середовища, яке є одним із основних показників надійності та довговічності ізоляційної системи.

Розрахунок перевищення температури обмоток виконується за відповідною залежністю:

$$\Delta T = \alpha K_{TU}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{d_1 + d_2 v^2 + d_3 \frac{1}{\sqrt{v}}}{v \sqrt{v}}, \quad (7.20)$$

Значення зазначених коефіцієнтів визначаються за аналітичними залежностями, наведеними в [10]. Їх використання дозволяє врахувати вплив конструктивних параметрів трансформатора та особливостей режиму його роботи на тепловий стан обмоток і величину додаткових втрат потужності.

Розрахунок коефіцієнтів виконується за такими формулами:

$$\alpha_1 = 0,7 \frac{\tau_{MH} k_{K.S}}{u_{K.S}^2 (k_{X.X} + k_{K.S})}, \quad (7.21)$$

$$\alpha_2 = 0,7 \frac{\tau_{O.H}}{u_{K.S}^2}, \quad (7.22)$$

					Арк.
					58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (7.23)$$

$$d_1 = 0,607\alpha_1, \quad (7.24)$$

$$d_2 = 0,03\alpha_1, \quad (7.25)$$

$$d_3 = 1,291\alpha_2. \quad (7.26)$$

Розрахунок коефіцієнта спотворення виконується за такою залежністю:

$$k_{\text{спот}} = 207K_{2U}^2 + 610 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05v^2 + \frac{1,7}{\sqrt{v}}}{v\sqrt{v}} U_v^2. \quad (7.27)$$

Повітряні та кабельні лінії електропередачі, як і силові трансформатори, є невід'ємними складовими систем електропостачання. Тому в умовах несиметрії напруги та наявності гармонічних спотворень у мережі через них протікають струми зворотної послідовності та струми вищих гармонік, які викликають додаткові втрати електроенергії.

Поява зазначених складових струму призводить до збільшення теплових втрат у провідниках ліній електропередачі, оскільки діюче значення струму зростає порівняно з режимом, що відповідає симетричному синусоїдальному навантаженню. Внаслідок цього підвищується температура струмопровідних елементів, збільшуються втрати активної потужності та погіршується ефективність роботи електричної мережі.

Сумарні втрати активної потужності в лініях електропередачі за несиметричного та несинусоїдального режимів роботи визначаються за наступною залежністю:

$$\Delta P_{\pi} = \left(3I_1^2 + 3I_2^2 + 1,41 \sum_{v=2}^{\infty} \sqrt{v} I_v^2 \right) r, \quad (7.28)$$

де I_1 - діюче значення струму прямої послідовності;

I_2 - діюче значення струму зворотної послідовності.

Зазначені струми характеризують ступінь несиметрії режиму роботи електричної мережі та використовуються під час розрахунку додаткових втрат

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	59

потужності в лініях електропередачі. Зі збільшенням величини струму зворотної послідовності зростають втрати електроенергії, що призводить до додаткового нагрівання провідників і зниження ефективності функціонування системи електропостачання.

7.2 Вплив несиметрії напруги на технологічне обладнання

Несиметрія напруги в електричних мережах промислових підприємств виникає переважно внаслідок роботи потужних однофазних електроприймачів, до яких належать індукційні плавильні та нагрівальні установки, зварювальне обладнання, а також агрегати електрошлакового переплавлення. Джерелом несиметрії можуть бути і трифазні електроустановки, що тривалий час функціонують у несиметричних режимах, зокрема дугові сталеплавильні печі. Крім того, порушення симетрії фазних напруг можливе під час живлення промислових мереж від тягових підстанцій змінного струму.

Наявність несиметрії напруги негативно впливає на роботу елементів системи електропостачання та електротехнологічного обладнання. Одним із наслідків є зростання додаткових втрат активної потужності в електричних мережах, що призводить до зниження їх енергоефективності. Одночасно скорочується ресурс освітлювальних приладів, електричних машин, трансформаторів та іншого електрообладнання, що погіршує техніко-економічні показники роботи підприємства.

Особливо чутливими до несиметрії напруги є електричні машини змінного струму. За таких умов у повітряному проміжку машини виникає не лише основне магнітне поле прямої послідовності, яке обертається із синхронною швидкістю в напрямку руху ротора, але й додаткове магнітне поле зворотної послідовності. Останнє обертається відносно ротора у протилежному напрямку та створює додаткові електромагнітні втрати, викликає нагрівання обмоток і погіршує експлуатаційні характеристики електричної машини.

						Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У результаті дії напруги зворотної послідовності зростають втрати потужності, зменшується коефіцієнт корисної дії двигунів, погіршується їх тепловий режим і скорочується строк служби ізоляції. Тривала робота обладнання за підвищених значень коефіцієнта несиметрії напруги K_{2U} може стати причиною передчасного старіння електрообладнання та збільшення витрат на його технічне обслуговування.

Експлуатаційні дослідження показують, що навіть відносно невелика несиметрія напруги може суттєво впливати на довговічність асинхронних двигунів. Так, при роботі двигуна з номінальним навантаженням і коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю $K_{2U} = 4\%$ термін служби ізоляції обмоток може зменшуватися приблизно вдвічі внаслідок додаткового теплового навантаження. Якщо ж напруга однієї з фаз перевищує номінальне значення, інтенсивність старіння ізоляції ще більше зростає, що призводить до подальшого скорочення ресурсу електричної машини.

Для забезпечення допустимого теплового режиму за наявності несиметрії напруги необхідно обмежувати механічне навантаження двигуна або передбачати певний резерв потужності під час вибору електродвигуна. На етапі проектування систем електропостачання доцільно також застосовувати технічні заходи, спрямовані на зменшення несиметрії напруги в мережі.

На відміну від асинхронних двигунів, повітряні та кабельні лінії електропередачі менш чутливі до впливу несиметрії напруги. Водночас для силових трансформаторів наслідки можуть бути досить суттєвими через додаткове нагрівання обмоток і прискорене старіння ізоляції. У разі несиметричного навантаження температура масла трансформатора зазвичай підвищується менше, ніж при симетричному режимі з таким самим струмом у найбільш навантаженої фазі. Це пояснюється більш інтенсивним відведенням тепла від перевантаженої обмотки.

Зазначений ефект характерний для режимів, у яких несиметрія навантаження не супроводжується появою струмів нульової послідовності. Подібні умови зазвичай реалізуються в мережах напругою 6-35 кВ з

						Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ізолюваною або компенсованою нейтраллю, що широко застосовуються на промислових підприємствах.

Результати досліджень свідчать, що за коефіцієнта несиметрії напруги $K_{2U} = 2\%$ термін служби асинхронних двигунів може зменшуватися приблизно на 10,8 %, тоді як для силових трансформаторів скорочення ресурсу становить близько 4 %. Для зниження додаткового нагрівання двигунів у таких умовах рекомендується зменшувати навантаження на валу. Водночас для трансформаторів за номінального навантаження та коефіцієнта несиметрії струмів $K_{2I} = 0,1$ строк служби ізоляції може скорочуватися приблизно на 16 %, що свідчить про необхідність контролю показників симетрії режиму роботи електричної мережі.

7.3 Дослідження впливу несинусоїдальності напруги в системах електропостачання з частотно-керованими приводами

Показники якості електричної енергії, зокрема відхилення напруги та частоти, гармонічні спотворення і несиметрія напруги та струмів, суттєво впливають на режими роботи електричних мереж, рівень втрат електроенергії, а також точність функціонування засобів обліку та контролю електроспоживання.

Під час визначення звітних втрат електроенергії ΔW враховують технічні, технологічні та комерційні складові. Загальні втрати встановлюються як різниця між обсягом електроенергії, що надійшов до мережі W_c , та кількістю електроенергії, відпущеної споживачам і оплаченої ними W_n .

Технологічні втрати електроенергії ΔW_T включають витрати на власні потреби підстанцій $W_{вп}$, а також похибки вимірювання електроенергії $W_{зм}$, які виникають унаслідок неточностей вимірювальних трансформаторів, лічильників та інших елементів системи обліку. Такі втрати безпосередньо пов'язані з технологічними особливостями процесу передавання та розподілу електричної енергії.

						Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комерційні втрати формуються під впливом організаційних і людських факторів. До них належать несанкціоноване споживання електроенергії, помилки розрахунків, неповна або несвоєчасна оплата спожитої електроенергії та інші чинники, що призводять до розбіжностей між фактичним і облікованим електроспоживанням.

$$\Delta W_{\text{к}} = \Delta W - \Delta W_{\text{т}} - W_{\text{ВП}} - W_{\text{зм}}$$

Під час аналізу технологічних втрат доцільно окремо враховувати додаткові складові, пов'язані з відхиленням режимів роботи вимірювальних засобів від нормативних умов експлуатації. Однією з головних причин таких відхилень є погіршення показників якості електричної енергії. Особливо актуальною ця проблема є для систем електропостачання з частотно-керованими приводами, які належать до нелінійних навантажень та є джерелом значної кількості вищих гармонік.

Наявність гармонічних складових струму і напруги призводить до збільшення похибок вимірювання електроенергії, додаткових втрат у трансформаторах струму та напруги, а також до погіршення точності роботи електронних засобів обліку. Внаслідок цього фактичні технологічні втрати можуть перевищувати значення, визначені для режимів із синусоїдальною формою напруги.

Крім того, зниження якості електричної енергії може мати економічні наслідки для електропостачальних організацій. У сучасній практиці значна увага приділяється контролю відповідності параметрів електроенергії вимогам нормативних документів. У випадку істотного відхилення показників якості від установлених норм споживач має право вимагати перерахунку вартості електроенергії відповідно до умов договору та чинних нормативно-правових актів. Тому забезпечення нормативного рівня гармонічних спотворень, несиметрії та інших показників якості електроенергії є важливою складовою підвищення ефективності роботи систем електропостачання з частотно-керованими приводами.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	63

Для аналізу механізмів виникнення додаткових технологічних втрат електроенергії в умовах несиметрії та гармонічних спотворень необхідно розглянути баланс потужності в системі електропостачання. На рис. 7.1 наведено спрощену структурну схему електричної мережі, до складу якої входять лінійне та нелінійне навантаження.

Нелінійне навантаження, до якого належать частотно-керовані електроприводи, випрямлячі та інші силові напівпровідникові перетворювачі, споживає активну потужність на основній гармоніці промислової частоти. Водночас у процесі роботи воно генерує вищі гармоніки струму, а також може створювати складові зворотної та нульової послідовностей. Частина енергії основної гармоніки перетворюється на енергію гармонічних спотворень і повертається до мережі, що призводить до появи додаткових втрат у лініях електропередачі, трансформаторах, комутаційній апаратурі та інших елементах системи електропостачання.

Величина додаткових технічних втрат значною мірою залежить від рівня гармонічних спотворень напруги. За значень коефіцієнта гармонічних спотворень напруги THD_U до 5 % їх вплив на загальний баланс втрат зазвичай є незначним. Однак зі збільшенням THD_U до 7-15 % частка втрат, зумовлених вищими гармоніками, може досягати 10-12 % від сумарних втрат потужності в системі електропостачання.

Особливо небезпечними є режими, близькі до резонансних. У таких умовах відбувається значне підсилення окремих гармонічних складових струму та напруги, що супроводжується різким зростанням додаткових втрат потужності, перевантаженням обладнання та погіршенням показників якості електричної енергії. Саме тому під час експлуатації систем електропостачання з частотно-керованими приводами необхідно контролювати рівень гармонічних спотворень і вживати заходів щодо їх обмеження.

						Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

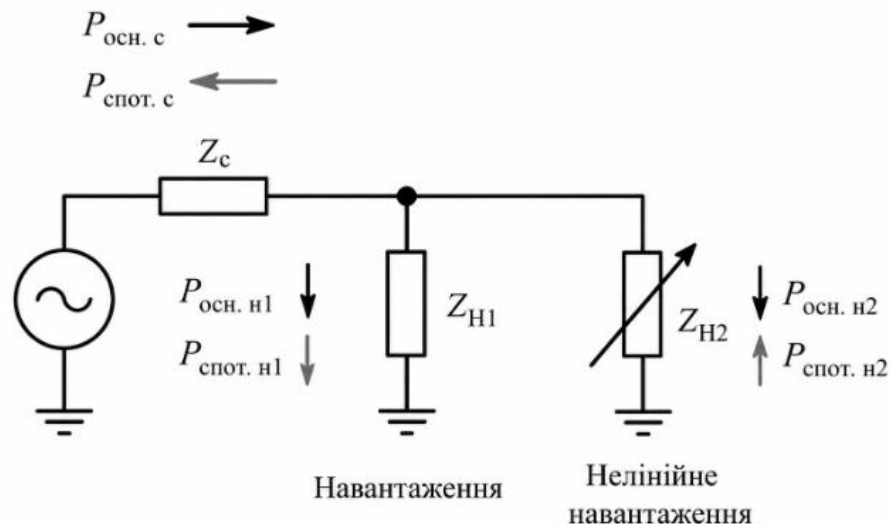


Рис. 7.1 - Розподіл активних потужностей у системі електропостачання за наявності нелінійного навантаження:

Z_c - еквівалентний опір енергосистеми; Z_{H1} - опір лінійного (неспотворюючого) навантаження; Z_{H2} - опір нелінійного (спотворюючого) навантаження; $P_{осн.с}$ - активна потужність основної гармоніки, що надходить від джерела живлення; $P_{осн.н1}$ - активна потужність основної гармоніки, споживана лінійним навантаженням; $P_{осн.н2}$ - активна потужність основної гармоніки, споживана нелінійним навантаженням; $P_{спот.с}$ - потужність спотворень, що надходить до мережі від нелінійного навантаження; $P_{спот.н1}$ - потужність спотворень, яка розсіюється в елементах лінійного навантаження; $P_{спот.н2}$ - потужність спотворень, пов'язана з роботою нелінійного навантаження.

Несиметрія напруги є одним із факторів, що спричиняє додаткові втрати потужності та електроенергії в елементах системи електропостачання. Причиною цього є виникнення струмів зворотної та нульової послідовностей, які створюють додаткове теплове навантаження на електричні машини, трансформатори, лінії електропередачі та засоби обліку електроенергії.

Особливо чутливими до впливу несиметричних режимів є індукційні лічильники електроенергії. Зі збільшенням коефіцієнта несиметрії напруги K_{2U} суттєво зростають додаткові втрати потужності в їхніх обмотках. Так, за значення $K_{2U} = 2 \%$ додаткові втрати потужності $\Delta P_{доd}$ можуть становити

					Арк.
					65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

близько 8 % від основних втрат $\Delta P_{осн}$, обумовлених струмами прямої послідовності. При підвищенні коефіцієнта несиметрії до $K_{2U} = 5$ % величина додаткових втрат може досягати приблизно 50 % від значення $\Delta P_{осн}$ [10].

Зростання втрат у вимірювальних елементах лічильників негативно впливає на їхній тепловий режим та метрологічні характеристики, що в окремих випадках може призводити до збільшення похибки обліку електричної енергії. Тому контроль рівня несиметрії напруги є важливою умовою забезпечення достовірності комерційного та технічного обліку електроенергії.

7.4 Дослідження впливу тиристорних перетворювачів на систему обліку електроенергії

Розглянемо чинники, які змінюють умови роботи вимірювального тракту: несинусоїдальність струму, спотворення напруги в точці приєднання, зміна коефіцієнта потужності, перевантаження трансформаторів струму вищими гармоніками та можлива додаткова похибка електронного лічильника.

Об'єктом дослідження є система обліку електричної енергії, що складається з електронного лічильника активної енергії, трансформаторів струму та напруги, вторинних кіл і каналу передавання даних. Джерелом збурень прийнято керований 6-пульсний тиристорний випрямляч, підключений до трифазної мережі змінного струму промислової частоти 50 Гц.

У розрахунках використано типову ідеалізовану модель перетворювача: струм мережі має характерну гармонічну структуру порядків $h = 6k \pm 1$, де $k = 1, 2, 3, \dots$. Така модель не замінює натурні вимірювання, однак дає змогу кількісно оцінити напрям і масштаб впливу перетворювача на якість електроенергії та систему обліку.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	66

7.4.1 Математична модель 6-пульсного тиристорного перетворювача

Для трифазного повністю керованого мостового випрямляча середнє значення випрямленої напруги в ідеалізованому режимі неперервного струму визначається залежністю:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha$$

де U_d - середнє значення випрямленої напруги; U_{d0} - середнє значення випрямленої напруги при куті керування $\alpha = 0^\circ$; α - кут керування тиристорів.

Для трифазної мостової схеми значення U_{d0} можна подати через лінійну напругу мережі:

$$U_{d0} = 1.35 U_{LL}$$

де U_{LL} - діюче значення лінійної напруги на вході перетворювача.

Гармонічний склад вхідного струму ідеального 6-пульсного перетворювача описується характерними порядками:

$$h = 6k \pm 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

До найсуттєвіших складових належать 5-та, 7-ма, 11-та, 13-та, 17-та, 19-та, 23-тя і 25-та гармоніки. У першому наближенні відносна амплітуда гармоніки може бути оцінена так:

$$\frac{I_h}{I_1} \approx \frac{1}{h}$$

де I_h - діюче значення струму h -ї гармоніки; I_1 - діюче значення основної гармоніки струму.

7.4.2 Розрахунок коефіцієнта гармонічних спотворень струму

Коефіцієнт гармонічних спотворень струму визначається співвідношенням:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

					Арк. 67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Для оцінювання приймемо гармоніки 5-го, 7-го, 11-го, 13-го, 17-го, 19-го, 23-го та 25-го порядків. Розраховані відносні значення струмів наведено в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 - Розрахунковий спектр струму 6-пульсного тиристорного перетворювача

Порядок гармоніки h	Відносний струм I_h/I_1 , %
5	20,00
7	14,29
11	9,09
13	7,69
17	5,88
19	5,26
23	4,35
25	4,00

За наведеними даними розрахункове значення коефіцієнта гармонічних спотворень струму становить:

$$THD_I = 29.04\%$$

Отримане значення свідчить, що навіть за ідеалізованих умов 6-пульсний перетворювач є суттєвим джерелом гармонічних струмів. У реальній мережі значення THD_I залежить від індуктивності мережі, параметрів навантаження, наявності згладжувального реактора, режиму керування та фільтрокомпенсувальних пристроїв.

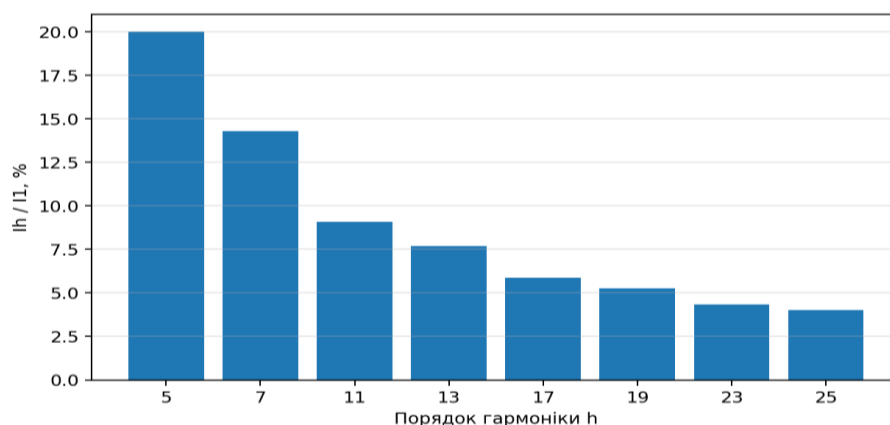


Рисунок 7.2 - Розрахунковий спектр струму 6-пульсного тиристорного перетворювача

7.4.4 Вплив кута керування на коефіцієнт потужності

Тиристорне регулювання призводить не тільки до появи вищих гармонік, а й до зміщення основної гармоніки струму відносно напруги. У спрощеній інженерній моделі коефіцієнт потужності можна подати як добуток коефіцієнта зміщення та коефіцієнта спотворення:

$$\lambda = \cos\varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

Для керованого випрямляча в першому наближенні приймають $\varphi_1 \approx \alpha$, тому:

$$\lambda \approx \frac{\cos\alpha}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

де THD_I у цій формулі використовується у відносних одиницях, а не у відсотках.

Таблиця 7.4 - Вплив кута керування на коефіцієнт потужності

Кут керування α , град	$\cos \alpha$	THD_I , %	Коефіцієнт потужності λ
0	1,000	29,04	0,960
15	0,966	29,04	0,928
30	0,866	29,04	0,832
45	0,707	29,04	0,679
60	0,500	29,04	0,480
75	0,259	29,04	0,249

З таблиці видно, що за збільшення кута керування коефіцієнт потужності зменшується. Це означає зростання повної потужності, яку повинна передавати мережа при тій самій активній складовій, а також підвищення навантаження на вимірювальні трансформатори та кабельні лінії.

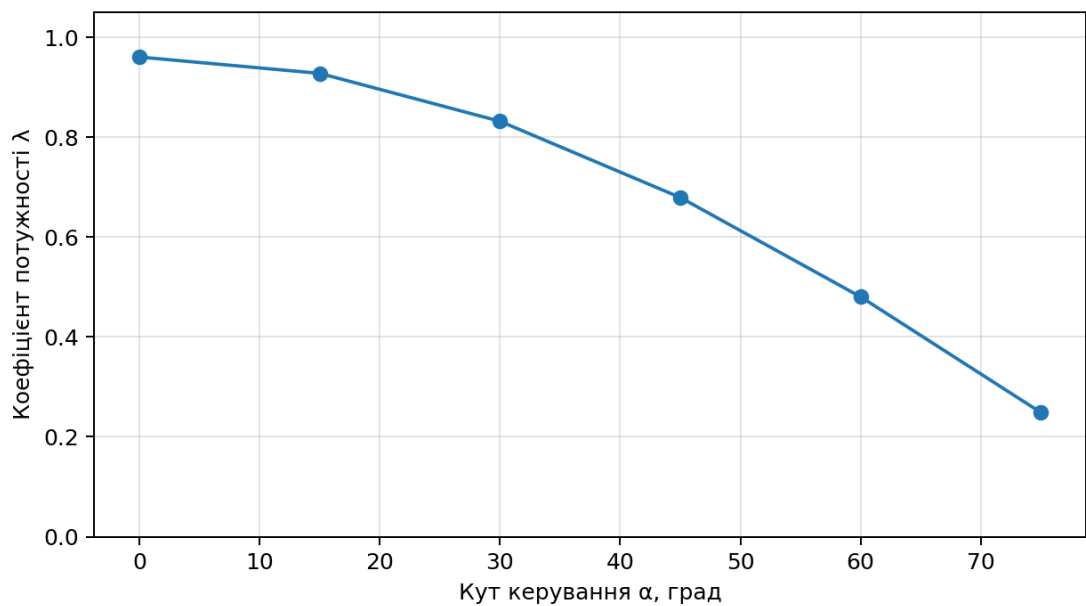


Рисунок 7.3 - Зниження коефіцієнта потужності при зміні кута керування

7.4.5 Механізм впливу на систему обліку електроенергії

Сучасний електронний лічильник активної енергії визначає енергію через інтегрування миттєвої потужності:

$$W = \int_0^T u(t)i(t)dt$$

У цифровому вимірювальному тракті ця залежність реалізується дискретно:

$$W \approx \sum_{m=1}^N u_m i_m \Delta t$$

де u_m та i_m - миттєві відліки напруги і струму; Δt - інтервал дискретизації; N - кількість відліків за період інтегрування.

За синусоїдального режиму похибка вимірювання визначається переважно класом точності лічильника та похибками трансформаторів струму й напруги. У несинусоїдальному режимі додаються такі складові:

- амплітудна похибка вимірювальних каналів на вищих частотах;
- фазова похибка трансформаторів струму та напруги для гармонічних складових;

					Арк.
					70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

- можливе насичення осердя трансформатора струму при пікових значеннях струму;
- похибка цифрової дискретизації та фільтрації сигналів;
- похибка алгоритму обчислення активної та реактивної енергії за наявності міжгармонік і шуму.

Сумарну похибку системи обліку доцільно розглядати як результат накладання кількох складових:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_m + \delta_{CT} + \delta_{VT} + \delta_h + \delta_{alg}$$

де δ_m - базова похибка лічильника; δ_{CT} - похибка трансформатора струму; δ_{VT} - похибка трансформатора напруги; δ_h - додаткова похибка від гармонічних спотворень; δ_{alg} - алгоритмічна похибка цифрової обробки.

7.4.6 Оцінка додаткової похибки при гармонічному спотворенні напруги

Для інженерної оцінки приймемо, що додаткова похибка системи обліку зростає зі збільшенням THD_U . Така залежність не є універсальною паспортною характеристикою лічильника, оскільки конкретне значення залежить від типу вимірювальних трансформаторів, класу лічильника, частоти дискретизації та спектра гармонік. Проте для попереднього аналізу можна використати апроксимаційну модель:

$$\delta_h = a + b \cdot THD_U + c \cdot THD_U^2$$

де a , b , c - коефіцієнти апроксимації, що визначаються за експериментальними або паспортними даними. У даному розрахунку використано умовну інженерну оцінку для демонстрації характеру залежності.

Таблиця 7.5 - Оцінка додаткової похибки обліку за різних значень THD_U

THD_U , %	Оцінена додаткова похибка, %	Орієнтовне зростання втрат, %
1	0,090	0,81
3	0,130	1,37
5	0,198	2,12
8	0,352	3,64
10	0,490	4,90
12	0,656	6,36

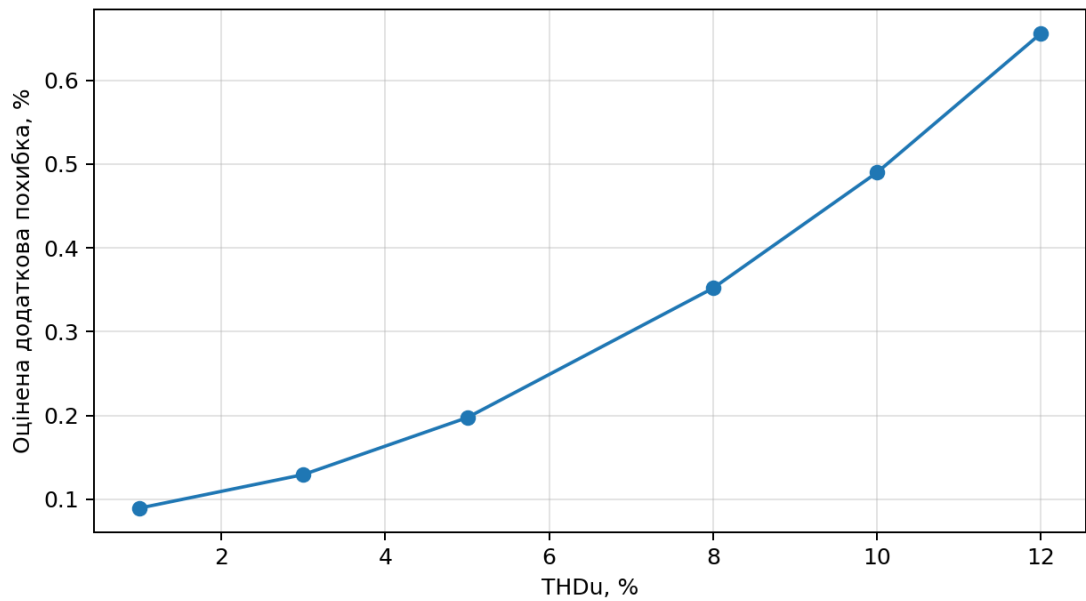


Рисунок 7.4 - Оцінка додаткової похибки обліку за наявності гармонік напруги

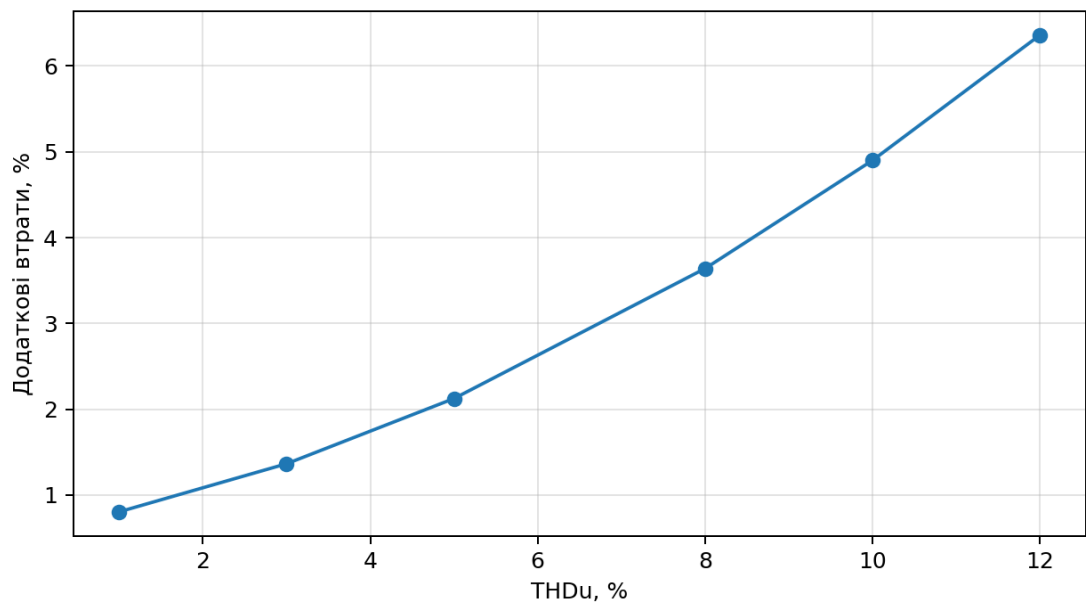


Рисунок 7.5 - Орієнтовне зростання втрат у мережі при погіршенні якості напруги

Результати підтверджують, що погіршення якості напруги створює ризик накопичення систематичної похибки. Для комерційного обліку навіть десяті частки відсотка можуть бути істотними, якщо облік здійснюється на великих обсягах споживання електроенергії.

7.4.7 Вплив вимірювальних трансформаторів

У промислових системах обліку лічильник часто працює через трансформатори струму та напруги. За несинусоїдального режиму саме вони можуть стати основним джерелом додаткової похибки. Причина полягає в тому, що клас точності трансформатора зазвичай нормується для основної частоти, тоді як на вищих гармоніках його амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики змінюються.

Особливо небезпечними є режими, коли тиристорний перетворювач формує короткі імпульси струму з високим коефіцієнтом амплітуди. У такому випадку можливе часткове насичення магнітопроводу трансформатора струму. Насичення призводить до спотворення вторинного струму, а отже, лічильник отримує сигнал, який уже не є точною копією первинного струму.

Для зменшення ризику похибок рекомендується:

- перевіряти допустиму роботу трансформаторів струму в умовах несинусоїдального навантаження;
- не допускати тривалого перевантаження вторинних кіл;
- використовувати трансформатори з достатнім запасом за потужністю та класом точності;
- за потреби застосовувати вимірювальні перетворювачі, придатні для гармонічного аналізу.

7.5. Практичні заходи для зменшення впливу тиристорних перетворювачів

Для підвищення достовірності обліку електроенергії доцільно поєднувати технічні та організаційні заходи.

Перший напрям - зменшення гармонічних струмів у джерелі їх виникнення. Для цього використовують згладжувальні реактори, пасивні LC-фільтри, активні фільтри гармонік, а також 12-пульсні або 24-пульсні схеми випрямлення. Перехід від 6-пульсної до 12-пульсної схеми дає змогу істотно

					Арк. 73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

зменшити рівень 5-ї та 7-ї гармонік, які зазвичай мають найбільший вплив на мережу.

Другий напрям - правильний вибір засобів обліку. Лічильник має забезпечувати коректне вимірювання активної енергії в умовах несинусоїдальних сигналів. Для відповідальних вузлів обліку доцільно застосовувати прилади з функціями реєстрації показників якості електроенергії, журналювання подій та можливістю аналізу гармонічного складу.

Третій напрям - періодичний контроль якості електроенергії. Разове встановлення лічильника не гарантує незмінності умов вимірювання. Режим роботи тиристорних перетворювачів можуть змінюватися залежно від технологічного процесу, тому необхідно виконувати періодичний моніторинг THD_U , THD_I , коефіцієнта потужності, несиметрії напруг і короткочасних провалів.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що трифазний 6-пульсний тиристорний перетворювач є характерним джерелом гармонічних струмів порядків $h = 6k \pm 1$. Найбільший вплив мають 5-та та 7-ма гармоніки, а сумарний розрахунковий коефіцієнт гармонічних спотворень струму для прийнятої моделі становить 29.04 %.

Збільшення кута керування тиристорів призводить до зниження коефіцієнта потужності. Це підвищує повну потужність, що передається мережею, збільшує втрати та ускладнює роботу вимірювальних трансформаторів. У системах обліку це може проявлятися як додаткова похибка вимірювання активної енергії.

Основними механізмами впливу тиристорних перетворювачів на облік електроенергії є гармонічні спотворення струму і напруги, фазові похибки трансформаторів струму та напруги, частотна залежність вимірювальних каналів, а також особливості цифрової обробки сигналів у лічильнику.

Для забезпечення достовірного обліку електроенергії необхідно застосовувати фільтрокомпенсувальні пристрої, правильно вибирати

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	74

трансформатори струму і напруги, використовувати сучасні електронні лічильники, придатні для роботи в умовах несинусоїдальних сигналів, а також періодично контролювати параметри якості електроенергії відповідно до вимог міжнародних стандартів.

						Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі виконано розроблення системи електропостачання машинобудівного підприємства та проведено комплекс розрахунків, необхідних для забезпечення надійного, економічного та енергоефективного електропостачання виробничих споживачів.

В результаті виконання роботи визначено електричні навантаження всіх виробничих та допоміжних підрозділів підприємства. Для електропостачання підприємства розроблено схему внутрішнього електропостачання напругою 10 кВ із застосуванням розподільчого пункту РП-10 кВ та чотирьох комплектних трансформаторних підстанцій. За результатами техніко-економічного порівняння варіантів електропостачання встановлено доцільність застосування варіанта з використанням РП-1, який характеризується меншими приведеними витратами та кращими техніко-економічними показниками.

Для живлення споживачів підприємства прийнято чотири двотрансформаторні комплектні трансформаторні підстанції з трансформаторами потужністю 1000 кВА кожний. Проведена перевірка показала відповідність обраних трансформаторів умовам роботи як у нормальному, так і в аварійному режимах.

Для живлення високовольтних електротехнологічних установок прийнято чотири електропічні трансформатори: два трансформатори потужністю 2800 кВА та два трансформатори потужністю 2250 кВА. Загальна встановлена потужність електропічних трансформаторів становить 10100 кВА.

З метою підвищення коефіцієнта потужності та зменшення втрат електроенергії виконано компенсацію реактивної потужності. Загальна потужність компенсуючих пристроїв становить 7410 квар. На стороні 10 кВ передбачено встановлення двох високовольтних батарей статичних конденсаторів типу БСК-10-3150 У3 сумарною потужністю 6200 квар. На

						Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стороні 0,4 кВ прийнято низьковольтні конденсаторні установки загальною потужністю 1210 квар. Виконані розрахунки підтвердили забезпечення нормативного значення коефіцієнта реактивної потужності та зниження навантаження на елементи мережі.

В роботі проведено розрахунок струмів короткого замикання в характерних точках мережі та виконано вибір комутаційної апаратури, вимірювальних трансформаторів, кабельних ліній і струмопровідного обладнання. Для кабельних ліній 10 кВ прийнято сучасні кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену, що забезпечують потрібну пропускну здатність та термічну стійкість під час коротких замикань.

В спеціальному розділі досліджено вплив нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії. Встановлено, що використання тиристорних перетворювачів та інших силових напівпровідникових пристроїв призводить до появи вищих гармонік струму і напруги, що може негативно впливати на роботу систем обліку електроенергії та електротехнічного обладнання. Розглянуто основні способи зниження гармонічних спотворень та підвищення якості електроенергії в промислових мережах.

Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність прийнятих проектних рішень. Розроблена система електропостачання забезпечує необхідний рівень надійності, енергоефективності та якості електричної енергії, відповідає вимогам чинних нормативних документів і може бути рекомендована для практичного застосування під час проектування систем електропостачання машинобудівних підприємств.

						Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра : метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. : П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш, О. І. Сіріков, О. А. Козловський] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 80 с.

2. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.

3. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

4. Конспект лекцій з курсу «Ефективне використання електроенергії в системах енергопостачання» : для здобувач. вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / уклад. П. Г. Плешков; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 266 с.

5. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. –Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.

6. Енергетичний інжиніринг та менеджмент : в 3-х ч. Ч. 1. Проектування ефективних енергетичних систем / П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, О.І. Сіріков, І.В. Савеленко; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова

						Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

П.Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018.– 156 с.

7. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – 287 с. ISBN 978-966-402-076-0

9. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К. Кондор, 2005. – 408 с.

10. Бурбело М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 159 с.

11. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). – [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с

12. IEC 62053-22:2020. Electricity metering equipment - Particular requirements - Part 22: Static meters for AC active energy, classes 0,1S, 0,2S and 0,5S. International Electrotechnical Commission.

13. Arrillaga J., Watson N. R. Power System Harmonics. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2003.

14. Bollen M. H. J., Gu I. Y. H. Signal Processing of Power Quality Disturbances. Wiley-IEEE Press, 2006.

15. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2003.

						Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		