

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

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

“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Розробка системи електропостачання та електрозбереження
заводу сільськогосподарського машинобудування
Development of a power supply and energy saving system for an
agricultural machinery plant »**

Виконав здобувач IV курсу групи ЕЕ-22
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Владислав ДУБОВИЙ
« ____ » _____ 2026 р.

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

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

м. Кропивницький

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

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 ПЛЄШКОВ*

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

_____ *Дубового Владислава Олександровича*

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Розробка системи електропостачання та*
електрозбереження заводу сільськогосподарського машинобудування
Development of a power supply and energy saving system for an agricultural
machinery plant

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; Розрахунок електричних навантажень; Побудова картограми
електричних навантажень та визначення центру електричних навантажень;
Техніко-економічне обґрунтування варіантів електропостачання підприємства;
Режими реактивної потужності системи електропостачання; Вибір кількості,
потужності трансформаторів та місця розташування цехових
трансформаторних підстанцій; Розрахунок струмів коротких замикань та вибір
високовольтного обладнання; Підвищення енергоефективності системи
електропостачання дугових сталеплавильних печей шляхом компенсації
реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік; 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>Розрахунок електричних навантажень;</i>	5.05.26	
3	<i>Побудова картограми електричних навантажень та визначення центру електричних навантажень</i>	8.05.26	
4	<i>Техніко-економічне обґрунтування варіантів електропостачання підприємства</i>	15.05.26	
5	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання;</i>	19. 05.26	
6	<i>Вибір кількості, потужності трансформаторів та місця розташування цехових трансформаторних підстанцій</i>	22.05.26	
7	<i>Розрахунок струмів коротких замикань та вибір високовольтного обладнання</i>	25. 05.26	
8	<i>Підвищення енергоефективності системи електропостачання дугових сталеплавильних печей шляхом компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік</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: 84 с.; 19 рис.; 17 табл.; 11 джерел.

Дубовий В. О. Розробка системи електропостачання та електрозбереження заводу сільськогосподарського машинобудування – Рукопис.

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

В кваліфікаційній роботі розроблено систему електропостачання заводу сільськогосподарського машинобудування з урахуванням сучасних вимог до надійності, енергоефективності та економічності роботи електричних мереж промислових підприємств.

Особливу увагу приділено питанням компенсації реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності підприємства.

У спеціальній частині роботи досліджено вплив дугових сталеплавильних печей на систему електропостачання підприємства. Проаналізовано вплив реактивної потужності та вищих гармонік на показники якості електроенергії, а також розглянуто способи підвищення енергоефективності електротехнологічних установок за рахунок застосування сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Ключові слова: система електропостачання, електричні навантаження, трансформаторна підстанція, струми короткого замикання, компенсація реактивної потужності, дугова сталеплавильна піч, вищі гармоніки, енергоефективність, картограма навантажень, силовий трансформатор.

ABSTRACT

Qualification work: 84 p.; 19 fig.; 17 tables; 11 sources.

Dubovyi V. O. Development of a power supply and power saving system for an agricultural machinery plant – Manuscript.

Qualification work in specialty 141 “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”, OPP “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

In the qualification work, a power supply system for an agricultural machine-building plant was developed taking into account modern requirements for reliability, energy efficiency and cost-effectiveness of electrical networks of industrial enterprises.

Special attention is paid to the issues of reactive power compensation and increasing the power factor of the enterprise.

In a special part of the work, the influence of arc steelmaking furnaces on the power supply system of the enterprise was studied. The influence of reactive power and higher harmonics on the quality of electricity is analyzed, and ways of increasing the energy efficiency of electrotechnological installations through the use of modern filter-compensating devices are considered.

Keywords: power supply system, electrical loads, transformer substation, short-circuit currents, reactive power compensation, arc steelmaking furnace, higher harmonics, energy efficiency, load map, power transformer.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	8
1.1. Визначення електричних навантажень напругою до 1000 В	9
1.2. Визначення освітлювальних навантажень.....	14
1.3. Визначення електричних навантажень напругою вище 1000 В.....	15
1.4. Побудова графіків електричних навантажень підприємства	20
2 ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ..	25
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВАРІАНТІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА	27
4 РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	32
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв.....	32
4.2 Вибір кількості та місць розташування компенсуючих пристроїв....	35
5 ВИБІР КІЛЬКОСТІ, ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ЦЕХОВИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ	37
6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	39
6.1 Розрахунок опорів та струмів короткого замикання	39
6.2 Вибір кабельних ліній 10 кВ	42
6.3 Вибір високовольтних вимикачів.....	43
6.4 Вибір розрядників та трансформатора власних потреб.....	43
7 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ШЛЯХОМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК	45
7.1. Втрати електроенергії, зумовлені роботою дугової сталеплавильної печі	50
7.2. Вплив вищих гармонік електродугових печей на систему електропостачання підприємства та методи їх зменшення	54

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА			
Розроб	Дубовий В.О				Розробка системи електропостачання та електрозбереження заводу сільськогосподарського машинобудування	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Плешков П.І							
Н.контр.						ЦНТУ, зр.ЕЕ-22		
Затв.	Плешков П.Г							

7.3	Додаткові втрати в електричних машинах і трансформаторах	59
7.4.	Підвищення енергетичних показників та зменшення впливу реактивної потужності та вищих гармонік на електричну мережу ...	67
	ВИСНОВКИ.....	81
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасні промислові підприємства характеризуються значною концентрацією електротехнологічного обладнання, високою питомою потужністю електроприймачів та безперервністю виробничих процесів. У таких умовах система електропостачання є одним із ключових елементів, що визначає ефективність, надійність і економічність функціонування виробництва. Особливо важливого значення набуває раціональне проектування систем електропостачання підприємств машинобудівної галузі, де одночасно працюють потужні електроприводи, електротермічні установки, вентиляційні системи, компресорне обладнання та автоматизовані виробничі комплекси.

Для підприємств сільськогосподарського машинобудування характерними є значні електричні навантаження, нерівномірність графіків електроспоживання, наявність реактивної потужності та підвищені вимоги до надійності живлення. Водночас сучасні умови розвитку енергетики вимагають забезпечення високої енергоефективності, зниження втрат електроенергії та покращення показників якості електричної енергії. Тому під час проектування систем електропостачання необхідно враховувати не лише технічні параметри електрообладнання, а й економічні аспекти експлуатації електричних мереж.

Особливої актуальності набуває проблема роботи потужних нелінійних електроприймачів, зокрема дугових сталеплавильних печей, які є джерелами значної реактивної потужності, коливань напруги та вищих гармонік. Робота таких установок супроводжується погіршенням показників якості електроенергії, збільшенням втрат у трансформаторах і кабельних лініях, перегріванням електрообладнання та зниженням коефіцієнта потужності. У зв'язку з цим важливим напрямом підвищення енергоефективності систем електропостачання є застосування сучасних компенсуючих та фільтрокомпенсуючих пристроїв.

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

Метою дипломного проекту є розробка системи електропостачання заводу сільськогосподарського машинобудування з урахуванням вимог надійності, економічності та енергоефективності, а також дослідження впливу дугових сталеплавильних печей на режими роботи електричної мережі підприємства.

У роботі використано методи електротехнічних розрахунків, техніко-економічного аналізу, методи розрахунку електричних навантажень, втрат потужності та параметрів компенсуючих пристроїв.

Практичне значення роботи полягає в розробці технічно обґрунтованої та економічно ефективної системи електропостачання промислового підприємства з підвищеними показниками енергоефективності та якості електричної енергії.

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

1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Визначення електричних навантажень напругою до 1000 В

Виконується методом впорядкованих діаграм у такій послідовності.

На першому етапі для кожного розрахункового вузла визначають загальну кількість силових електроприймачів, підсумовують їх установлену потужність, а також знаходять сумарні середні активні та реактивні навантаження.

Далі розраховують груповий коефіцієнт використання, середньозважений коефіцієнт потужності та ефективну кількість електроприймачів у відповідному вузлі навантаження.

Після цього за довідковими таблицями або розрахунковими кривими вибирають коефіцієнт максимуму, за яким визначають максимальне навантаження групи силових електроприймачів.

Якщо у вузлі наявні електроприймачі з практично постійним режимом роботи, для них окремо встановлюють сумарну номінальну потужність і середнє навантаження.

Верстати з ЧПК для обробки корпусних деталей

Сумарна встановлена потужність групи множиться на коефіцієнт використання:

$$P_{\text{сер}} = P_{\text{вст}} \cdot K_{\text{в}} = 979,2 \cdot 0,11 = 107,71 \text{ кВт}$$

Реактивне навантаження визначається через активне середнє навантаження та $\text{tg}\varphi$.

$$Q_{\text{сер}} = P_{\text{сер}} \cdot \text{tg}\varphi = 107,71 \cdot 0,698 = 75,18 \text{ квар}$$

Ефективна кількість показує умовну кількість однакових приймачів у групі.

$$n_e = \frac{2 \cdot P_{\text{уст}}}{P_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 979,2}{31} = 63,17 \approx 63$$

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

Всього по цеху лазерного різання та механічної обробки

Активне середнє навантаження цеху - це сума $P_{\text{сер}}$ усіх груп електроприймачів.

$$P_{\text{сер}\Sigma} = 107,71 + 67,46 + 5,57 + 75,10 + 15,70 + 54,72 + 4,35 + 6,16 \\ = 336,76 \text{ кВт}$$

Реактивне середнє навантаження цеху - це сума $Q_{\text{сер}}$ по всіх групах.

$$Q_{\text{сер}\Sigma} = 75,18 + 119,09 + 5,35 + 95,00 + 7,61 + 60,64 + 2,34 + 3,29 \\ = 368,51 \text{ квар}$$

Для підрозділу береться сумарна встановлена потужність цеху та найбільша потужність одного електроприймача.

$$n_e = \frac{2 \cdot P_{\text{уст}\Sigma}}{P_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 1770,9}{38} = 93,21 \approx 93$$

Розрахункова активна потужність визначається через коефіцієнт максимуму.

$$P_p = K_m \cdot P_{\text{сер}\Sigma} = 1,05 \cdot 336,76 = 353,60 \text{ кВт}$$

В цьому варіанті реактивна розрахункова потужність прийнята рівною середній реактивній.

$$Q_p = Q_{\text{сер}\Sigma} = 368,51 \text{ квар}$$

Повна розрахункова потужність визначається за активною і реактивною складовими.

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{353,60^2 + 368,51^2} = 510,71 \text{ кВА}$$

Результати розрахунку навантажень до 1000 В представлені в табл.1.1.

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

Таблиця 1.1 – Розрахунок електричних навантажень до 1000 В

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	К-сть	Pmin одного, кВт	Pmax одного, кВт	Руст сумарна, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рср, кВт	Qср, квар	п _е	Км	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
1	Цех лазерного різання та механічної обробки															
	Верстати з ЧПК для обробки корпусних деталей	131,00	0,60	31,00	1325,00		0,45	0,82	0,70	596,25	416,19	85,00				
	Роботизовані зварювальні пости	13,00	25,00	36,00	217,60		0,31	0,52	1,64	67,46	110,81	12,00				
	Конвеєрні лінії подачі заготовок	3,00	6,00	8,00	9,60		0,58	0,72	0,96	5,57	5,37	2,00				
	Гідравлічні преси	29,00	5,00	38,00	208,60		0,36	0,62	1,27	75,10	95,03	11,00				
	Індукційні нагрівальні печі	7,00	4,00	8,00	21,80		0,72	0,91	0,46	15,70	7,15	5,00				
	Шліфувально-доводочні верстати	31,00	6,00	23,00	304,00		0,18	0,67	1,11	54,72	60,63	26,00				
	Вентиляційні установки	5,00	1,50	3,00	6,40		0,68	0,90	0,48	4,35	2,11	4,00				
	Кран-балки дільниці	4,00	7,00	21,00	23,70		0,26	0,45	1,98	6,16	12,23	2,00				
	Всього по Цех лазерного різання та механічної обробки	223,00	0,60	38,00	2116,70	38,00	0,39	0,76	0,86	825,30	709,51	111,00	1,05	866,57	709,51	1119,97
2	Логістичний склад готової продукції															
	Електротельфери	5,00	2,50	3,20	8,30		0,11	0,52	1,64	0,91	1,50	5,00				
	Припливно-витяжні вентилятори	5,00	4,50	7,00	18,60		0,63	0,72	0,96	11,72	11,29	5,00				
	Інфрачервоні обігрівачі	2,00	3,00	5,00	5,10		0,58	0,98	0,20	2,96	0,60	2,00				
	Всього по Логістичний склад готової продукції	12,00	2,50	7,00	32,00	7,00	0,49	0,76	0,86	15,59	13,39	9,00	1,34	20,89	13,39	24,81
3	Механоскладальний цех №1															
	Металообробні центри з ЧПК	125,00	0,60	29,00	325,00		0,15	0,53	1,60	48,75	78,00	22,00				
	Зварювальні інверторні апарати	37,00	25,00	72,00	758,40		0,21	0,52	1,64	159,26	261,61	21,00				
	Автоматизований конвеєр	1,00	6,50	7,00	4,50		0,58	0,53	1,60	2,61	4,18	1,00				
	Сушильні шафи для вузлів	4,00	10,00	11,00	27,50		0,58	0,53	1,60	15,95	25,52	4,00				
	Вентилятори місцевих відсмоктувачів	7,00	0,70	3,00	7,00		0,58	0,53	1,60	4,06	6,50	5,00				
	Всього по Механоскладальний цех №1	174,00	0,60	72,00	1122,40	72,00	0,21	0,52	1,63	230,63	375,80	31,00	1,13	260,62	375,80	457,33
4	Адміністративно-навчальний корпус															
	Комп'ютерні робочі станції	54,00	0,25	0,35	10,20		0,78	0,91	0,46	7,96	3,62	54,00				
	Інверторні кондиціонери	43,00	1,40	1,80	43,50		0,68	0,82	0,70	29,58	20,65	43,00				
	Вентиляційні модулі	18,00	2,50	10,00	57,60		0,58	0,82	0,70	33,41	23,32	12,00				
	Всього по Адміністративно-навчальний корпус	115,00	0,25	10,00	111,30	10,00	0,64	0,83	0,67	70,94	47,59	22,00	1,13	80,17	47,59	93,23
5	Компресорна станція															
	Гвинтові компресори	10,00	5,00	48,00	231,70		0,68	0,82	0,70	157,56	109,97	10,00				
	Осьові вентилятори охолодження	5,00	3,00	14,00	28,20		0,68	0,82	0,70	19,18	13,38	4,00				
	Живильні насоси	5,00	20,00	22,00	69,10		0,68	0,82	0,70	46,99	32,80	5,00				
	Конденсатні насоси	6,00	18,00	19,00	69,80		0,58	0,82	0,70	40,48	28,26	6,00				
	Насоси підготовки реагентів	7,00	3,00	3,20	14,10		0,58	0,82	0,70	8,18	5,71	7,00				
	Всього по Компресорна станція	33,00	3,00	48,00	412,90	48,00	0,66	0,82	0,70	272,38	190,12	17,00	1,20	326,86	190,12	378,13

Продовження табл. 1.1

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	К-сть	Pmin одного, кВт	Pmax одного, кВт	Руст сумарна, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рср, кВт	Qср, квар	п _е	Км	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
6	Дільниця лакофарбових матеріалів															
	Кран-балка складська	2,00	1,00	4,00	5,10		0,28	0,52	1,64	1,43	2,35	2,00				
	Вентилятори вибухозахищені	4,00	3,00	5,00	13,40		0,68	0,82	0,70	9,11	6,36	4,00				
	Всього по Дільниця лакофарбових матеріалів	6,00	1,00	5,00	18,50	5,00	0,57	0,77	0,83	10,54	8,71	6,00	1,34	14,12	8,71	16,59
7	Склад інструменту та комплектуючих															
	Мостовий кран	1,00	20,00	21,00	13,40		0,21	0,62	1,27	2,81	3,56	1,00				
	Електротельфери	2,00	4,50	5,00	6,40		0,17	0,52	1,64	1,09	1,79	2,00				
	Всього по Склад інструменту та комплектуючих	3,00	4,50	21,00	19,80	21,00	0,20	0,59	1,37	3,90	5,35	2,00	1,45	5,66	5,35	7,79
8	Їдальня персоналу															
	Пароконвектомати та електропечі	10,00	0,20	4,00	24,30		0,58	0,72	0,96	14,09	13,58	10,00				
	Тістомісильні машини	3,00	0,20	3,00	4,50		0,38	0,52	1,64	1,71	2,81	3,00				
	Шафи жарочні	4,00	5,00	17,00	32,60		0,68	0,95	0,33	22,17	7,29	4,00				
	Холодильні шафи	8,00	2,00	9,00	39,70		0,68	0,82	0,70	27,00	18,84	8,00				
	Вентиляція кухонної зони	10,00	0,50	5,00	28,20		0,58	0,82	0,70	16,36	11,42	10,00				
	Всього по Їдальня персоналу	35,00	0,20	17,00	129,30	17,00	0,63	0,83	0,66	81,32	53,94	15,00	1,20	97,59	53,94	111,50
9	Ливарний цех №1															
	Односторонні точно-шліфувальні верстати	10,00	3,00	3,00	18,60		0,28	0,72	0,96	5,21	5,02	10,00				
	Фрикційні преси	3,00	7,00	7,50	14,10		0,38	0,67	1,11	5,36	5,94	3,00				
	Електропечі плавильні	2,00	68,00	74,00	90,90		0,68	0,91	0,46	61,81	28,16	2,00				
	Кривошипні преси	2,00	4,00	5,00	5,80		0,28	0,62	1,27	1,62	2,06	2,00				
	Зварювальний пост ремонту оснастки	1,00	38,00	40,00	25,00		0,38	0,62	1,27	9,50	12,02	1,00				
	Верстати допоміжної обробки	5,00	6,00	7,00	21,80		0,12	0,82	0,70	2,62	1,83	5,00				
	Транспортери формувальної суміші	4,00	2,00	3,00	6,40		0,58	0,72	0,96	3,71	3,58	4,00				
	Ковшовий елеватор	1,00	3,00	3,00	1,90		0,58	0,72	0,96	1,10	1,06	1,00				
	Змішувачі формувальної суміші	3,00	9,00	10,00	18,60		0,78	0,82	0,70	14,51	10,13	3,00				
	Вертикальна сушильна установка	1,00	275,00	280,00	177,90		0,39	0,72	0,96	69,38	66,87	1,00				
	Дробоструминні машини	8,00	1,00	1,20	5,10		0,58	0,72	0,96	2,96	2,85	8,00				
	Кран-балка плавильної дільниці	3,00	11,00	12,00	21,10		0,38	0,62	1,27	8,02	10,15	3,00				
	Всього по Ливарний цех №1	43,00	1,00	280,00	407,20	280,00	0,46	0,78	0,81	185,80	149,66	3,00	1,45	269,41	149,66	308,18

Апр.

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	К-сть	Pmin одного, кВт	Pmax одного, кВт	Руст сумарна, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рср, кВт	Qср, квар	п _е	Км	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
10	Ливарний цех №2															
	Плавильно-роздавальні печі	5,00	70,00	80,00	325,00		0,58	0,72	0,96	188,50	181,69	5,00				
	Мостові крани	7,00	5,00	33,00	97,30		0,38	0,67	1,11	36,97	40,97	6,00				
	Скіпові підйомники	2,00	20,00	22,00	27,50		0,68	0,91	0,46	18,70	8,52	2,00				
	Електровізок	1,00	1,50	1,70	1,30		0,28	0,62	1,27	0,36	0,46	1,00				
	Конвеєрні системи	16,00	4,00	29,00	115,80		0,58	0,72	0,96	67,16	64,74	8,00				
	Змішувачі формувальної суміші	4,00	28,00	30,00	75,50		0,68	0,82	0,70	51,34	35,84	4,00				
	Полігональне сито	1,00	6,50	7,00	4,50		0,38	0,62	1,27	1,71	2,16	1,00				
	Галтувальні барабани	4,00	4,00	12,00	18,60		0,28	0,52	1,64	5,21	8,55	3,00				
	Кран-балки	7,00	5,00	6,00	23,70		0,21	0,52	1,64	4,98	8,18	7,00				
	Сушильна піч	2,00	8,00	8,00	10,20		0,68	0,82	0,70	6,94	4,84	2,00				
	Елеватори	3,00	7,00	16,00	19,20		0,68	0,82	0,70	13,06	9,11	2,00				
	Установка плазмового різання	1,00	24,00	25,00	16,00		0,31	0,62	1,27	4,96	6,28	1,00				
	Машини лиття під тиском	3,00	15,00	21,00	36,50		0,39	0,62	1,27	14,24	18,01	3,00				
	Точильно-шліфувальний верстат	1,00	3,00	3,00	1,90		0,21	0,82	0,70	0,40	0,28	1,00				
	Камерні печі	6,00	68,00	70,00	266,20		0,58	0,72	0,96	154,40	148,82	6,00				
	Всього по Ливарний цех №2	63,00	1,50	80,00	1039,20	80,00	0,55	0,73	0,95	568,92	538,44	26,00	1,13	642,88	538,44	838,58
11	Термічна дільниця та сушильні камери															
	Вентиляційні агрегати	16,00	4,50	14,00	112,60		0,58	0,72	0,96	65,31	62,95	16,00				
	Сушильні камери з автоматикою	10,00	28,00	96,00	320,00		0,68	0,91	0,46	217,60	99,14	7,00				
	Кран-балки термічної дільниці	4,00	20,00	22,00	55,00		0,26	0,62	1,27	14,30	18,10	4,00				
	Всього по Термічна дільниця та сушильні камери	30,00	4,50	96,00	487,60	96,00	0,61	0,86	0,61	297,21	180,19	10,00	1,20	356,65	180,19	399,58
	Всього на стороні 0,4 кВ	737,00	0,20	280,00	5896,90	280,00	0,43	0,75	0,89	2562,54	2272,70	42,00	1,00	2562,54	2272,70	3425,17

1.2. Визначення освітлювальних навантажень

Для визначення освітлювального навантаження виробничих й допоміжних приміщень застосовується метод питомої потужності. Цей метод базується на залежності між площею приміщення та питомою щільністю освітлювального навантаження.

Розрахунок освітлювального навантаження виконаємо для цеху лазерного різання та механічної обробки.

Вихідні дані:

- площа приміщення $F=2550 \text{ м}^2$;
- питома щільність освітлювального навантаження $p_0=13 \text{ Вт/м}^2$;
- коефіцієнт попиту $K_p=0,88$;
- коефіцієнт втрат у ПРА $K_1=1,12$;
- $\text{tg}\varphi=1,73$.

Встановлена потужність освітлення визначається за виразом:

$$P_B = \frac{p_0 \cdot F}{1000} = \frac{13 \cdot 2550}{1000} = 33,15 \text{ кВт}$$

де p_0 - питома щільність освітлювального навантаження, Вт/м^2 ;

F - площа приміщення, м^2 .

Розрахункова активна потужність освітлювального навантаження:

$$P_p = P_B \cdot K_c \cdot K_1 = 33,15 \cdot 0,88 \cdot 1,12 = 32,68 \text{ кВт}$$

де K_c - коефіцієнт попиту;

K_1 - коефіцієнт, що враховує втрати потужності в пускорегулювальній апаратурі.

Реактивна потужність освітлювального навантаження визначається:

$$Q_p = P_p \cdot \text{tg}\varphi = 32,68 \cdot 1,73 = 56,54 \text{ квар}$$

Повна потужність освітлювального навантаження:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{32,68^2 + 56,54^2} = 65,31 \text{ кВА}$$

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	14

Таблиця 1.2 – Розрахунок освітлювальних навантажень по підрозділам

№	Найменування підрозділу	F, м²	ρ ₀ , Вт/м²	P _в , кВт	K _с	K ₁	tgφ	P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	Цех лазерного різання та механічної обробки	2550	13	33,15	0,88	1,12	1,73	32,7	56,5	65,3
2	Логістичний склад готової продукції	560	6	3,36	0,90	1,12	0,48	3,4	1,6	3,76
3	Логістичний склад готової продукції	2950	14	41,30	0,90	1,12	0,48	41,6	20,0	46,16
4	Адміністративно-навчальний корпус	1260	18	22,68	0,90	1,12	1,73	22,9	39,6	45,75
5	Компресорна станція	620	8	4,96	0,85	1,12	0	4,7	0	4,72
6	Дільниця лакофарбових матеріалів	132	6	0,79	0,90	1,12	1,73	0,8	1,4	1,61
7	Склад інструменту та комплектуючих	410	6	2,46	0,90	1,12	1,73	2,5	4,3	4,97
8	Їдальня персоналу	1080	18	19,44	0,90	1,12	1,73	19,6	33,9	39,16
9	Ливарний цех №1	8350	10	83,50	0,95	1,20	0,48	95,2	45,7	105,60
10	Ливарний цех №2	1670	10	16,70	0,85	1,20	0,48	17,0	8,2	18,87
11	Термічна дільниця та сушильні камери	1380	12	16,56	0,85	1,12	1,73	15,8	27,3	31,54
12	Територія підприємства	54800	0,2	10,96	0,30	1,20	0,48	4,0	1,9	4,43
	Всього							259,2	240,4	353,5

1.3 Визначення електричних навантажень напругою вище 1000 В

Від правильності визначення розрахункових навантажень залежить вибір кількості та потужності трансформаторів, параметрів кабельних і повітряних ліній, комутаційного обладнання та засобів компенсації реактивної потужності. Отримані результати дають можливість визначити навантаження окремих трансформаторних підстанцій і загальне навантаження підприємства на стороні 10 кВ.

Розрахунок виконаємо для однострансформаторної ТП-1, яка живить цех лазерного різання та механічної обробки.

Сумарна розрахункова активна потужність силового навантаження:

$$P_{\text{р.сил}} = 353,6 \text{ кВт}$$

Сумарна розрахункова реактивна потужність силового навантаження:

$$Q_{\text{р.сил}} = 368,5 \text{ квар}$$

Розрахункова активна потужність освітлювального навантаження:

$$P_{\text{р.осв}} = 32,7 \text{ кВт}$$

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	15

Розрахункова реактивна потужність освітлювального навантаження:

$$Q_{p.осв} = 56,5 \text{ квар}$$

Сумарна активна потужність ТП-1 визначається як сума силового та освітлювального навантаження:

$$P_{p.Σ} = 353,6 + 32,7 = 386,3 \text{ кВт}$$

Сумарна реактивна потужність ТП-1:

$$Q_{p.Σ} = 368,5 + 56,5 = 425,0 \text{ квар}$$

Повна потужність трансформаторної підстанції:

$$S_p = \sqrt{386,3^2 + 425,0^2} = 574,3 \text{ кВА}$$

Для компенсації реактивної потужності передбачено встановлення батареї статичних конденсаторів.

Розрахункова реактивна потужність після компенсації:

$$Q'_p = 425,0 - 180 = 245,0 \text{ квар}$$

Повна потужність після компенсації реактивної потужності:

$$S'_p = \sqrt{386,3^2 + 245,0^2} = 457,4 \text{ кВА}$$

Для даної ТП приймається однострансформаторна підстанція з трансформатором номінальною потужністю 630 кВА.

Втрати активної потужності в трансформаторі:

$$\Delta P = 0,02 \cdot 630 = 12,6 \text{ кВт}$$

Втрати реактивної потужності:

$$\Delta Q = 0,1 \cdot 630 = 63 \text{ квар}$$

Навантаження на шинах 10 кВ:

$$P_{10} = 386,3 + 12,6 = 398,9 \text{ кВт}$$

$$Q_{10} = 245,0 + 63 = 308,0 \text{ квар}$$

Повна потужність на шинах 10 кВ:

$$S_{10} = \sqrt{398,9^2 + 308,0^2} = 503,9 \text{ кВА}$$

Визначення електричних навантажень напругою вище 1000 В для решти ТП наведено в табл.1.3.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Змі.	Арк.	Таблиця 1.3 - Визначення електричних навантажень напругою вище 1000 В																	
№ док.	№ док.	№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість	Pmin одного, кВт	Pmax одного, кВт	Pвст, кВт	m	Kв	cosφ	tgφ	Pср, кВт	Qср, квар	п _е	Kм	Pр, кВт	Qр, квар	Sр, кВА	
Підпис	Дата		ТП-1																
		1	Цех лазерного різання та механічної обробки																
			силова	223,0	0,6	38,0	2116,7	38,0	0,4	0,8	0,9	825,3	709,5	111,0	1,1	866,6	709,5	1120,0	
			освітлювальна													32,7	56,5	65,3	
			Всього по Цех лазерного різання та механічної обробки													899,3	766,0	1181,3	
			Всього по ТП-1 силова	223,0	0,6	38,0	2116,7	38,0	0,4	0,8	0,8	825,3	709,5	111,0	1,1	866,6	709,5	1120,0	
			освітлювальна													32,7	56,5	65,3	
			Всього													899,3	766,0	1181,3	
			БСК													899,3	-200,0	921,3	
			З урахуванням БСК													899,3	766,0	1181,3	
			Втрати в трансформаторі Sn.тр=1600, к-сть=1	1600,0				1,0									10,0	65,0	65,7
			Всього на шинах 10 кВ ТП-1														909,3	831,0	1231,8
			ТП-2																
		1	Логістичний склад готової продукції																
			силова	12,0	2,5	7,0	32,0	7,0	0,5	0,8	0,9	15,6	13,4	9,0	1,3	20,9	13,4	24,8	
			освітлювальна													3,4	1,6	3,8	
			Всього по Логістичний склад готової продукції													24,3	15,0	28,5	
		2	Адміністративно-навчальний корпус																
	силова	115,0	0,3	10,0	111,3	10,0	0,6	0,8	0,7	70,9	47,6	22,0	1,1	80,2	47,6	93,2			
	освітлювальна													22,9	39,6	45,7			
	Всього по Адміністративно-навчальний корпус													103,1	87,2	135,0			
3	Компресорна станція																		
	силова	33,0	3,0	48,0	412,9	48,0	0,7	0,8	0,7	272,4	190,1	17,0	1,2	326,9	190,1	378,1			
	освітлювальна													4,7	0,0	4,7			
	Всього по Компресорна станція													331,6	190,1	382,2			
Арк.																			

Продовження табл. 1.3

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість	Pmin одного, кВт	Pmax одного, кВт	Pвст, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Pср, кВт	Qср, квар	п _е	Км	Pр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
4	Дільниця лакофарбових матеріалів															
	силова	6,0	1,0	5,0	18,5	5,0	0,6	0,8	0,8	10,5	8,7	6,0	1,3	14,1	8,7	16,6
	освітлювальна													0,8	1,4	1,6
	Всього по Дільниця лакофарбових матеріалів													14,9	10,1	18,0
5	Склад інструменту та комплектуючих															
	силова	3,0	4,5	21,0	19,8	21,0	0,2	0,6	1,4	3,9	5,3	2,0	1,5	5,7	5,3	7,8
	освітлювальна													2,5	4,3	5,0
	Всього по Склад інструменту та комплектуючих													8,2	9,6	12,6
6	Ідальня персоналу															
	силова	35,0	0,2	17,0	129,3	17,0	0,6	0,8	0,7	81,3	53,9	15,0	1,2	97,6	53,9	111,5
	освітлювальна													19,6	33,9	39,2
	Всього по Ідальня персоналу													117,2	87,8	146,5
	Територія підприємства															
	освітлювальна													4,0	1,9	4,4
	Всього по ТП-2 силова	204,0	0,2	48,0	723,8	48,0	0,6	0,9	0,6	454,7	319,1	71,0	1,2	545,3	319,1	631,8
	освітлювальна													57,9	82,7	101,0
	Всього													603,2	401,8	724,8
	БСК													603,2	-400,0	723,8
	З урахуванням БСК													603,2	401,8	724,8
	Втрати в трансформаторі Sn.тр=1000, к-сть=2	1000,0				2,0								6,2	39,9	40,3
	Всього на шинах 10 кВ ТП-2													609,3	441,7	752,6
	ТП-3															
1	Ливарний цех №2															
	силова	63,0	1,5	80,0	1039,2	80,0	0,5	0,7	0,9	568,9	538,4	26,0	1,1	642,9	538,4	838,6
	освітлювальна													17,0	8,2	18,9
	Всього по Ливарний цех №2													659,9	546,6	856,9
	Всього по ТП-3 силова	63,0	1,5	80,0	1039,2	80,0	0,5	0,8	0,8	568,9	538,4	26,0	1,1	642,9	538,4	838,6
	освітлювальна													17,0	8,2	18,9
	Всього													659,9	546,6	856,9
	БСК													659,9	-200,0	689,5
	З урахуванням БСК													659,9	546,6	856,9
	Втрати в трансформаторі Sn.тр=1000, к-сть=1	1000,0				1,0								7,3	47,1	47,7
	Всього на шинах 10 кВ ТП-3													667,2	593,8	893,1

Дама

Αρκ.

Продовження табл. 1.3

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість	Pmin одного, кВт	Pmax одного, кВт	Pвст, кВт	m	Kв	cosφ	tgφ	Pср, кВт	Qср, квар	п _е	Kм	Pр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
	ТП-4															
1	Механоскладальний цех №1															
	силова	174,0	0,6	72,0	1122,4	72,0	0,2	0,5	1,6	230,6	375,8	31,0	1,1	260,6	375,8	457,3
	освітлювальна													41,6	20,0	46,2
	Всього по Механоскладальний цех №1													302,2	395,8	498,0
2	Ливарний цех №1															
	силова	43,0	1,0	280,0	407,2	280,0	0,5	0,8	0,8	185,8	149,7	3,0	1,5	269,4	149,7	308,2
	освітлювальна													95,2	45,7	105,6
	Всього по Ливарний цех №1													364,6	195,4	413,6
3	Термічна дільниця та сушильні камери															
	силова	30,0	4,5	96,0	487,6	96,0	0,6	0,9	0,6	297,2	180,2	10,0	1,2	356,6	180,2	399,6
	освітлювальна													15,8	27,3	31,5
	Всього по Термічна дільниця та сушильні камери													372,4	207,5	426,3
	Всього по ТП-4 силова	247,0	0,6	280,0	2017,2	280,0	0,4	0,8	0,8	713,6	705,6	44,0	1,2	886,7	705,6	1133,2
	освітлювальна													152,6	93,0	178,7
	Всього													1039,3	798,6	1310,7
	БСК													1039,3	-400,0	1113,6
	З урахуванням БСК													1039,3	798,6	1310,7
	Втрати в трансформаторі Sn.tr=1000, к-сть=2	1000,0				2,0								11,1	72,1	72,9
	Всього на шинах 10 кВ ТП-4													1050,4	870,7	1364,4
	Всього по заводу															
	силова	737,0	0,2	280,0	5896,9	280,0	0,4	0,8	0,8	2562,5	2272,7	252,0	1,1	2941,4	2272,7	3717,1
	освітлювальна													260,2	240,4	354,3
	Всього													3201,6	2513,1	4070,1
	Компенсуючі пристрої															
	Всього з урахуванням КП-0,4													3201,6	2513,1	4070,1
	Втрати в трансформаторах					6,0								34,6	224,0	226,7
	Всього по заводу													3236,2	2737,1	4238,5
	Високовольтне навантаження															
	ТПЧ-800	3,0	800,0	800,0	2400,0	1,0	0,5	0,8	0,8	1080,0	810,0		1,0	1080,0	810,0	1350,0
	ДЧМ-10	2,0	2250,0	2250,0	4500,0	1,0	0,6	0,8	0,8	2475,0	1856,3		1,0	2475,0	1856,3	3093,8
	ДСП-1,5	1,0	1000,0	1000,0	1000,0	1,0	0,6	0,8	0,8	600,0	450,0		1,0	600,0	450,0	750,0
	Всього на шинах 10 кВ													7391,2	5853,4	9428,3
	З урахуванням БСК														-4744,7	
	Всього на шинах 10 кВ з БСК													7391,2	1108,7	7473,9

1.4 Побудова графіків електричних навантажень підприємства

На основі експлуатаційних даних та результатів вимірювань для підприємства формуються добові графіки активного та реактивного навантаження $P(t)$ і $Q(t)$ для зимового та літнього періодів з урахуванням режимів роботи підприємства у робочі та вихідні дні.

Річний графік навантаження за тривалістю складається на базі отриманих добових графіків. Аналіз добових графіків дозволяє оцінити ступінь завантаження трансформаторів, а також визначити максимальні та мінімальні значення навантаження, необхідні для перевірки режимів напруги в електричній мережі.

За річним графіком визначаються річні витрати активної та реактивної електроенергії, середньозважений коефіцієнт потужності, тривалість використання максимального навантаження, а також річний час максимальних втрат електроенергії.

Для розрахунків приймається така тривалість сезонних режимів роботи підприємства:

- кількість робочих днів у зимовий період - 147;
- кількість робочих днів у літній період - 105;
- кількість вихідних днів у зимовий період - 65;
- кількість вихідних днів у літній період - 48.

Річні витрати активної та реактивної електроенергії визначаються відповідними розрахунковими залежностями.

Побудову графіків електричних навантажень виконано з використанням програмного середовища MS Office Excel. Під час розрахунків прийнято, що літнє навантаження є меншим за зимове приблизно на 15 %.

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

Таблиця 1.4 – Навантаження літні та зимові для побудови графіків навантажень

№	Зимові дні						Літні дні					
	Робочі дні			Вихідні дні			Робочі дні			Вихідні дні		
	P, кВт	Q, кВАр	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	S, кВА
1	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
2	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
3	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
4	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
5	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
6	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
7	5913	721	5957	2809	665	2887	5026	613	5063	2387	565	2453
8	7391	832	7438	2809	665	2887	6283	707	6323	2387	565	2453
9	7391	1109	7474	1996	554	2071	6283	942	6353	1696	471	1760
10	7391	1109	7474	1996	554	2071	6283	942	6353	1696	471	1760
11	6652	832	6704	1996	554	2071	5654	707	5698	1696	471	1760
12	5913	721	5957	1996	554	2071	5026	613	5063	1696	471	1760
13	6652	832	6704	1996	554	2071	5654	707	5698	1696	471	1760
14	6652	832	6704	1996	554	2071	5654	707	5698	1696	471	1760
15	7391	887	7444	1996	554	2071	6283	754	6328	1696	471	1760
16	7391	887	7444	1996	554	2071	6283	754	6328	1696	471	1760
17	6652	832	6704	1996	554	2071	5654	707	5698	1696	471	1760
18	5913	721	5957	2809	665	2887	5026	613	5063	2387	565	2453
19	4435	554	4469	2809	665	2887	3770	471	3799	2387	565	2453
20	4435	554	4469	2809	665	2887	3770	471	3799	2387	565	2453
21	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
22	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
23	3696	499	3730	2809	665	2887	3141	424	3169	2387	565	2453
24	3326	466	3358	2809	665	2887	2827	396	2855	2387	565	2453

За результатами побудови річного графіка електроспоживання визначаються обсяги споживання активної та реактивної електроенергії за рік.

$$W_p = \sum_{i=1} P_i \cdot \tau_i = 36304986 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$V_p = \sum_{i=1} Q_i \cdot \tau_i = 5452197 \text{ кВАр} \cdot \text{год}$$

Число годин використання найбільшого навантаження характеризує тривалість роботи електроустановок у режимі максимальної потужності та обчислюється шляхом ділення річного споживання електроенергії на максимальне значення повної потужності:

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{м}} = \frac{\sqrt{W_p^2 + V_p^2}}{S_{\text{м}}} = \frac{\sqrt{36304986^2 + 5452197^2}}{7473,89} = 4912,047 \text{ год}$$

де

$$S_{\text{м}} = \sqrt{P_{\text{п10}}^2 + Q_{\text{п10}}^2} = \sqrt{7391,2^2 + 1108,7^2} = 7473,9 \text{ кВА}$$

Для визначення тривалості максимальних втрат електроенергії $\tau_{\text{м}}$ застосовують залежність Кезевича, яка враховує зміну навантаження електричної мережі протягом року та нерівномірність режимів роботи споживачів:

$$\tau_{\text{м}} = \left(0,124 + \frac{T_{\text{м}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{4912,05}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3315,5 \text{ год}$$

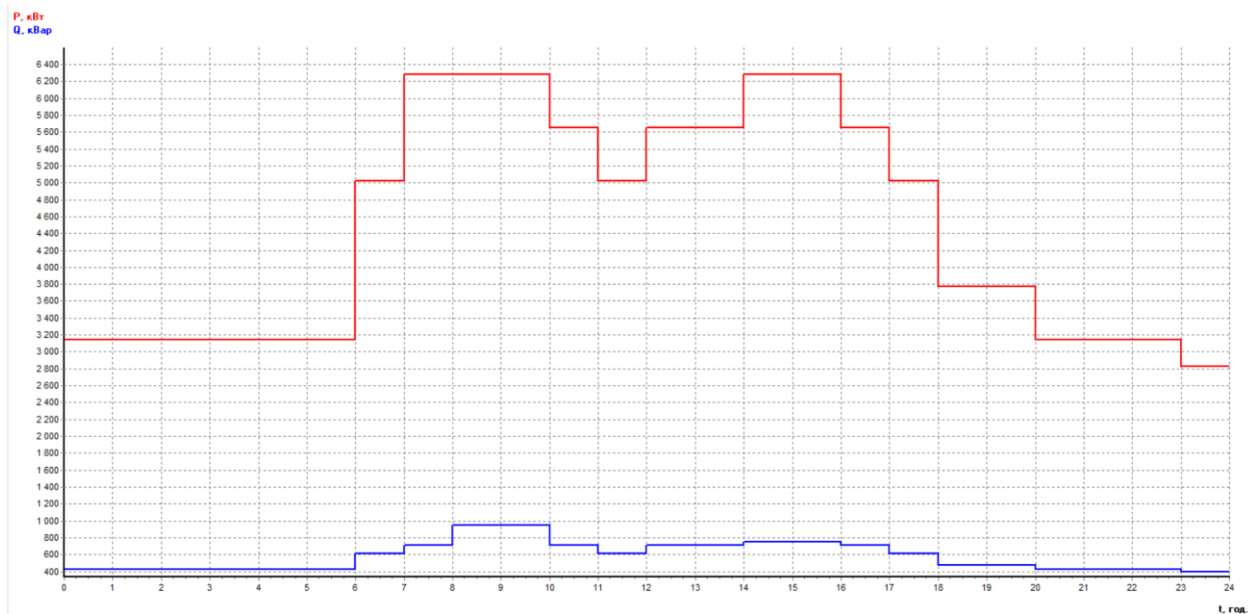


Рисунок 1.1 – Активне та реактивне навантаження літнього робочого дня

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

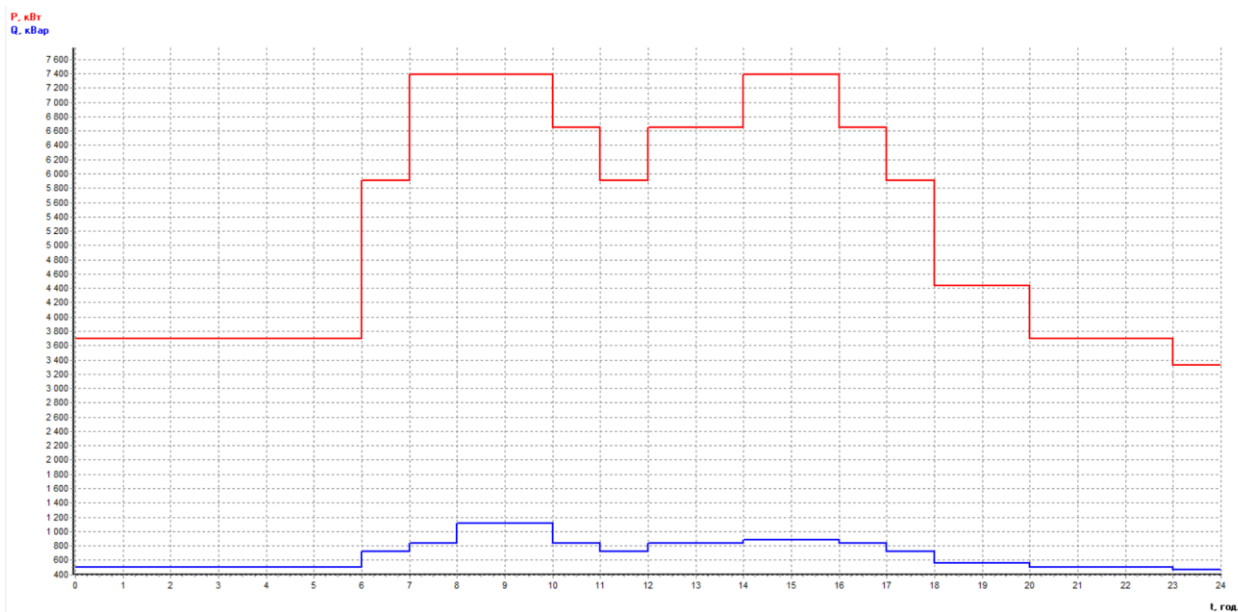


Рисунок 1.2 – Активне та реактивне навантаження зимового робочого дня

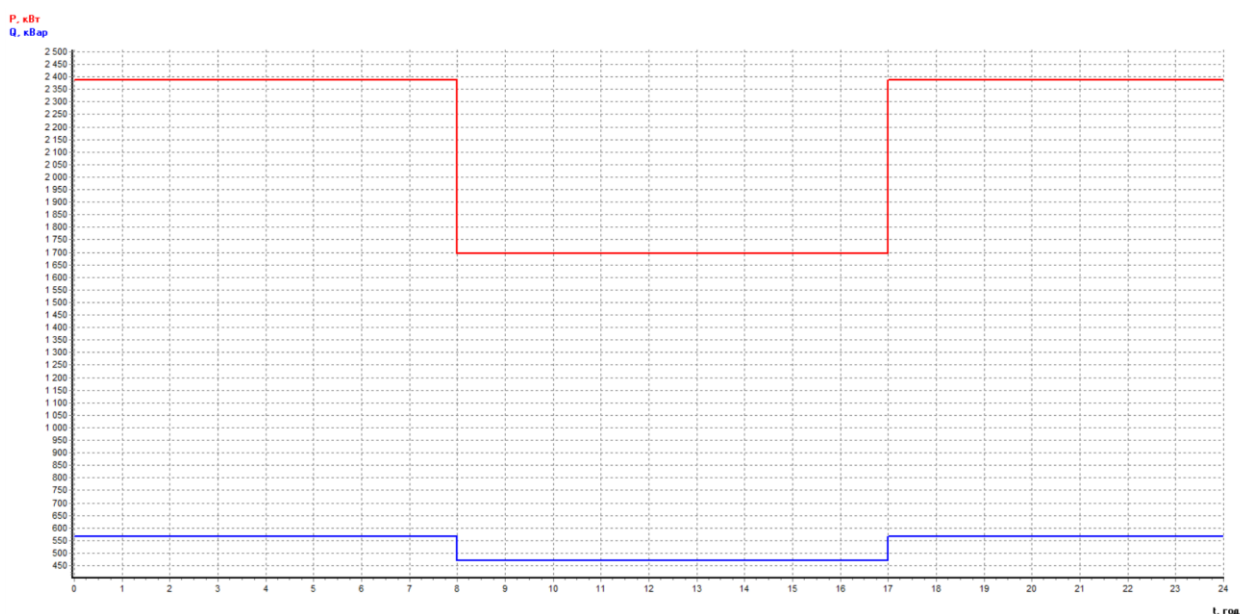


Рисунок 1.3 – Активне та реактивне навантаження літнього вихідного дня

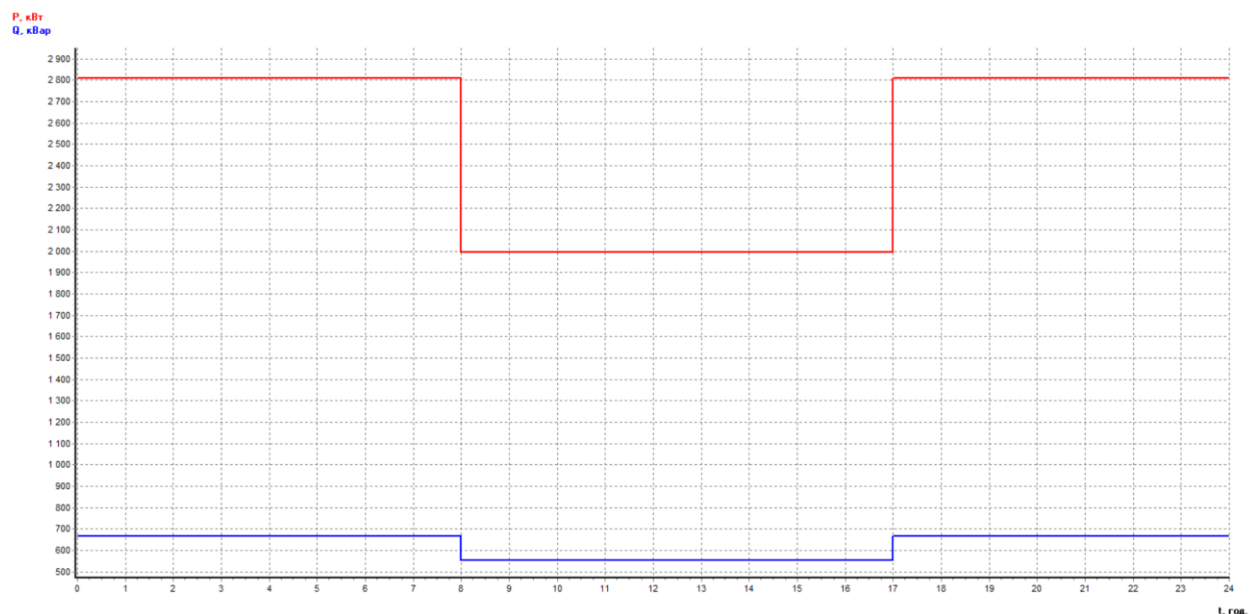


Рисунок 1.4 – Активне та реактивне навантаження зимового вихідного дня

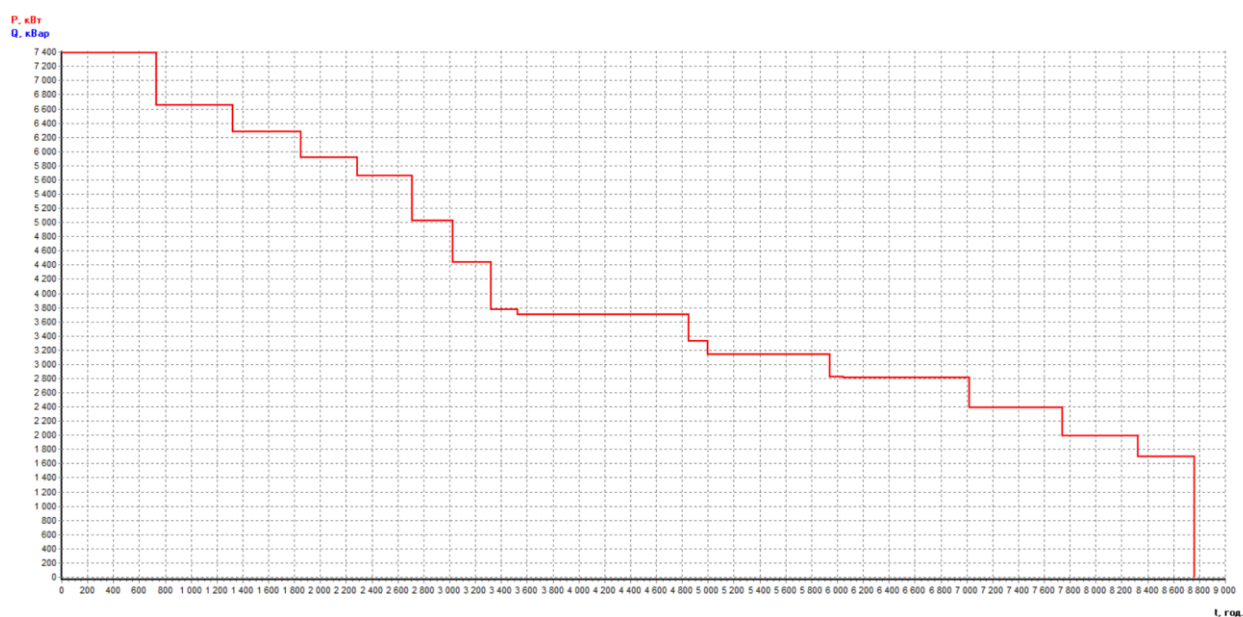


Рисунок 1.5 – Річний графік повного навантаження за тривалістю

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

2 ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Картограма навантажень дає можливість наочно оцінити розподіл електроспоживання між окремими виробничими та допоміжними підрозділами.

Під час побудови картограми для кожного цеху визначається коло, площа якого у вибраному масштабі відповідає величині розрахункового навантаження P_p . Радіус кола для цеху лазерного різання та механічної обробки визначається за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{P_p}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{1181,29}{3,14 \cdot 0,2}} = 42,08$$

де m - масштаб картограми, кВт/мм²;

P_p - розрахункове навантаження відповідного підрозділу.

У даному розрахунку прийнято масштаб $m=0,2$ кВт/мм²

Для відображення освітлювального навантаження на картограмі визначають кут сектора:

$$\alpha = 360 \cdot \frac{P_{осв}}{P_p} = 360 \cdot \frac{32,7}{899,27} = 13,09^\circ$$

де α - кут сектора освітлювального навантаження;

$P_{осв}$ - освітлювальне навантаження підрозділу;

P_p - сумарне розрахункове навантаження цеху.

Центр електричних навантажень підприємства визначається як центр мас плоскої системи навантажень. Координати центру навантажень розраховуються за залежностями:

$$X_0 = \frac{\sum P_i x_i}{\sum P_i}$$

$$Y_0 = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i}$$

де P_i - розрахункове навантаження i -го підрозділу;

x_i, y_i - координати відповідного цеху на генеральному плані;

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

n - кількість підрозділів підприємства.

Координата центру електричних навантажень по осі X:

$$X_0 = \frac{\sum P_i x_i}{\sum P_i} = \frac{486818,96}{3291,60} = 147,9$$

Координата центру електричних навантажень по осі Y:

$$Y_0 = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i} = \frac{862095,53}{3291,60} = 261,9$$

Отже, центр електричних навантажень підприємства знаходиться в точці:

$$\text{ЦЕН}=(147,9; 261,9)$$

Результати розрахунків координат центру електричних навантажень наведені в таблиці 2.1.

№	Найменування підрозділу	Рр сил., кВт	Qр сил., квар	Рр осв., кВт	Qр осв., квар	ΣРр, кВт	ΣQр, квар	ΣSp, кВА	т, кВт/мм ²	R, мм	αосв, °	х, м	у, м	ΣР·х	ΣР·у
1	Цех лазерного різання та механічної обробки	866,57	709,51	32,70	56,50	899,27	766,01	1181,29	0,20	37,83	13,09	95,00	85,00	85430,18	76437,53
2	Логістичний склад готової продукції	20,89	13,39	3,40	1,60	24,29	14,99	28,54	0,20	6,22	50,39	140,00	250,00	3400,50	6072,32
3	Адміністративно-навчальний корпус	80,17	47,59	22,90	39,60	103,07	87,19	135,00	0,20	12,81	79,99	180,00	320,00	18552,01	32981,35
4	Компресорна станція	326,86	190,12	4,70	0,00	331,56	190,12	382,20	0,20	22,97	5,10	70,00	360,00	23209,09	119361,02
5	Дільниця лакофарбових матеріалів	14,12	8,71	0,80	1,40	14,92	10,11	18,02	0,20	4,87	19,30	55,00	285,00	820,80	4253,23
6	Склад інструменту та комплектуючих	5,66	5,35	2,50	4,30	8,16	9,65	12,63	0,20	3,60	110,32	255,00	340,00	2080,26	2773,69
7	Ідальня персоналу	97,59	53,94	19,60	33,90	117,19	87,84	146,45	0,20	13,66	60,21	85,00	145,00	9961,05	16992,38
8	Територія підприємства	0,00	0,00	4,00	1,90	4,00	1,90	4,43	0,20	2,52	360,00	205,00	130,00	820,00	520,00
9	Ливарний цех №2	642,88	538,44	17,00	8,20	659,88	546,64	856,89	0,20	32,41	9,27	230,00	455,00	151772,05	300244,70
10	Механоскладальний цех №1	260,62	375,80	41,60	20,00	302,22	395,80	497,99	0,20	21,93	49,55	120,00	210,00	36265,97	63465,45
11	Ливарний цех №1	269,41	149,66	95,20	45,70	364,61	195,36	413,65	0,20	24,09	94,00	245,00	395,00	89328,38	144019,23
12	Термічна дільниця та сушильні камери	356,65	180,19	15,80	27,30	372,45	207,49	426,34	0,20	24,35	15,27	175,00	255,00	65178,68	94974,65
	Всього по підприємству	2941,40	2272,70	260,20	240,40	3201,60	2513,10	4070,12						486818,96	862095,53
	ЦЕН		X0= 152,05		Y0= 269,27										

З урахуванням особливостей генерального плану підприємства та розташування транспортних проїздів приймаємо фактичне розташування ЦЕН у точці:

$$\text{ЦЕН}=(150; 260)$$

Вибрана точка знаходиться у вільній зоні генплану між основними виробничими підрозділами, що забезпечує більш раціональне прокладання кабельних ліній та зменшення їхньої загальної довжини. Крім того, таке розташування не перешкоджає транспортним проїздам і забезпечує зручний доступ для монтажу та подальшого обслуговування електротехнічного обладнання.

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

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВАРІАНТІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Раціональний вибір схеми зовнішнього електропостачання виконується шляхом порівняння декількох технічно можливих варіантів. Для підприємства розглядаються два рішення: живлення на напрузі 10 кВ із будівництвом розподільчого пункту 10 кВ та живлення на напрузі 35 кВ із встановленням головної понижувальної підстанції 35/10 кВ. Остаточний варіант приймається за мінімальними зведеними витратами з урахуванням капітальних вкладень, експлуатаційних витрат і вартості втрат електроенергії.

Вихідні дані для розрахунку: розрахункова повна потужність підприємства $S_p = 9428,3$ кВА; тривалість використання максимуму навантаження $T_{\max} = 4912,05$ год; час максимальних втрат $\tau = 3315,5$ год; довжина траси зовнішнього електропостачання $L = 7,5$ км. Для обох варіантів приймається прокладання двох взаєморезервованих кабельних ліній.

Для порівняння прийнято тариф вартості втрат електроенергії $C_e = 8,9$ грн/кВт·год без ПДВ. Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень прийнято $E_n = 0,12$.

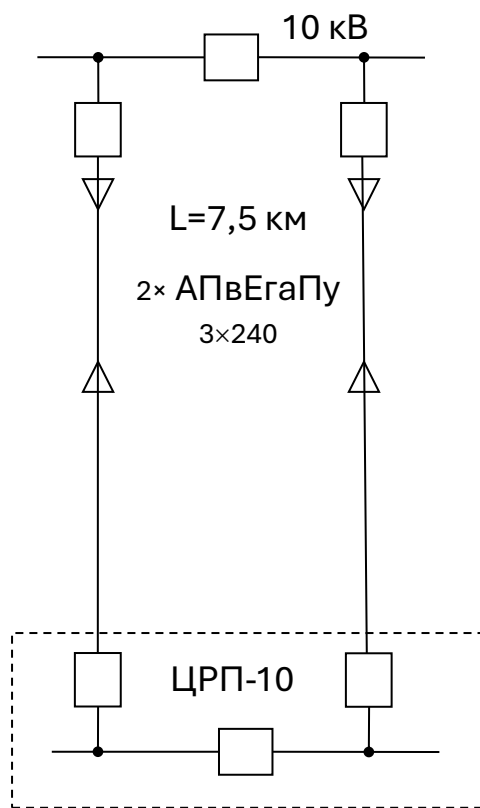
Методика визначення зведених витрат використовується відповідно [2].

Зведені витрати за кожним варіантом визначаються як сума нормативної частини капітальних вкладень, поточних експлуатаційних витрат і вартості втрат електроенергії:

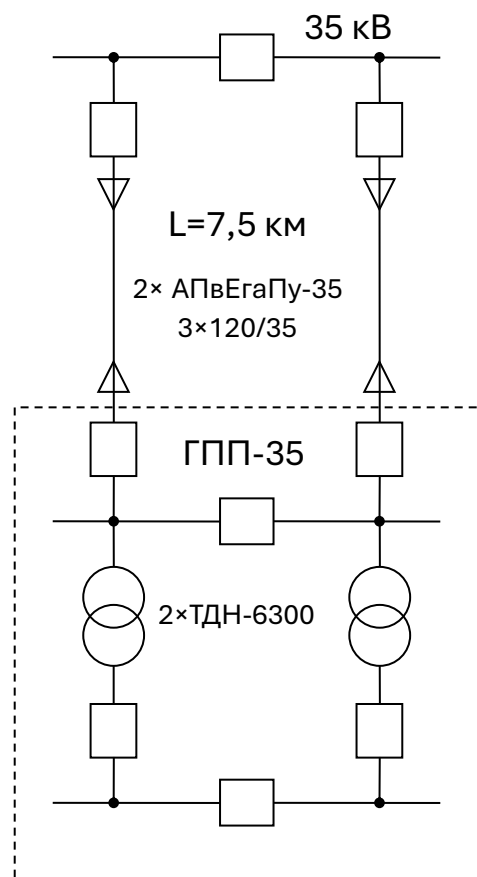
$$Z_i = E_n \cdot K_i + C_i + C_{\text{втр}}, \text{ тис. грн/рік}$$

де K_i - сумарні капітальні вкладення за варіантом; C_i - витрати на амортизацію, ремонт та експлуатацію; $C_{\text{вт}}$ - вартість річних втрат електроенергії.

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



а)



б)

Рисунок 3.1 – Схеми електропостачання варіантів схем зовнішнього електропостачання.

Варіант І. Живлення підприємства на напрузі 10 кВ

У першому варіанті живлення підприємства передбачається від джерела системи електропостачання двома кабельними лініями 10 кВ довжиною 7,5 км. З урахуванням аварійного режиму кожна лінія виконується двома паралельними кабелями АПвЕгаПу-10 3×240 мм². Загальна довжина кабельних кіл становить 30 км.

Розрахунковий струм підприємства:

$$I_p = S_p / (\sqrt{3} \cdot U) = 9428,30 / \sqrt{(1,732 \cdot 10)} = 544,3 \text{ А.}$$

Струм одного кабелю в нормальному режимі:

$$I_k = I_p / 4 = 544,3 / 4 = 136,1 \text{ А.}$$

Площа перерізу за економічною густиною струму:

$$F_{ек} = I_l / j_{ек} = 272,2 / 1,1 = 247,4 \text{ мм}^2,$$

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

тому приймаємо паралельне прокладання кабелів $3 \times 240 \text{ мм}^2$.

В аварійному режимі при вимкненні однієї лінії струм одного кабелю становить $I_{\text{ав}} = 272,2 \text{ А}$, що не перевищує допустиме аварійне навантаження прийнятого кабелю.

Втрати активної потужності в лініях:

$$\Delta P_{\text{Л}} = 4 \cdot 3 \cdot I_{\text{к}}^2 \cdot R \cdot L / 1000 = 4 \cdot 3 \cdot 136,1^2 \cdot 0,184 \cdot 7,5 / 1000 = 306,7 \text{ кВт.}$$

Річні втрати електроенергії:

$$\Delta W_{\text{Л}} = \Delta P_{\text{Л}} \cdot \tau = 306,7 \cdot 3315,5 = 1016799 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Вартість втрат:

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\text{Л}} \cdot C_{\text{е}} / 1000 = 1016799 \cdot 8,90825 / 1000 = 9057,9 \text{ тис. грн/рік.}$$

Варіант II. Живлення підприємства на напрузі 35 кВ з ГПП 35/10 кВ

У другому варіанті передбачається живлення підприємства двома кабельними лініями 35 кВ з будівництвом ГПП 35/10 кВ. Для зовнішньої мережі приймаються кабелі АПвЕгаПу-35 $3 \times 120/35 \text{ мм}^2$, прокладені по три однофазні кабелі в кожній лінії. На ГПП встановлюються два трансформатори ТДН-10000/35 потужністю 10000 кВА кожен.

Струм однієї кабельної лінії 35 кВ у нормальному режимі:

$$I_{\text{л}} = S_{\text{р}} / (\sqrt{3} \cdot U \cdot n) = 9428,30 / (1,732 \cdot 35 \cdot 2) = 77,8 \text{ А.}$$

Струм у післяаварійному режимі при роботі однієї лінії:

$$I_{\text{ав}} = S_{\text{р}} / (\sqrt{3} \cdot U) = 9428,30 / (1,732 \cdot 35) = 155,5 \text{ А.}$$

Площа перерізу за економічною густиною струму:

$$F_{\text{ек}} = I_{\text{л}} / j_{\text{ек}} = 77,8 / 1,1 = 70,7 \text{ мм}^2,$$

тому приймаємо кабель АПвЕгаПу-35 $3 \times 120/35 \text{ мм}^2$.

Коефіцієнт завантаження трансформаторів:

$$\beta = S_{\text{р}} / (2 \cdot S_{\text{н.тр}}) = 9428,30 / (2 \cdot 6300) = 0,75.$$

Втрати потужності в кабельних лініях:

$$\Delta P_{\text{Л}} = 2 \cdot 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot R \cdot L / 1000 = 2 \cdot 3 \cdot 77,8^2 \cdot 0,304 \cdot 7,5 / 1000 = 82,7 \text{ кВт.}$$

Річні втрати в кабельних лініях: $\Delta W_{\text{Л}} = \Delta P_{\text{Л}} \cdot \tau = 82,7 \cdot 3315,5 = 274274$

кВт·год

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

Річні втрати в трансформаторах: $\Delta W_{\text{тр}} = 2 \cdot (\Delta P_{\text{хх}} \cdot 8760 + \Delta P_{\text{кз}} \cdot \beta^2 \cdot \tau) = 2 \cdot (7,5 \cdot 8760 + 46 \cdot 0,471^2 \cdot 3315,5) = 199067 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Сумарні втрати електроенергії: $\Delta W_{\Sigma} = 274274 + 199067 = 473341 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Вартість втрат: $C_{\text{втр}} = \Delta W_{\Sigma} \cdot C_{\text{е}} / 1000 = 473341 \cdot 8,90825 / 1000 = 4212,73 \text{ тис. грн/рік.}$

Таблиця 3.1 - Розрахунок капітальних вкладень

№ варіанту	Назва елемента схеми	Одиниця	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Всього, тис. грн
I	Кабель АПвЕгаПу-10 3×240 мм ²	км	30	5200,0	156000,0
	Комірки КРУ-10 кВ із вимикачами	шт	2	1450,0	2900,0
	Всього				158900,0
II	Кабель АПвЕгаПу-35 1×120/35 мм ²	км	45	1266,72	57002,4
	Вимикачі 35 кВ	шт	5	3200,0	16000,0
	Трансформатори ТДН-6300/35	шт	2	25000,0	50000,0
	Обладнання РП-10 кВ на ГПП	компл.	1	12000,0	12000,0
	Всього				135002,4

Таблиця 3.2 - Розрахунок поточних витрат

№ варіанта	Елемент схеми	К _ж , тис. грн	Р _а , %	С _а , тис. грн	Р _е , %	С _е , тис. грн	С _ж , тис. грн
I	Кабельні лінії 10 кВ	156000,0	5	7800,0	5	7800,0	15600,0
	Комірки КРУ-10 кВ	2900,0	15	435,0	5	145,0	580,0
I	Всього						16180,0
II	Кабельні лінії 35 кВ	57002,4	5	2850,1	5	2850,1	5700,2
	Вимикачі 35 кВ	16000,0	15	2400,0	5	800,0	3200,0
	Трансформатори 35/10 кВ	50000,0	15	7500,0	5	2500,0	10000,0
	Обладнання РП-10 кВ	12000,0	10	1200,0	5	600,0	1800,0
II	Всього						20700,2

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

Таблиця 3.3 - Техніко-економічні показники варіантів

Показник	Варіант I, тис. грн/рік	Варіант II, тис. грн/рік
Капітальні вкладення К	158900,0	135002,4
Поточні витрати С	16180,0	20700,2
Вартість втрат електроенергії $C_{втр}$	9057,9	4212,73
Нормативна частина $E_n \cdot K$	19068,0	16200,3
Зведені витрати З	44305,9	41113,23

За результатами розрахунку зведені витрати для варіанта I становлять 44305,9 тис. грн/рік, а для варіанта II - 41113,23 тис. грн/рік. Менше значення має варіант II, тобто живлення підприємства на напрузі 35 кВ з будівництвом ГПП 35/10 кВ. Саме цей варіант доцільно прийняти для подальшого проектування. Для внутрішнього електропостачання підприємства приймається радіальна схема, яка забезпечує достатній рівень надійності та зручність експлуатації.

4 РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Передавання значних потоків реактивної потужності від енергосистеми до споживачів є технічно та економічно недоцільним. Воно збільшує струми в лініях і трансформаторах, погіршує режим напруги, підвищує втрати активної потужності та зменшує пропускну здатність елементів мережі. Тому під час проектування системи електропостачання необхідно передбачати компенсацію реактивної потужності безпосередньо поблизу місць її споживання.

Компенсуючі пристрої дають змогу зменшити реактивне навантаження, що передається через зовнішні та внутрішньозаводські мережі, підвищити коефіцієнт потужності, знизити втрати електроенергії та покращити техніко-економічні показники роботи електропостачальної системи.

Частина реактивної потужності може економічно доцільно надходити з енергосистеми. Її величина визначається через задане значення середньозваженого $\text{tg}\varphi$, що характеризує допустимий режим споживання реактивної потужності підприємством.

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв

Активне навантаження в мережі 0,4 кВ: $P_H = 3234,2$ кВт;

реактивне навантаження в мережі 0,4 кВ: $Q_H = 2737,1$ квар;

активне навантаження в мережі 10 кВ: $P_B = 4155$ кВт;

реактивне навантаження в мережі 10 кВ: $Q_B = 3114,25$ квар;

Сумарне активне навантаження підприємства:

$$P_p = P_H + P_B = 3234,2 + 4155 = 7391,2 \text{ кВт}$$

Сумарне реактивне навантаження підприємства:

$$Q_p = Q_H + Q_B = 2737,1 + 3114,25 = 5853,35 \text{ квар}$$

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

Економічно допустима реактивна потужність, що може бути отримана від енергосистеми:

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_e = 7391,2 \cdot 0,15 = 1108,68 \text{ квар}$$

Необхідна сумарна потужність компенсуючих пристроїв:

$$Q_{ку} = Q_p - Q_e = 5853,35 - 1108,68 = 4744,67 \text{ квар}$$

Мінімальна кількість трансформаторів за активним навантаженням:

$$N_0 = P_H / (K_z \cdot S_{H.тр}) = 3234,2 / (0,75 \cdot 1000) = 4,31$$

Отримане значення округлюється в більший бік.

Варіант N = 5

Найбільша реактивна потужність, яку можна передати через трансформатори:

$$Q_{п. max} = \sqrt{((N \cdot S_{H. тр} \cdot K_z)^2 - P_H^2)} = \sqrt{((5 \cdot 1000 \cdot 0,75)^2 - 3236,2^2)} \\ = 1894,60 \text{ квар.}$$

Приймаємо низьковольтну компенсацію: $Q_{кн} = 900$ квар, склад батарей: 3×300 квар.

Уточнена реактивна потужність, що передається через трансформатори: $Q_{п} = Q_H - Q_{кн} = 2737,1 - 900 = 1837,10$ квар; умова $Q_{п} \leq Q_{п. max}$ виконується.

Потужність високовольтних компенсуючих пристроїв: $Q_{кв} = 3900$ квар, склад батарей: 2×1950 квар.

Залишкова реактивна потужність після компенсації: $Q_{зал} = Q_{\Sigma} - Q_{кн} - Q_{кв} = 5853,35 - 900 - 3900 = 1053,35$ квар.

Еквівалентний опір трансформаторів:

$$R_{ек} = \Delta P_{кз} \cdot U_H^2 / (N \cdot S_{H. тр}^2) = 8,6 \cdot 10^2 / (5 \cdot 1000^2) = 172,00 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Втрати активної потужності в трансформаторах від передавання реактивної потужності:

$$\Delta P_{тп} = Q_{п}^2 \cdot R_{ек} / U_H^2 = 1837,1^2 \cdot 172 \cdot 10^{-6} / 10^2 = 5,80 \text{ кВт.}$$

Втрати в батареях 0,4 кВ: $\Delta P_{кн} = 0,0045 \cdot Q_{кн} = 0,0045 \cdot 900 = 4,05$ кВт.

Втрати в батареях 10 кВ: $\Delta P_{кв} = 0,003 \cdot Q_{кв} = 0,003 \cdot 3900 = 11,70$ кВт.

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

Сумарні активні втрати: $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ТП} + \Delta P_{КН} + \Delta P_{КВ} = 5,80 + 4,05 + 11,70 = 21,55$ кВт.

Вартість річних втрат: $C_{втр} = \Delta P_{\Sigma} \cdot \tau \cdot C_0 / 1000 = 21,55 \cdot 3315,5 \cdot 7.20 / 1000 = 514,55$ тис. грн.

Приведені затрати: $З = E_n \cdot K_{\Sigma} + C_{втр} = 0,12 \cdot 11285,00 + 514,55 = 1868,75$ тис. грн.

Варіанти N=6 і N=7 розраховано аналогічно і результати зведено в Табл.4.1 і Табл. 4.2

Таблиця 4.1 – Баланс реактивної потужності для варіантів N = 5, 6, 7

Показник	N = 5	N = 6	N = 7
Потужність КП в мережі 0,4 кВ, квар	900	1200	1500
Склад КП 0,4 кВ	3×300 квар	6×200 квар	6×250 квар
Потужність КП в мережі 10 кВ, квар	3900	3600	3300
Склад КП 10 кВ	2×1950 квар	2×1800 квар	2×1650 квар
Залишкова реактивна потужність Q _{зал} , квар	1053.35	1053.35	1053.35
Економічно допустима потужність Q _е , квар	1108.68	1108.68	1108.68

Таблиця 4.2 – Техніко-економічне порівняння затрат на встановлення КУ

Показник	Одиниця	N = 5	N = 6	N = 7
Кількість трансформаторів	шт	5	6	7
Вартість КУ 0,4 кВ	тис. грн	435,0	690,0	780,0
Вартість КУ 10 кВ	тис. грн	4600,0	3400,0	3200,0
Вартість КТП	тис. грн	6250,0	7500,0	8750,0

Сумарні капітальні вкладення K_{Σ}	тис. грн	11285,0	11590,0	12730,0
Втрати в трансформаторах ΔP_{TP}	кВт	5,8	3,39	1,88
Втрати в КУ 0,4 кВ	кВт	4,05	5,4	6,75
Втрати в КУ 10 кВ	кВт	11,7	10,8	9,9
Сумарні активні втрати ΔP_{Σ}	кВт	21,55	19,59	18,53
Вартість річних втрат	тис. грн/рік	514,55	467,56	442,35
Приведені затрати Z	тис. грн/рік	1868,75	1858,36	1969,95

За результатами розрахунків найменші приведені затрати отримано для варіанта $N = 6$. Для цього варіанта передбачається встановлення шести цехових трансформаторів, двох високовольтних конденсаторних батарей сумарною потужністю 3600 квар та шести низьковольтних батарей сумарною потужністю 1200 квар.

Обраний варіант забезпечує прийнятний баланс реактивної потужності, зменшує передавання реактивної складової через трансформатори та дозволяє раціонально розподілити компенсацію між мережами 0,4 кВ і 10 кВ. Тому для подальшого проектування приймається варіант із $N = 6$ трансформаторами.

4.2 Вибір кількості та місць розташування компенсуючих пристроїв

З урахуванням структури системи електропостачання підприємства приймається шість трансформаторів по 1000 кВА. Таке рішення узгоджується з розподілом навантаження між цеховими трансформаторними підстанціями та забезпечує необхідний резерв потужності для післяаварійних режимів.

Низьковольтні конденсаторні батареї доцільно розміщувати безпосередньо на стороні 0,4 кВ цехових ТП, оскільки це зменшує перетікання реактивної потужності через трансформатори і кабельні мережі низької

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

напруги. Високовольтні батареї встановлюються на шинах 10 кВ для компенсації реактивної потужності, що формується високовольтними електроприймачами та загальнозаводським навантаженням.

Таблиця 4.3 - Розміщення низьковольтних компенсуючих пристроїв

ТП	Кількість трансформаторів	Прийнята батарея, квар	Кількість батарей	Сумарна потужність, квар
ТП-1	1	200	1	200
ТП-2	2	200	2	400
ТП-3	1	200	1	200
ТП-4	2	200	2	400
Всього	6		6	1200

Таблиця 4.4 - Вибір компенсуючих пристроїв

Рівень напруги	Тип установки	Потужність однієї батареї, квар	Кількість, шт.	Сумарна потужність, квар	Примітка
0,4 кВ	низьковольтна конденсаторна батарея УКРМ-0,4-200/10	200	6	1200	встановлюється біля цехових ТП
10 кВ	високовольтна конденсаторна батарея УКРМ-56-10,5-1800 УЗ	1800	2	3600	встановлюється на шинах 10 кВ
Разом			8	4800	

Отже, для компенсації реактивної потужності приймається встановлення шести низьковольтних конденсаторних батарей сумарною потужністю 1200 квар та двох високовольтних батарей сумарною потужністю 3600 квар. Загальна потужність компенсуючих пристроїв становить 4800 квар, що забезпечує наближення залишкового реактивного навантаження підприємства до економічно допустимого значення.

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

Кількість і номінальна потужність трансформаторів цехових ТП приймаються з урахуванням розрахункового навантаження, категорії надійності електроприймачів, режиму роботи технологічного обладнання, можливості компенсації реактивної потужності та умов розміщення підстанцій на території підприємства.

Для одотрансформаторних підстанцій потужність трансформатора вибирається так, щоб у нормальному режимі його завантаження не перевищувало допустимого значення. Для двотрансформаторних ТП додатково перевіряється післяаварійний режим, коли при відключенні одного трансформатора другий тимчасово приймає на себе навантаження відповідної підстанції.

Номінальна потужність трансформатора вибирається за умовою:

$$S_{н.тр} \geq S_p / n,$$

де S_p - розрахункова повна потужність підстанції, кВА; n - кількість трансформаторів у складі ТП.

Коефіцієнт завантаження трансформатора у нормальному режимі визначається за формулою:

$$K_z = S_p / (n \cdot S_{н.тр}).$$

Для двотрансформаторних підстанцій коефіцієнт завантаження в післяаварійному режимі визначається як:

$$K_{ав} = S_p / S_{н.тр}.$$

Проведемо розрахунок для ТП-1, яка виконується одотрансформаторною.

Розрахункова потужність ТП-3: $S_p = 689,5$ кВА.

Умова вибору трансформатора: $S_{н.тр} = 1000 \text{ кВА} \geq 689,5 \text{ кВА}$, тому приймаємо трансформатор ТМ-1000/10.

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

Коефіцієнт завантаження у нормальному режимі:

$$K_z = S_p / S_{н.тр} = 689,5 / 1000 = 0,69.$$

Отже, для ТП-3 приймається комплектна трансформаторна підстанція типу КТП-1×1000 з трансформатором ТМ-1000/10. Завантаження трансформатора у нормальному режимі становить 0,69, що відповідає допустимим умовам роботи.

Вибір кількості та потужності трансформаторів для інших ТП виконується аналогічно. Результати наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових ТП

Номер ТП	Тип ТП	S_p , кВА	$S_{н.тр}$, кВА	K_z	$K_{ав}$
ТП-1	КТП-1×1000, трансформатор ТМ-1000/10	921,0	1000	0,921	–
ТП-2	КТП-2×630, трансформатори ТМ-630/10	723,8	2×630	0,574	1,149
ТП-3	КТП-1×1000, трансформатор ТМ-1000/10	689,5	1000	0,690	–
ТП-4	КТП-2×1000, трансформатори ТМ-1000/10	1113,6	2×1000	0,557	1,114

Для однострансформаторних підстанцій ТП-1 і ТП-3 прийнято трансформатори потужністю 1000 кВА, оскільки їх розрахункові навантаження не перевищують номінальну потужність вибраного обладнання. Для ТП-2 доцільно встановити два трансформатори по 630 кВА, що забезпечує допустиме завантаження як у нормальному, так і в післяаварійному режимі. Для ТП-4, яка має найбільше навантаження серед двотрансформаторних підстанцій, приймається КТП-2×1000.

Прийняті типорозміри трансформаторів забезпечують необхідний резерв потужності, відповідають характеру навантажень підприємства та дозволяють організувати надійне електропостачання виробничих і допоміжних підрозділів.

6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМКНЕННЯ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок опорів та струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замкнення виконується для перевірки електричних апаратів, кабельних ліній і струмопровідних частин за умовами електродинамічної та термічної стійкості. Розрахунковим режимом приймається трифазне коротке замкнення, оскільки воно створює найбільші значення струмів у високовольтній мережі підприємства.

Для подальшого вибору обладнання визначають початкове діюче значення періодичної складової струму короткого замкнення та ударний струм. Розрахунок ведеться в іменованих одиницях. Джерело живлення, кабельні лінії та силові трансформатори замінюються відповідними активними й індуктивними опорами, після чого схема зводиться до еквівалентної.

Для розрахунку струмів КЗ будується розрахункова схема для (рис. 6.1) та розрахункова схема заміщення (рис.6.2).

Таблиця 6.1 - Вихідні дані для розрахунку

Показник	Позначення	Значення	Одиниця
Розрахункова потужність підприємства	Sp	9428,3	кВА
Напруга зовнішнього живлення	Uвн	35	кВ
Напруга внутрішньозаводської мережі	Uнн	10	кВ
Довжина зовнішньої кабельної лінії	l	7,5	км
Потужність короткого замкнення системи	Sk	300	МВА
Коефіцієнт ударного струму	Ky	1,45	-
Тривалість дії КЗ для термічної перевірки	t	0,5	с

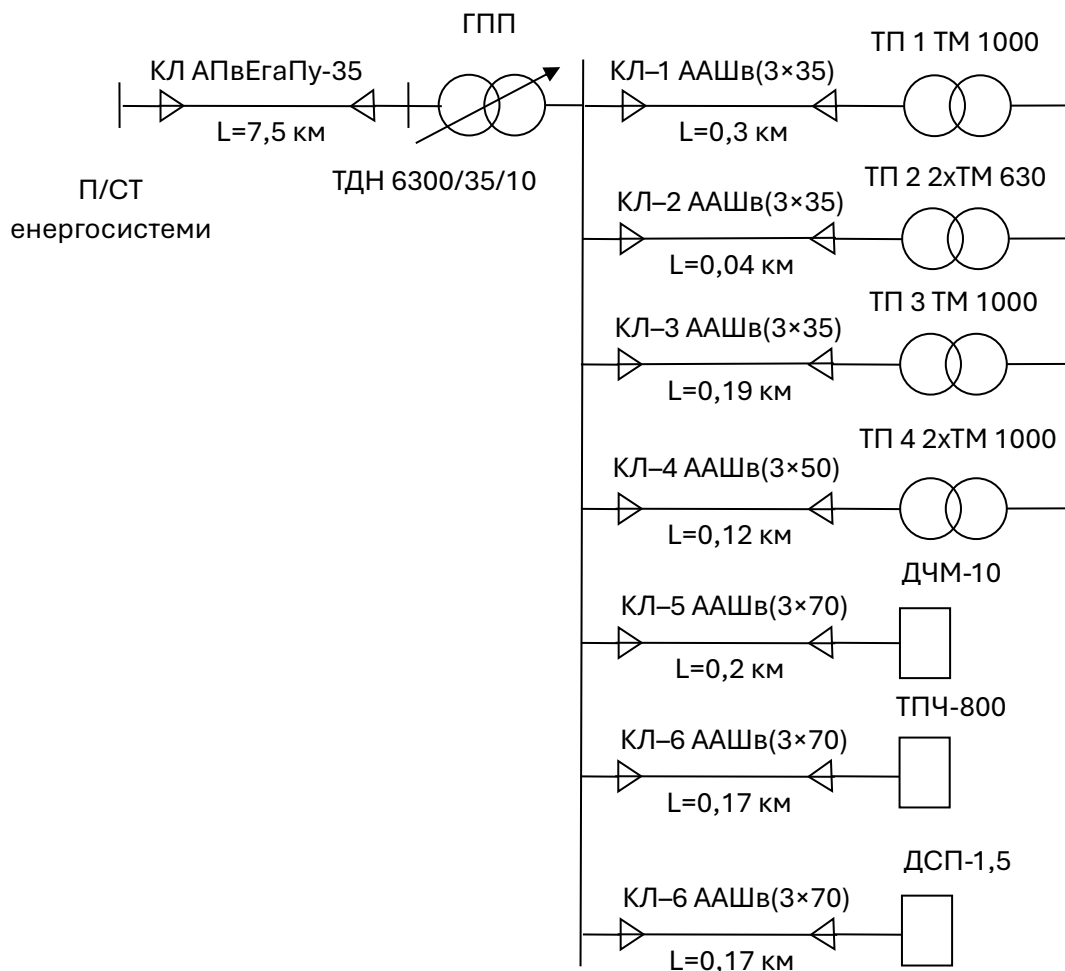


Рисунок 6.1 - Розрахункова схема ГПП для розрахунку струмів к. з.

Опір енергосистеми, приведений до напруги 35 кВ:

$$X_c = U^2 / S_k = 35^2 / 300 = 4,08 \text{ Ом}$$

Опір зовнішньої кабельної лінії 35 кВ довжиною 7,5 км:

$$X_{кл} = x_0 \cdot l = 0,08 \cdot 7,5 = 0,6 \text{ Ом}$$

Сумарний опір до шин 35 кВ ГПП:

$$X_{\Sigma 35} = X_c + X_{кл} = 4,08 + 0,60 = 4,68 \text{ Ом}$$

Струм короткого замкнення на шинах 35 кВ:

$$I_{к1} = U / (\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma 35}) = 35 / (1,732 \cdot 4,68) = 4,31 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці К1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{к1} = 1,414 \cdot 1,45 \cdot 4,31 = 8,85 \text{ кА}$$

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

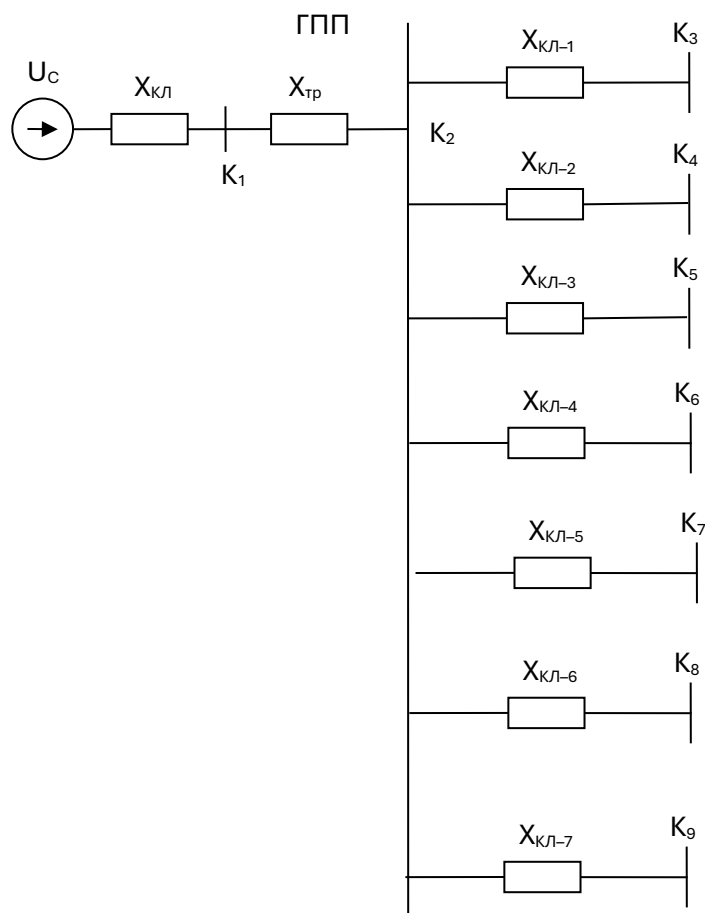


Рисунок 6.2 - Схема заміщення ГПП для розрахунку струмів к. з.

Опір трансформатора ГПП ТДН-6300/35, приведений до сторони 10 кВ:

$$X_{тр} = U_k \cdot U^2 / (100 \cdot S_{тр}) = 7,5 \cdot 10^2 / (100 \cdot 6,3) = 1,19 \text{ Ом}$$

Сумарний опір до шин 10 кВ ГПП:

$$X_{\Sigma 10} = X_{\Sigma 35} \cdot (10 / 35)^2 + X_{тр} = 4,68 \cdot (10 / 35)^2 + 1,19 = 1,57 \text{ Ом}$$

Струм короткого замкнення на шинах 10 кВ:

$$I_{к2} = 10 / (1,732 \cdot 1,57) = 3,67 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці K2:

$$i_{уд2} = 1,414 \cdot 1,45 \cdot 3,67 = 7,53 \text{ кА}$$

Для ліній, що відходять до цехових ТП, до сумарного опору шин 10 кВ додається опір відповідної кабельної лінії. Результати розрахунку наведені в таблиці 6.2.

						Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.2 – Розрахунок опорів і струмів кЗ

№ точки КЗ	Місце КЗ	X_{Σ} , Ом	I_k , кА	K_y	$i_{уд}$, кА	Довжина КЛ, км	Прийнятий кабель
K1	Шини 35 кВ ГПП	4,68	4,31	1,45	8,85	7,5	АПвЕгаПу-35 3×120/35
K2	Шини 10 кВ ГПП	1,57	3,67	1,45	7,53	-	-
K3	Ввід ТП-1	1,60	3,61	1,45	7,40	0,30	ААШв 3×35
K4	Ввід ТП-2	1,58	3,66	1,45	7,51	0,04	ААШв 3×35
K5	Ввід ТП-3	1,59	3,63	1,45	7,45	0,19	ААШв 3×35
K6	Ввід ТП-4	1,58	3,65	1,45	7,48	0,12	ААШв 3×50

6.2 Вибір кабельних ліній 10 кВ

Переріз кабелю визначається за економічною густиною струму та перевіряється за допустимим тривалим струмом і термічною стійкістю при короткому замкненні.

$$F_{ек} = I_p / j_{ек}, F_{min} = I_k \cdot \sqrt{t} / C$$

В якості прикладу виконаємо вибір кабелю до ТП-1:

$$I_p = S_p / (\sqrt{3} \cdot U) = 921 / (1,732 \cdot 10) = 53,2 \text{ А}$$

$$F_{ек} = I_p / j_{ек} = 53,2 / 1,1 = 48,3 \text{ мм}^2$$

Приймаємо найближчий стандартний переріз з урахуванням допустимого струму та термічної стійкості: кабель ААШв 3×35 мм².

$$F_{min} = I_k \cdot \sqrt{t} / C = 3,61 \cdot 1000 \cdot \sqrt{0,5} / 92 = 27,7 \text{ мм}^2$$

Оскільки прийнятий переріз 35 мм² перевищує мінімально допустимий за термічною стійкістю, кабель відповідає умовам роботи при КЗ.

Таблиця 6.3 – Перевірка кабелів

Лінія	S_p , кВА	I_p , А	$F_{ек}$, мм ²	Прийнятий кабель	$I_{доп}$, А	Перевірка за нагрівом	F_{min} , мм ²	Висновок
ГПП-ТП-1	921,0	53,2	48,3	ААШв 3×35	80	$53,2 \leq 80$	27,7	придатний
ГПП-ТП-2	723,8	41,8	38,0	ААШв 3×35	80	$41,8 \leq 80$	28,1	придатний
ГПП-ТП-3	689,5	39,8	36,2	ААШв 3×35	80	$39,8 \leq 80$	27,9	придатний
ГПП-ТП-4	1113,6	64,3	58,4	ААШв 3×50	105	$64,3 \leq 105$	28,0	придатний

Для живлення дугової сталеплавильної печі (ДСП), тиристорного перетворювача частоти ТПЧ-800 та електроприводу ДЧМ-10 прийняті окремі кабельні лінії напругою 10 кВ. Вибір перерізу кабелів виконано за економічною густиною струму, умовами нагріву та термічної стійкості при коротких замиканнях.

Таблиця 6.4 – Вибір кабелів для високовольних споживачів

Споживач	Потужність	Розрахунковий струм	Прийнятий кабель
ДЧМ-10	1800 кВА	104 А	АПвЕгаПу-10 3×70
ТПЧ-800	800 кВА	46 А	АПвЕгаПу-10 3×35
ДСП	1000 кВА	58 А	АПвЕгаПу-10 3×50

6.3 Вибір високовольних вимикачів

Вимикачі вибираються за номінальною напругою, тривалим робочим струмом, здатністю вимикати симетричну складову струму КЗ, стійкістю до ударного струму та термічним імпульсом. $U_{ном} \geq U_y$; $I_{ном} \geq I_p$; $I_{відкл} \geq I_k$; $i_{вкл} \geq i_{уд}$

Таблиця 6.4 – Вибір вимикачів

Місце встановлення	U мережі	I_p	I_k	$i_{уд}$	Тип вимикача	$U_{ном}$	$I_{ном} / I_{відкл} / i_{вкл}$
Ввід 35 кВ	35 кВ	155,5 А	4,31 кА	8,85 кА	BP35HC-35-20/630	35 кВ	630 А; 20 кА; 52 кА
Ввід 10 кВ	10 кВ	544,3 А	3,67 кА	7,53 кА	BB/TEL-10-20/630	10 кВ	630 А; 20 кА; 52 кА
Секційний вимикач 10 кВ	10 кВ	272,2 А	3,67 кА	7,53 кА	BB/TEL-10-20/630	10 кВ	630 А; 20 кА; 52 кА
Відхідні лінії до ТП	10 кВ	до 64,3 А	до 3,66 кА	до 7,51 кА	BB/TEL-10-20/630	10 кВ	630 А; 20 кА; 52 кА

6.4 Вибір розрядників та трансформатора власних потреб

Для захисту електрообладнання від атмосферних та комутаційних перенапруг приймаємо обмежувачі перенапруг: для сторони 35 кВ - ОПН-35 УХЛ1, для сторони 10 кВ - ОПН-10 УХЛ1.

Навантаження власних потреб приймається за освітленням, вентиляцією, обігрівом кімнат КРП та оперативними колами. Для живлення власних потреб приймаємо трансформатор ТМ-25/10 потужністю 25 кВА.

$$K_3 = S_{\text{вп}} / S_{\text{ном}} = 19 / 25 = 0,76$$

За результатами розрахунку найбільший струм короткого замкнення на стороні 35 кВ становить 4,31 кА, а на стороні 10 кВ - 3,67 кА. Прийняті вакуумні вимикачі з номінальним струмом відключення 20 кА мають достатній запас за вимикальною, електродинамічною та термічною стійкістю. Обрані кабельні лінії 10 кВ відповідають вимогам допустимого нагріву та термічної стійкості при короткому замкненні.

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ШЛЯХОМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Робота дугових електропечей базується на перетворенні електричної енергії в теплову в зоні горіння електричної дуги. Такі установки належать до категорії найбільш енергоємних промислових споживачів, оскільки потужність окремих агрегатів може сягати 100 МВт. Через значне навантаження на систему електропостачання дугові печі потребують детального дослідження режимів роботи та показників електроспоживання.

Більшість дугових сталеплавильних печей мають трифазне виконання та обладнані трьома графітовими електродами. Живлення установки здійснюється через спеціальний понижувальний трансформатор, розташований поблизу печі. Робочі струми в колі печі можуть досягати десятків тисяч ампер, тому параметри короткої мережі суттєво впливають на коефіцієнт потужності та ефективність роботи установки. Загальну будову дугової печі наведено на рис. 7.1.

Зміна споживання потужності та напруги під час плавки має нерівномірний характер, що показано на рис. 7.2.

Після подачі шихти в робочий простір печі склепіння повертають у робоче положення, герметизуючи верхню частину агрегату. Далі на графітові електроди подається напруга. Під час контакту електродів із металевою шихтою виникає коротке замикання, після чого система автоматичного регулювання піднімає електроди на задану висоту. У результаті між електродами та металом утворюються електричні дуги, які забезпечують плавлення металу. На початковій стадії процесу піч працює з найбільшим рівнем електроспоживання.

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

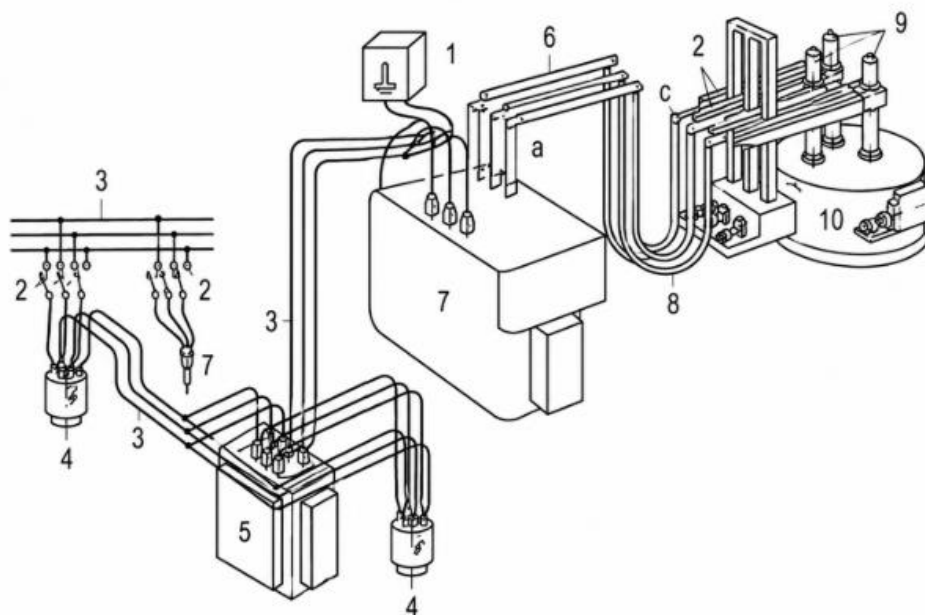


Рисунок 7.1 - Схема дугової сталеплавильної печі

1 - кабельне введення; 2 - роз'єднувач; 3 - шини високої напруги; 4 - високовольтний вимикач; 5 - реактор; 6 - вимикач шунтування реактора; 7 - пічний трансформатор; 8 - коротка мережа: а - компенсуючі пристрої; б - шинний пакет; в - гнучкі кабелі; г - трубчасті шини печі; д - електродотримачі; е - контактні вузли; 9 - графітові електроди; 10 - корпус печі.

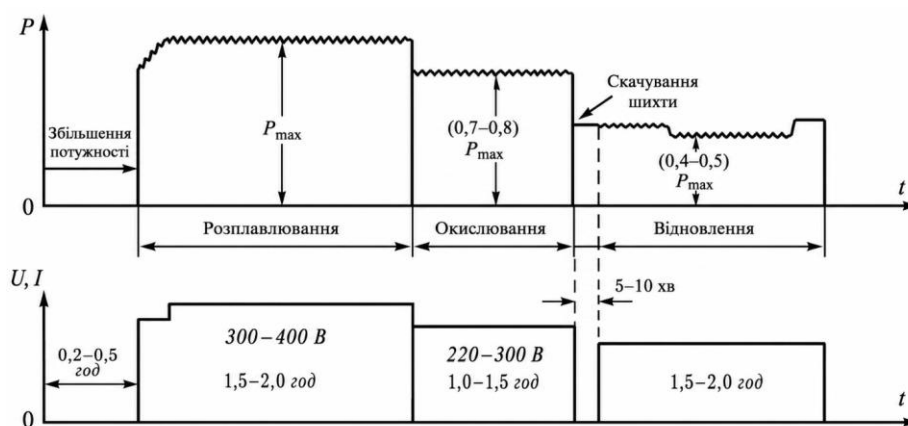


Рисунок 7.2 - Технічна діаграма процесу плавки з потужністю та напругою ДСП

В процесі плавлення в дугових сталеплавильних печах часто виникають короточасні аварійні режими, пов'язані з осіданням та переміщенням шихти,

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

а також із багаторазовим повторним запалюванням електричних дуг. Кількість таких режимів протягом однієї плавки може становити від кількох десятків до сотень випадків. Найпоширенішими є однофазні короткі замикання за наявності дуг в інших фазах.

Електрообладнання електропічних установок поділяють на силову частину, системи керування, контрольно-вимірювальні прилади та допоміжне обладнання. До силового обладнання належать пічні трансформатори, автотрансформатори, електроприводи механізмів, комутаційна апаратура та захисні пристрої. Для автоматизації процесу плавлення використовують спеціальні системи керування, а контроль технологічних параметрів здійснюється за допомогою вимірювальних та пірометричних приладів.

Застосування понижувальних трансформаторів у системах живлення електропечей дає можливість збільшити робочі струми та використовувати провідники більшого перерізу. Це сприяє підвищенню надійності нагрівальних елементів і покращує умови роботи обладнання. Більшість сучасних промислових електропечей функціонує в автоматичному режимі регулювання температури, що дозволяє узгоджувати споживану потужність із необхідним тепловим режимом і зменшувати питому витрату електроенергії.

Електрична дуга є нелінійним навантаженням, тому робота дугових печей супроводжується появою гармонічних складових струму та напруги. Вищі гармоніки негативно впливають на елементи системи електропостачання, особливо на конденсаторні батареї, викликаючи їх перегрівання та прискорене старіння.

Для зменшення впливу дугових печей на інших споживачів електроенергії такі установки рекомендується підключати до потужних енергосистем. Потужність печі зазвичай не повинна перевищувати 40 % потужності живильної підстанції. У разі використання менш потужних підстанцій це співвідношення обмежують приблизно 25 %. Одним із ефективних рішень є виділення пічних підстанцій на окреме живлення з підключенням до мереж 110 або 220 кВ. Такий підхід дозволяє підтримувати

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

допустимі показники якості електроенергії для інших споживачів. Для додаткового зниження рівня гармонічних спотворень застосовують фільтри вищих гармонік.

Дугові сталеплавильні печі допускають короточасні перерви електроживлення, однак тривалі відключення без випуску металу можуть призвести до пошкодження футеровки та виходу агрегату з експлуатації. На великих металургійних підприємствах такі печі зазвичай працюють у безперервному тризмінному режимі. За потреби електропечі можуть використовуватися як регульоване навантаження для вирівнювання добового графіка споживання електроенергії.

Окрема піч створює нерівномірний графік навантаження через періодичні зупинки, пов'язані із завантаженням шихти, випуском металу та видаленням шлаку. При одночасній роботі декількох печей загальний графік електроспоживання стає більш стабільним.

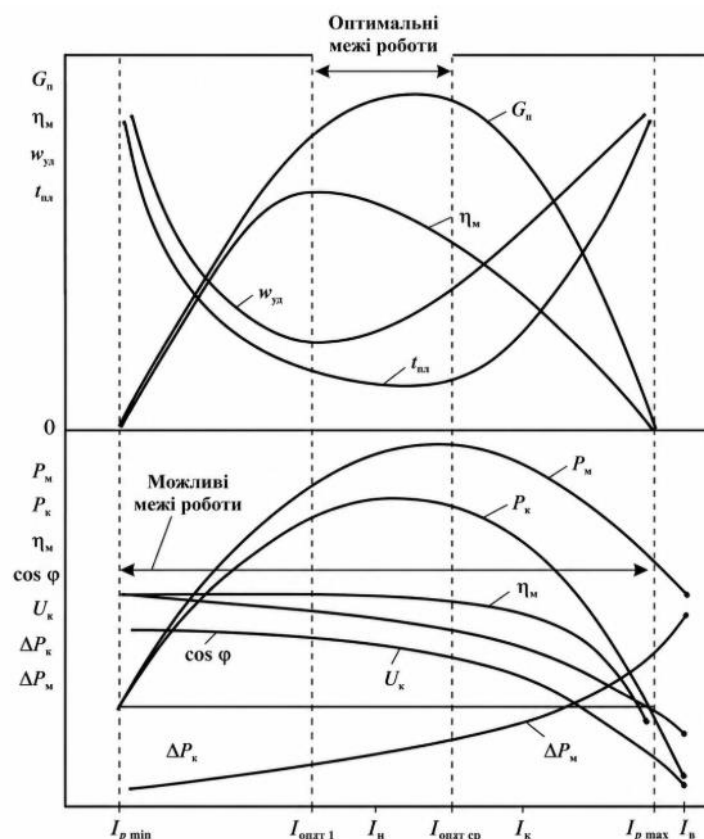


Рисунок 7.3 – Зображення робочих та електричних характеристик дугової печі

Коефіцієнт потужності дугових сталеплавильних печей зазвичай перебуває в межах 0,87–0,9. Живлення пічних підстанцій здійснюється від головних понижувальних підстанцій на напругах 6–35 кВ із подальшим перетворенням від мереж 110 або 220 кВ.

Питома витрата електроенергії при виплавленні сталі залежить як від електричного режиму печі, так і від технологічних умов роботи. Важливе значення мають параметри струму дуги, вибір ступеня напруги трансформатора, склад і якість шихти, стан футеровки та електродів, а також кваліфікація обслуговуючого персоналу. Найбільший вплив на енергоефективність має правильний вибір режиму роботи печі, який визначається співвідношенням між продуктивністю агрегату та питомою витратою електроенергії.

До основних заходів зниження витрат електроенергії в дугових сталеплавильних печах належать:

1. Підтримання печі, пічного трансформатора та автоматичного регулятора режиму роботи у справному технічному стані, а також своєчасне виконання планово-попереджувальних ремонтів;
2. Правильний вибір електричного режиму плавлення, зокрема раціональне встановлення ступенів напруги трансформатора та струму дуги;
3. Скорочення непродуктивних простоїв печі та мінімізація часу роботи з відкритим склепінням під час завантаження шихти;
4. Оптимальне укладання металобрухту в завантажувальний кошик і правильний підбір шихтових матеріалів за складом та розмірами;
5. Періодичний контроль стану контактних з'єднань за допомогою інфрачервоних термометрів або тепловізорів для своєчасного виявлення перегрівів;
6. Застосування якісних футерувальних матеріалів і графітових електродів, що дозволяє зменшити теплові втрати та підвищити надійність роботи печі;

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

7. Підвищення коефіцієнта потужності та покращення якості електроенергії шляхом використання конденсаторних батарей і фільтрів вищих гармонік.

7.1 Втрати електроенергії, зумовлені роботою дугової сталеплавильної печі

Дугова сталеплавильна піч є потужним електротермічним споживачем із різкозмінним та нелінійним характером навантаження. Під час її роботи в системі електропостачання виникають значні активні та реактивні струми, коливання напруги, вищі гармоніки, а також додаткові втрати в трансформаторах, кабельних лініях, електродах і струмопровідних елементах. Тому ДСП суттєво впливає не лише на власне електроспоживання, а й на енергетичні показники всієї мережі підприємства.

1. Втрати активної потужності в елементах мережі

Основні електричні втрати в мережі, яка живить ДСП, виникають у кабелях, шинопроводах, обмотках трансформаторів та контактних з'єднаннях. Вони визначаються законом Джоуля–Ленца:

$$\Delta P = I^2 R$$

де ΔP - втрати активної потужності, Вт; I - струм навантаження, А; R - активний опір ділянки мережі, Ом.

Для трифазної мережі втрати можна записати так:

$$\Delta P_{\text{л}} = 3I^2 R_{\text{л}}$$

де $\Delta P_{\text{л}}$ - втрати в лінії живлення; $R_{\text{л}}$ - активний опір однієї фази лінії.

Оскільки дугова піч працює з дуже великими струмами, навіть невелике збільшення струму призводить до різкого зростання втрат. Наприклад, якщо струм збільшується у 2 рази, втрати зростають у 4 рази:

$$\Delta P \sim I^2$$

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Саме тому електродугові печі є небезпечними з точки зору перевантаження мережі та додаткового нагрівання електрообладнання.

2. Втрати в пічному трансформаторі

Для живлення ДСП застосовують спеціальні пічні трансформатори, які працюють у важких режимах: з великими струмами, частими короткочасними перевантаженнями та різкими змінами навантаження.

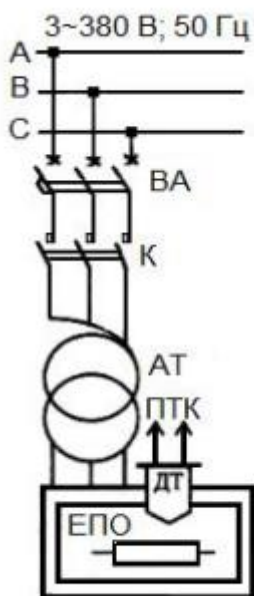


Рисунок 7.4 – Схема підключення ЕПО з пічним автотрансформатором: ДТ – датчик температури мережі; АД – двигун реверсивний для підйому й опускання дверей; ЕМГ – електромагнітне гальмо

Загальні втрати в трансформаторі складаються з втрат холостого ходу та навантажувальних втрат:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_0 + \Delta P_{\text{к}}$$

де $\Delta P_{\text{тр}}$ - сумарні втрати трансформатора; ΔP_0 - втрати холостого ходу; $\Delta P_{\text{к}}$ - втрати короткого замикання, або навантажувальні втрати.

Втрати холостого ходу майже не залежать від навантаження і виникають у магнітопроводі трансформатора:

$$\Delta P_0 \approx \text{const}$$

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

Навантажувальні втрати залежать від струму:

$$\Delta P_k = 3I^2 R_{обм}$$

де $R_{обм}$ - активний опір обмотки трансформатора.

Якщо трансформатор працює не з номінальним, а з фактичним навантаженням, навантажувальні втрати можна визначити через коефіцієнт завантаження:

$$\Delta P_{к.ф} = \Delta P_{к.н} \cdot K_z^2$$

де $\Delta P_{к.ф}$ - фактичні навантажувальні втрати; $\Delta P_{к.н}$ - втрати короткого замикання при номінальному навантаженні; K_z - коефіцієнт завантаження трансформатора.

Коефіцієнт завантаження визначається так:

$$K_z = \frac{S_{ф}}{S_{н}}$$

де $S_{ф}$ - фактична повна потужність навантаження; $S_{н}$ - номінальна потужність трансформатора.

Для ДСП цей показник може суттєво змінюватися протягом плавки, тому втрати в трансформаторі також мають нерівномірний характер.

3. Втрати через реактивну потужність

Дугова піч споживає не тільки активну, а й значну реактивну потужність. Це пов'язано з наявністю пічного трансформатора, короткої мережі, електродів і самої електричної дуги.

Повна потужність печі визначається як:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

де S - повна потужність, кВА; P - активна потужність, кВт; Q - реактивна потужність, квар.

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

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

Чим нижчий $\cos\varphi$, тим більший струм споживає установка при тій самій активній потужності. Струм трифазного навантаження визначається за формулою:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

де U - лінійна напруга мережі.

З цієї формули видно, що при зменшенні $\cos\varphi$ струм зростає. А оскільки втрати залежать від квадрата струму, то низький коефіцієнт потужності збільшує втрати в кабелях і трансформаторах.

Для компенсації реактивної потужності застосовують конденсаторні установки або фільтрокомпенсуючі пристрої. Необхідна потужність компенсації визначається так:

$$Q_k = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

де Q_k - потужність компенсуючої установки; φ_1 - кут зсуву фаз до компенсації; φ_2 - кут зсуву фаз після компенсації.

Після підвищення коефіцієнта потужності струм у мережі зменшується, а отже, знижуються втрати:

$$\Delta P_{\text{після}} < \Delta P_{\text{до}}$$

4. Втрати від вищих гармонік

ДСП є нелінійним навантаженням. Електрична дуга має нестабільний опір, тому струм печі відрізняється від синусоїдальної форми. У мережі з'являються вищі гармоніки: 3-тя, 5-та, 7-ма, 11-та, 13-та та інші.

Загальне діюче значення струму з урахуванням гармонік визначається так:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

де I_1 - основна гармоніка струму;

$I_2, I_3, \dots, I_n$ - струми вищих гармонік.

Коефіцієнт гармонічних спотворень струму:

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

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

Наявність гармонік збільшує діюче значення струму, а отже, збільшує втрати:

$$\Delta P_{\text{гарм}} = R(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)$$

або:

$$\Delta P_{\text{гарм}} = \Delta P_1(1 + THD_I^2)$$

де ΔP_1 - втрати від основної гармоніки.

Таким чином, чим більший рівень гармонічних спотворень, тим вищі додаткові втрати в мережі. Крім того, гармоніки викликають перегрів трансформаторів, кабелів, електродотримачів, конденсаторних установок і можуть спричиняти резонансні явища.

Зростання втрат супроводжується додатковим нагріванням обмоток електричних машин і трансформаторів, що погіршує тепловий режим роботи обладнання та скорочує термін служби ізоляції.

7.2 Вплив вищих гармонік електродугових печей на систему електропостачання підприємства та методи їх зменшення

Основною причиною виникнення гармонік у дугових печах є нелінійний характер електричної дуги. Під час плавлення металу довжина дуги постійно змінюється, що викликає нестабільність електричних параметрів печі. У результаті форма струму стає несинусоїдальною, а в мережі виникають гармонічні складові різних порядків. Найбільш характерними для дугових печей є 3-тя, 5-та, 7-ма, 11-та та 13-та гармоніки.

Наявність вищих гармонік призводить до погіршення показників якості електроенергії. У системі електропостачання виникають додаткові втрати активної потужності, що обумовлено збільшенням діючого значення струму. Активні втрати в елементах мережі визначаються виразом:

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

$$\Delta P = I^2 R$$

Зі збільшенням гармонічних складових струму зростає нагрівання кабельних ліній, шинопроводів та обмоток трансформаторів. Це знижує енергоефективність системи електропостачання та скорочує термін служби обладнання.

Особливо значний вплив гармоніки здійснюють на пічний трансформатор. Через високі струми та їх несинусоїдальність у трансформаторах виникають додаткові втрати від вихрових струмів та перегрів обмоток. Крім того, гармоніки можуть викликати перевантаження конденсаторних установок компенсації реактивної потужності, що підвищує ймовірність аварійних режимів роботи.

Для асинхронних електродвигунів робота в умовах несинусоїдальної напруги призводить до погіршення енергетичних характеристик. Гармонічні складові струму створюють додаткові електромагнітні моменти, які знижують коефіцієнт потужності та викликають коливання обертового моменту на валу двигуна.

Особливо помітний вплив мають гармоніки 5-го та 7-го порядків. Для асинхронних двигунів середньої потужності навіть при відносно невеликому рівні гармонічних спотворень може спостерігатися помітне зниження коефіцієнта потужності порівняно з режимом синусоїдального живлення.

Погіршення якості електроенергії негативно впливає також на роботу **пристроїв релейного захисту та автоматики**. Гармонічні спотворення можуть спричиняти помилкове спрацювання релейного захисту, порушення роботи вимірювальних кіл та зниження точності електронних систем керування.

Для мікропроцесорних пристроїв автоматики небезпечними є:

- високочастотні перешкоди;
- електромагнітні наведення;
- спотворення форми напруги;
- короткочасні імпульсні перенапруження.

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

У системах телемеханіки та промислового зв'язку гармоніки можуть створювати електромагнітні завади, які погіршують передачу інформації та знижують надійність роботи каналів зв'язку.

Особливо актуальною проблема гармонічних спотворень є для промислових підприємств із потужними нелінійними навантаженнями, зокрема дуговими сталеплавильними печами, тиристорними перетворювачами та потужними електроприводами.

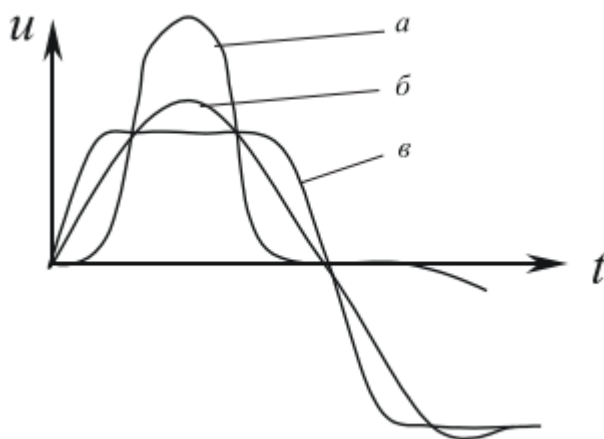


Рисунок 7.5 - Порівняння форм кривих напруги при різному рівні гармонічних спотворень.

На рисунку 7.5 крива «а» відповідає загостреній формі напруги, крива «б» - синусоїдальній, а крива «в» - сплюсненій формі.

Наявність вищих гармонік змінює форму синусоїдальної напруги та призводить до появи локальних максимумів і спотворень. При цьому діюче значення напруги може залишатися однаковим, однак характер розподілу електричного поля в ізоляції суттєво змінюється.

Дослідження показують, що навіть при однаковому діючому значенні напруги загострена форма кривої створює більш несприятливі умови для роботи **ізоляції**, ніж синусоїдальна або сплюснена. Унаслідок цього прискорюються процеси старіння ізоляційних матеріалів електричних машин, трансформаторів та кабельних ліній.

Особливо помітно вплив гармонік проявляється в **ізоляції силових трансформаторів і високовольтних електричних машин**, де під дією високочастотних складових збільшуються діелектричні втрати:

$$P_d = \omega C U^2 \tan \delta$$

де P_d - потужність діелектричних втрат; ω - кутова частота; C - ємність ізоляції; U - прикладена напруга; $\tan \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат.

Тривала робота електрообладнання в умовах несинусоїдальної напруги суттєво прискорює процес старіння ізоляції та знижує надійність системи електропостачання. Особливо чутливими до впливу вищих гармонік є конденсаторні установки та силові кабелі.

При експлуатації **конденсаторних батарей** у мережах із гармонічними спотвореннями значно зростає ймовірність виникнення резонансних режимів. У таких умовах через конденсатори проходять струми підвищеної частоти, що викликає їх систематичне перевантаження та додаткове тепловиділення.

Струм конденсатора визначається виразом:

$$I_C = \omega C U$$

Тому зі збільшенням частоти гармоніки струм через конденсатор зростає пропорційно частоті. Це призводить до:

- збільшення теплових втрат;
- перегрівання конденсаторів;
- зниження ресурсу ізоляції;
- підвищення ризику пробою.

У промислових мережах конденсаторні батареї часто працюють у режимах, близьких до резонансних, особливо на частотах 5-ї та 7-ї гармонік. Через тривалі перевантаження конденсатори швидко деградують і можуть виходити з ладу.

Несинусоїдальна форма напруги також негативно впливає на **силові кабелі**. Оскільки гармоніки збільшують діюче значення струму, загальні втрати в кабелях також зростають. Крім того, при високих частотах суттєво

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

проявляється поверхневий ефект, унаслідок якого струм нерівномірно розподіляється по перерізу провідника. Це призводить до збільшення активного опору кабелю та додаткового нагрівання.

Втрати потужності **в кабельних лініях** визначаються за виразом:

$$\Delta P = I^2 R$$

Практичні дослідження показують, що робота кабельних ліній у мережах із високим рівнем гармонік значно прискорює старіння ізоляції. Особливо небезпечними є гармоніки 5-го та 7-го порядків, які найчастіше присутні в промислових мережах із нелінійними навантаженнями.

Наявність гармонічних складових струму та напруги суттєво впливає на **точність обліку електроенергії**.

Для нелінійних навантажень потужність, яка споживається з урахуванням впливу гармонік, визначається за виразом:

$$P_{\text{нл}} = P_1 - \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n (1 + \gamma_n)$$

де $P_{\text{нл}}$ - потужність нелінійного навантаження; P_1 - потужність основної гармоніки; ΔP_n - потужність на частоті n -ї гармоніки; γ_n - частотна похибка лічильника на частоті гармоніки n -го порядку.

Із наведеної залежності видно, що при наявності гармонічних складових результат вимірювання залежить не лише від потужності гармонік, а й від частотної характеристики приладу обліку.

Для підвищення точності обліку в сучасних системах електропостачання використовують електронні багатофункціональні лічильники, які мають покращені частотні характеристики та здатні працювати в умовах значної несинусоїдальності напруги й струму. Також застосовуються системи моніторингу якості електроенергії, що дозволяють контролювати рівень гармонічних спотворень у режимі реального часу.

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

7.3 Додаткові втрати в електричних машинах і трансформаторах

Під час роботи асинхронних і синхронних електродвигунів у мережах із несинусоїдальною напругою виникають додаткові втрати електричної енергії. Основною причиною цього є наявність вищих гармонік струму, які створюють додаткові втрати в обмотках машин, у магнітопроводі, у сталевих елементах статора і ротора, від вихрових струмів.

Додаткові втрати потужності, викликані гармоніками, оцінюються відносно номінальних втрат двигуна. Для цього використовують коефіцієнти, які враховують порядок гармоніки та особливості конструкції електричної машини.

Сумарні втрати потужності від дії гармонік визначаються як:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n$$

де ΔP_n - втрати потужності від гармоніки n-го порядку.

Додаткові втрати в обмотках виникають через збільшення діючого значення струму:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

де I_1 - струм основної гармоніки; I_2, I_3, I_n - струми вищих гармонік.

Оскільки активні втрати пропорційні квадрату струму, їх величина визначається виразом:

$$\Delta P = I^2 R$$

Таким чином, навіть порівняно невеликий рівень гармонічних спотворень може викликати суттєве збільшення втрат та нагрівання електричних машин.

У трансформаторах вищі гармоніки також створюють додаткові втрати в обмотках та магнітопроводі. Гармонічні струми викликають посилення вихрових струмів, локальний перегрів сталі, зростання втрат короткого замикання, додаткове нагрівання ізоляції.

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

Загальні втрати трансформатора можна записати у вигляді:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_0 + \Delta P_{\text{мід}} + \Delta P_{\text{гарм}}$$

де ΔP_0 - втрати холостого ходу; $\Delta P_{\text{мід}}$ - втрати в обмотках; $\Delta P_{\text{гарм}}$ - додаткові втрати від гармонік.

Аналіз експериментальних характеристик показує, що найбільший вплив на величину втрат мають гармоніки нижчих порядків - переважно друга та третя. Саме вони створюють найбільш інтенсивні додаткові струми в елементах машини та викликають підвищене нагрівання обмоток і магнітопроводу.

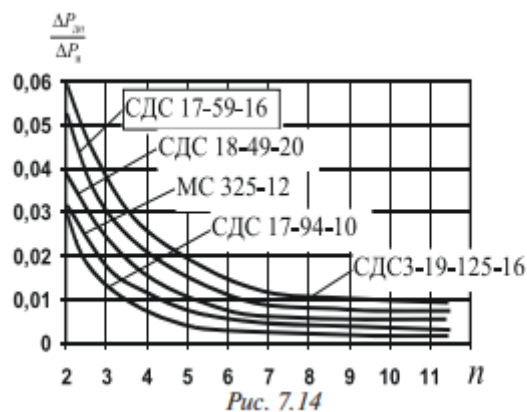


Рисунок 7.6 - Залежність відносних додаткових втрат від порядку гармоніки

Із наведеної залежності видно, що втрати потужності прямо залежать від квадрата відносної величини гармонічної складової напруги. Тому навіть незначне збільшення амплітуди нижчих гармонік може призводити до помітного зростання додаткових втрат у двигунах і трансформаторах.

Сумарні додаткові втрати потужності, спричинені дією всіх гармонік напруги, визначаються за виразом:

$$\Delta P_{\Sigma n} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2$$

де $\Delta P_{\Sigma n}$ - сумарні втрати потужності від вищих гармонік; ΔP_n - питомі втрати для гармоніки n-го порядку; U_n - напруга гармоніки n-го порядку; U_1 - напруга основної гармоніки.

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

Результати досліджень показують, що навіть при відносно невеликих гармонічних спотвореннях напруги рівень додаткових втрат у електричних машинах може бути досить значним. При коефіцієнті несинусоїдальності напруги в межах 10–15 % додаткові втрати у синхронних двигунах зі шихтованими статором і ротором можуть перевищувати кілька відсотків від номінальних втрат машини.

Особливо небезпечним є перегрів потужних синхронних двигунів високої напруги. У двигунах потужністю понад 1000 кВт додаткові втрати можуть становити приблизно 0,25–0,4 % номінальної активної потужності. Це призводить до підвищення температури обмоток, прискореного старіння ізоляції та зниження ресурсу обладнання.

Для **синхронних машин із масивними полюсами** вплив гармонічних складових є ще більш суттєвим. Робота таких двигунів у режимах несинусоїдальної напруги може викликати неприпустиме нагрівання елементів ротора та пошкодження обмотки збудження. Аналогічні проблеми виникають і в синхронних компенсаторах, які працюють у мережах із високим рівнем гармонічних спотворень. Саме тому для таких машин рекомендується застосування шихтованих полюсів або використання додаткових заходів зниження гармонік.

Додаткові втрати в асинхронних двигунах, спричинені гармонічними складовими струму, визначаються за формулою:

$$\Delta P_n = 3I_n^2(r'_{1n} + r'_{2n})$$

де ΔP_n - додаткові втрати потужності від гармоніки n-го порядку;

I_n - струм гармоніки n-го порядку;

r'_{1n} - приведений активний опір статора на частоті n-ї гармоніки;

r'_{2n} - приведений активний опір ротора на частоті n-ї гармоніки.

При збільшенні частоти гармонічних складових у провідниках статора та ротора суттєво проявляється поверхневий ефект, унаслідок якого струм

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

нерівномірно розподіляється по перерізу провідника. Через це активний опір провідників зростає.

Залежність активного опору від порядку гармоніки можна подати у вигляді:

$$r'_{1n} = r'_1 \sqrt{n}$$

$$r'_{2n} = r'_2 \sqrt{n}$$

де

r'_1 та r'_2 - активні опори статора та ротора для основної гармоніки.

Із наведених співвідношень видно, що зі збільшенням порядку гармоніки активний опір провідників зростає пропорційно $\sqrt{n}$. Це призводить до збільшення теплових втрат і додаткового нагрівання електричної машини.

Для асинхронних двигунів високої напруги в інженерних розрахунках часто приймають, що активні опори статора та ротора є приблизно однаковими

$$r'_1 \approx r'_2$$

Під час аналізу впливу гармонічних складових струму на роботу електродвигуна струм гармоніки n -го порядку виражають через номінальний струм машини та кратність гармонічної складової. У такому випадку сумарні додаткові втрати потужності від вищих гармонік можуть бути визначені за формулою:

$$\Delta P_{\Sigma n} = I_1^2 r'_1 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1})$$

або у спрощеному вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma n} = I_1^2 \sum_{n=2}^{\infty} k_n$$

де $\Delta P_{\Sigma n}$ - сумарні додаткові втрати потужності від вищих гармонік; I_1 - струм основної гармоніки; U_n - напруга гармоніки n -го порядку; U_1 - напруга основної гармоніки; k_n - коефіцієнт, який враховує збільшення втрат у провідниках унаслідок дії гармонік.

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

Коефіцієнт k_n враховує додаткове зростання втрат у міді обмоток, пов'язане з поверхневим ефектом та підвищенням активного опору провідників при високих частотах.

Аналіз залежності відносних втрат від порядку гармоніки показує, що найбільший вплив мають гармоніки нижчих порядків. При збільшенні порядку гармоніки величина додаткових втрат поступово зменшується.

На рисунку 7.7 наведено графік залежності коефіцієнта додаткових втрат k_n від порядку гармоніки n .

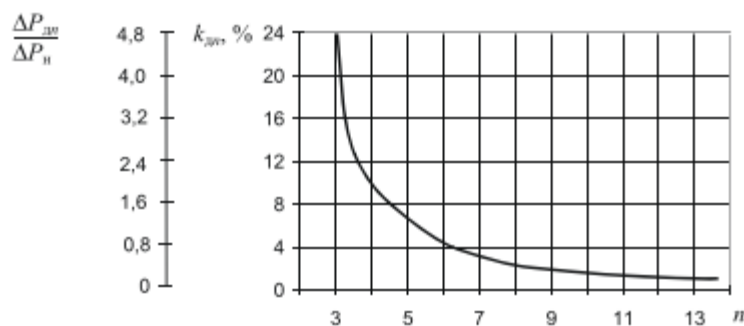


Рисунок 7.7 - Графік залежності коефіцієнта додаткових втрат k_n від порядку гармоніки n .

Із графіка видно, що:

- найбільші додаткові втрати створюють гармоніки 3-го та 5-го порядків;
- зі збільшенням номера гармоніки коефіцієнт k_n швидко зменшується;
- гармоніки вище 11–13 порядку мають значно менший вплив на нагрівання електричних машин.

Це пояснюється тим, що гармоніки нижчих порядків мають більшу амплітуду та створюють значні додаткові струми в обмотках двигуна.

В асинхронному електроприводі за високих частот індуктивні опори значно перевищують активні. Тому для аналізу впливу вищих гармонік можна використовувати спрощену схему заміщення асинхронного двигуна.

Струм гармонічної складової в обмотках асинхронного двигуна можна наближено визначити за виразом:

$$I_n \approx \frac{U_n}{n(x_1 + x_2')}$$

де I_n - струм гармоніки n -го порядку;

U_n - напруга відповідної гармоніки;

x_1 - індуктивний опір статора;

x_2' - приведений індуктивний опір ротора;

n - порядок гармоніки.

Отже, струм вищої гармоніки залежить переважно від індуктивного опору короткого замикання двигуна:

$$x_k = x_1 + x_2'$$

Зі збільшенням порядку гармоніки еквівалентний індуктивний опір зростає пропорційно n , тому струми гармонік вищих порядків зменшуються.

На рисунку показано спрощену схему заміщення асинхронного двигуна для n -ї гармоніки. У схемі враховано індуктивні опори статора nx_1 та ротора nx_2' , які зростають зі збільшенням частоти гармоніки. Активні опори в даному випадку не враховуються, оскільки при високих частотах їх вплив значно менший порівняно з індуктивними складовими.

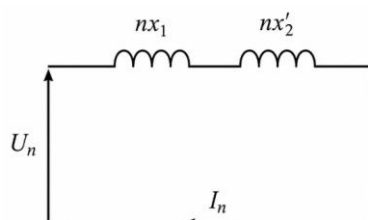


Рисунок 7.8 – Схема заміщення асинхронного двигуна для n -ї гармоніки

Особливо помітний вплив гармонік спостерігається у системах із **тиристорними перетворювачами** та потужними нелінійними навантаженнями, зокрема в електроприводах допоміжного обладнання дугових сталеплавильних печей.

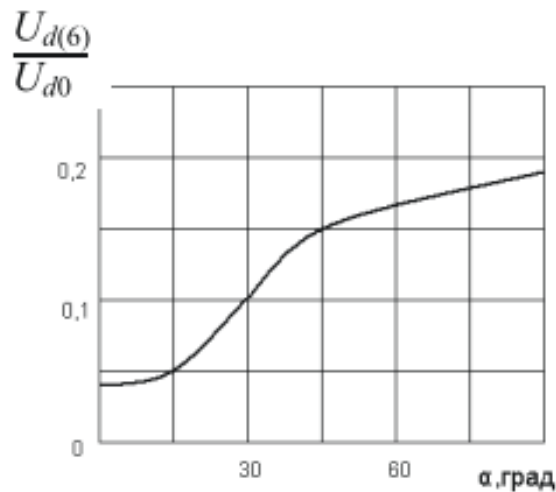


Рисунок 7.9 – Залежність відносної амплітуди шостої гармоніки випрямленої напруги від кута керування тиристорного перетворювача α .

На рисунку 7.9 по осі ординат відкладено відношення

$$\frac{U_{d(6)}}{U_{d0}}$$

де $U_{d(6)}$ - амплітуда шостої гармоніки випрямленої напруги; U_{d0} - середнє значення випрямленої напруги.

Із графіка видно, що зі збільшенням кута керування α рівень гармонічних складових напруги зростає. Найбільш інтенсивне збільшення спостерігається в області середніх значень кута керування. Це пояснюється погіршенням форми випрямленої напруги при збільшенні затримки відкривання тиристорів.

Для зменшення впливу гармонік у сучасних системах електропривода застосовують імпульсні перетворювачі. У тиристорних системах частота комутації зазвичай становить 0,4–1 кГц, тоді як у транзисторних перетворювачах вона може перевищувати 10 кГц.

Активні втрати потужності від гармонічних складових струму в **трансформаторах** визначаються за виразом:

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 r_k k_n$$

де $\Delta P_{\Sigma n}$ - сумарні додаткові втрати потужності; I_n - струм гармоніки n -го порядку; r_k - активний опір короткого замикання трансформатора; k_n - коефіцієнт, який враховує збільшення втрат від поверхневого ефекту та ефекту близькості.

Для силових трансформаторів коефіцієнт k_n зростає зі збільшенням порядку гармоніки, оскільки при високих частотах посилюються вихрові струми, поверхневий ефект, локальні перегріви провідників.

Для зменшення негативного впливу гармонік у сучасних системах електропостачання застосовують активні та пасивні фільтри гармонік, статичні тиристорні компенсатори (SVC), а також STATCOM. Дані пристрої дозволяють стабілізувати напругу, покращити коефіцієнт потужності та знизити рівень гармонічних спотворень у мережі.

У сучасних промислових системах також широко використовуються автоматизовані системи моніторингу якості електроенергії, які забезпечують безперервний контроль параметрів мережі в режимі реального часу. Для аналізу гармонічного складу сигналів застосовується швидке перетворення Фур'є, що дозволяє визначати рівень гармонічних спотворень та оцінювати показник THD.

Таким чином, електродугові печі є значним джерелом вищих гармонік та реактивної потужності у системах електропостачання промислових підприємств. Для забезпечення надійної та енергоефективної роботи електромереж необхідно застосовувати комплекс заходів, спрямованих на компенсацію реактивної потужності, фільтрацію гармонік та автоматизований контроль параметрів якості електроенергії. Це дозволяє знизити втрати електроенергії, підвищити надійність роботи обладнання та покращити енергетичні показники підприємства.

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

7.4. Підвищення енергетичних показників та зменшення впливу реактивної потужності та вищих гармонік на електричну мережу

7.4.1 Традиційні методи компенсації реактивної потужності

Для покращення показників якості електроенергії та зменшення негативного впливу вентильних електроприводів на систему електропостачання використовують різні способи компенсації реактивної потужності.

До традиційних засобів компенсації належать синхронні двигуни, синхронні компенсатори та батареї конденсаторів.

У сучасних системах електропостачання також широко застосовують багатофункціональні пристрої, зокрема силові резонансні фільтри. До таких установок відносяться фільтрокомпенсуючі та фільтросиметруючі пристрої, а також системи накопичення енергії.

Перевага багатофункціональних пристроїв полягає в тому, що вони забезпечують одночасно:

- компенсацію реактивної потужності;
- фільтрацію вищих гармонік;
- зменшення коливань та відхилень напруги;
- симетрування фазних навантажень.

Для підвищення енергетичних характеристик вентильних електроприводів застосовують спеціальні схеми керування та сучасні системи регулювання перетворювачів.

Синхронні двигуни є одним із найбільш ефективних засобів компенсації реактивної потужності в системах електропривода. Крім виконання основної функції привода механізму, вони здатні генерувати реактивну потужність у мережу та працювати з випереджальним коефіцієнтом потужності. Це забезпечується відповідним регулюванням струму збудження двигуна.

Синхронні компенсатори застосовують для підтримання необхідного рівня напруги та компенсації реактивної потужності в електричних мережах із змінним характером навантаження. У нормальному режимі роботи

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

синхронний компенсатор функціонує в режимі перезбудження та передає реактивну потужність у мережу.

Конденсаторні батареї, що використовуються для компенсації реактивної потужності, зазвичай називають статичними компенсаторами. Їх ефективність особливо помітна при постійних або повільно змінних навантаженнях. Проте в умовах різких змін режимів роботи електромережі можливостей конденсаторних установок часто недостатньо.

При зниженні напруги в мережі споживання реактивної потужності індуктивними навантаженнями зростає, що додатково погіршує режим роботи системи електропостачання. Для стабілізації напруги в таких випадках використовують синхронні компенсатори з автоматичним регулюванням струму збудження.

За принципом роботи синхронний компенсатор фактично є синхронним двигуном, який працює без механічного навантаження на валу. У робочому режимі він споживає з мережі невелику активну потужність, необхідну для покриття власних втрат.

Потужність синхронних компенсаторів може досягати значних величин. Для потужних установок застосовують водяне або повітряне охолодження, що забезпечує стабільний тепловий режим обладнання.

Пуск синхронних компенсаторів, як правило, здійснюється асинхронним способом. Для цього в полюсних наконечниках ротора передбачають спеціальні пускові обмотки. У процесі запуску машина працює як асинхронний двигун, а після досягнення необхідної швидкості переходить у синхронний режим.

Для компенсаторів великої потужності також можуть використовуватись допоміжні пускові електродвигуни, механічно з'єднані з валом компенсатора. Синхронізація з мережею зазвичай виконується методом самосинхронізації.

						Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зменшення повітряного зазору в синхронній машині дає можливість спростити конструкцію обмотки збудження та підвищити швидкодію системи регулювання.

Номінальна повна потужність синхронного компенсатора визначається виразом:

$$S_{\text{н}} = m U_{\text{н}} I_{\text{н}}$$

де m - кількість фаз; $U_{\text{н}}$ - номінальна напруга; $I_{\text{н}}$ - номінальний струм компенсатора.

У режимі недозбудження струм компенсатора може бути визначений із рівняння:

$$I_{\text{н}} = \frac{E - U}{x_d}$$

При $E=0$ струм набуває значення:

$$I_{\text{н}} = \frac{U}{x_d}$$

У такому випадку номінальна повна потужність компенсатора:

$$S_{\text{н}} = m U_{\text{н}} I_{\text{н}} = m \frac{U_{\text{н}}^2}{x_d}$$

Звідси отримують співвідношення:

$$\frac{S_{\text{нв}}}{S_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}}}{x_d x'_d} = \frac{1}{x'_d}$$

На практиці значення

$$x'_d = 1.5 \div 2.2$$

тоді:

$$\frac{S_{\text{нв}}}{S_{\text{н}}} = 0.45 \div 0.67$$

У більшості випадків при роботі синхронного компенсатора в режимі недозбудження не потрібні високі перевантажувальні здатності, тому наведені значення задовольняють експлуатаційні вимоги. В окремих режимах для

						Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покращення характеристик компенсатора застосовують збільшення повітряного зазору, однак це ускладнює конструкцію машини та підвищує витрати на виготовлення.

При значному зменшенні струму збудження підвищується струм статора. Оскільки синхронний компенсатор працює лише з реактивною потужністю, він може тривалий час функціонувати навіть при незначному негативному збудженні.

В деяких режимах роботи як синхронні компенсатори можуть використовуватись генератори гідроелектростанцій.

Конденсаторні установки є найбільш поширеним засобом компенсації реактивної потужності. Основними їх перевагами є порівняно невеликі активні втрати, простота монтажу та експлуатації.

Разом із тим конденсаторні батареї мають і певні недоліки. Їх робота суттєво залежить від рівня напруги мережі, а при перевантаженнях по струму чи напрузі надійність роботи знижується. Крім того, в умовах підвищеного рівня вищих гармонік ефективність та довговічність конденсаторних установок погіршуються.

7.4.2 Силові резонансні фільтри енергетичного призначення

Одним із найбільш ефективних способів зниження рівня вищих гармонік у системах електропостачання є застосування силових резонансних фільтрів. Необхідність їх використання обумовлена значною кількістю нелінійних навантажень у промислових мережах, які погіршують показники якості електроенергії.

Сучасні фільтрокомпенсуючі пристрої виконують одночасно декілька функцій: забезпечують компенсацію реактивної потужності, зменшують рівень гармонічних спотворень та стабілізують режими роботи електричної мережі.

У промислових системах електропостачання силові резонансні фільтри використовують також для:

- симетрування фазних навантажень;

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

- зниження коливань напруги;
- покращення електромагнітної сумісності;
- підвищення якості електроенергії.

Крім компенсації реактивної потужності, фільтри можуть виконувати функцію розділення лінійних і нелінійних навантажень, що дозволяє локалізувати гармонічні спотворення та обмежити їх поширення в електромережі.

Розділення навантажень зазвичай здійснюється за допомогою фільтрів нижчих частот. Найпростішим варіантом є Г-подібний фільтр, який формується індуктивністю трансформатора або реактора та ємністю конденсаторної батареї.

Принцип роботи такого фільтра базується на явищі резонансу струмів. При правильному виборі параметрів індуктивності та ємності забезпечується налаштування фільтра на частоту певної гармоніки.

Для уникнення виникнення резонансних режимів у мережі частота налаштування конденсаторної батареї повинна бути меншою за частоту найнижчої гармоніки, яка генерується нелінійним навантаженням.

Відношення опорів навантаження та мережі для гармоніки n -го порядку визначається виразом:

$$\frac{X_{Cn}}{X_{nn}} = \frac{S_k}{Q_{kn}}$$

де X_{Cn} - реактивний опір конденсаторної батареї; X_{nn} - опір нелінійного навантаження; S_k - потужність короткого замикання мережі; Q_{kn} - реактивна потужність конденсаторної установки для гармоніки n -го порядку.

Правильний вибір параметрів силового резонансного фільтра дозволяє суттєво знизити рівень гармонічних спотворень, зменшити додаткові втрати електроенергії та підвищити надійність роботи електрообладнання промислового підприємства.

Відношення потужності короткого замикання мережі до номінальної потужності трансформатора живлення зазвичай знаходиться в межах:

						Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{S_k}{S_T} = 5 \div 10$$

де S_k - потужність короткого замикання мережі; S_T - номінальна потужність трансформатора.

Для оцінювання ефективності роботи фільтра вводять коефіцієнт:

$$k = \frac{I_{2n}}{I_{1n}}$$

де I_{2n} - струм гармоніки після встановлення фільтра; I_{1n} - струм гармоніки до встановлення фільтра.

Цей коефіцієнт характеризує ступінь зменшення гармонічної складової струму після підключення фільтрокомпенсуючого пристрою.

На основі наведених співвідношень визначають необхідну реактивну потужність конденсаторної батареї:

$$\frac{Q_6}{S_T} \geq \frac{(5 + 10)S_T(1 - k)}{kn^2}$$

де Q_6 - реактивна потужність батареї конденсаторів; n - порядок гармоніки; k - коефіцієнт зниження гармонічного струму.

Із отриманого виразу видно, що для ефективного пригнічення гармонік за допомогою Г-подібного фільтра потрібна значна потужність конденсаторної установки. У багатьох випадках необхідна потужність батареї може бути співмірною з потужністю трансформатора живлення, що робить таке рішення економічно малоефективним.

Аналогічний результат отримують і при застосуванні мостових фільтрокомпенсуючих пристроїв. Використання Г-подібного фільтра є менш ефективним порівняно з П-подібною схемою, оскільки він має гірші фільтрувальні властивості та нижчу надійність у режимах із підвищеним рівнем гармонічних спотворень.

						Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

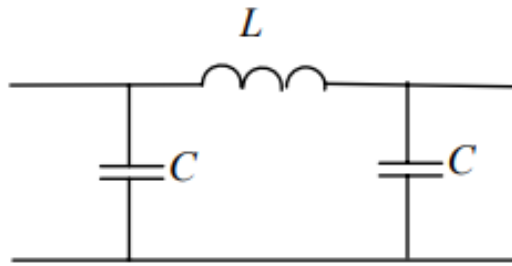


Рисунок 7.9 - Схема П-подібного фільтра

П-подібний фільтр складається з двох поперечних ємнісних елементів і послідовно ввімкненого реактора. Така схема забезпечує кращі умови для пригнічення гармонічних складових струму, однак її робота також залежить від правильного вибору параметрів реакторів і конденсаторів.

На рисунку 7.9 два конденсатори C підключені паралельно до мережі, а між ними послідовно ввімкнено індуктивність L . Така структура дозволяє зменшити проникнення гармонічних струмів у мережу живлення та частково компенсувати реактивну потужність.

При виборі параметрів реактора й конденсаторів фільтра потрібно враховувати активний опір елементів системи електропостачання. Якщо активними опорами знехтувати, передаточна функція за струмом для схеми, наведеної на рисунку 7.9, має вигляд:

$$I(p) = \frac{i_2(p)}{i_1(p)} = \frac{1}{p^4 C^2 L_H L + p^2 C (2L_H + L) + 1}$$

Коефіцієнт зменшення гармонічної складової струму можна подати як:

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{n^4 \frac{X_p X_H}{X_C^2} + n^2 \frac{X_p + 2X_H}{X_C} + 1}$$

де X_p - реактивний опір реактора фільтра; X_H - реактивний опір навантаження; X_C - реактивний опір поперечного ємнісного плеча фільтра.

Із наведених залежностей видно, що ефективність П-подібного фільтра визначається співвідношенням реактивних опорів його елементів. При правильному налаштуванні фільтр забезпечує зменшення струмів вищих

гармонік і покращує форму напруги в точці підключення нелінійного навантаження.

Позначимо відношення реактивних опорів у вигляді:

$$\frac{X_p}{X_C} = k_n = \frac{X_H}{X_C} = k_{p1}$$

Тоді для визначення коефіцієнта k_{p1} при заданому значенні коефіцієнта пригнічення гармонік отримуємо:

$$k_{p1} = \frac{k_n n^2}{2(k_n n^2 + 2)} + \sqrt{\frac{1 - k_n}{4(k_n n^2 + 2)n^2} + \left[\frac{k_n}{2(k_n n^2 + 2)} \right]^2}$$

При значеннях:

$$k_n = 1, \quad k = 0.5$$

одержуємо:

$$k_{p1} = 0.025$$

У цьому випадку сумарна потужність батареї конденсаторів фільтра становить:

$$Q_{\Sigma\phi} = 2 \cdot 0.025(5 \div 10)S_t = (0.25 \div 0.5)S_t$$

Отримані результати показують, що для ефективного зниження рівня вищих гармонік за допомогою П-подібного фільтра необхідна потужність конденсаторної батареї може становити значну частину потужності трансформатора живлення.

При паралельному підключенні П-подібного фільтра до системи електропостачання гармонічні складові струму практично не проходять у мережу живлення. Унаслідок цього рівень гармонічних спотворень на шинах підстанції суттєво зменшується.

Для фільтрації гармонік у промислових мережах часто використовують батареї конденсаторів, сумарна потужність яких становить приблизно 80–90 % реактивної потужності навантаження (Рис.7.10). Такий варіант є достатньо

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

простим у реалізації та економічно доцільним для більшості промислових систем електропостачання.

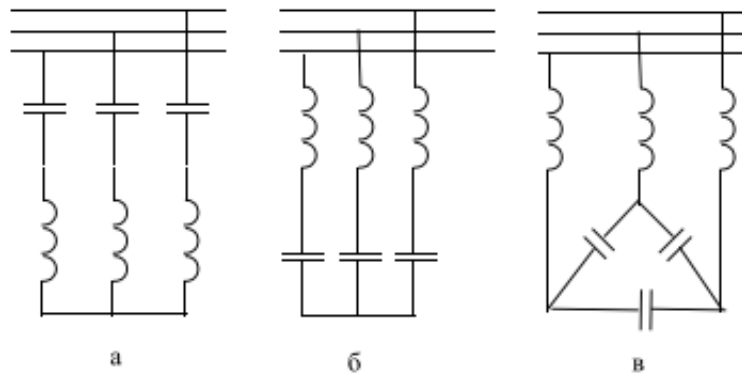


Рисунок 7.10 – Батареї конденсаторів

В схемі, наведеній на рисунку 7.10, ізоляція конденсаторної батареї відносно землі перебуває під напругою, величина якої не перевищує фазну напругу мережі. Завдяки цьому підвищується надійність роботи конденсаторної установки та зменшується ймовірність пошкодження ізоляції.

Найбільш поширеною є схема, у якій параметри фільтра вибирають із урахуванням допустимих режимів роботи конденсаторної батареї та умов експлуатації в мережах із гармонічними спотвореннями.

Під час проєктування конденсаторних установок враховують можливі відхилення фактичної ємності від номінального значення. У реальних умовах роботи допускається певне збільшення ємності конденсаторів, тому при розрахунках вводять додатковий коефіцієнт запасу.

Для обмеження перевантаження конденсаторів за струмом у мережах із гармоніками приймають:

$$C_{\text{ш}} = 1.1C, \quad C_u = 1.3$$

Потужність батареї конденсаторів силового резонансного фільтра для гармоніки n -го порядку визначають із умови, що струм гармонічної складової в колі фільтра не повинен перевищувати допустимого значення для конденсаторної установки:

$$\alpha_p^2 k_u^2 \leq C_u$$

де

$$\alpha_p = \frac{n_p^2}{n_p^2 - 1}; \quad k_u = \frac{U_m}{k_c U_{\text{пр}}}$$

де n_p - номер гармоніки, на частоту якої налаштований фільтр; U_m - максимально можливе значення нелінійної напруги на шинах підстанції; $U_{\text{пр}}$ - номінальна лінійна напруга батареї конденсаторів; k_c - коефіцієнт запасу.

Із наведених залежностей видно, що під час вибору параметрів силового резонансного фільтра необхідно враховувати не лише рівень гармонічних спотворень, а й допустимі режими роботи конденсаторних батарей. Неправильний вибір параметрів може призвести до перевантаження конденсаторів, перегрівання та скорочення терміну їх експлуатації.

При з'єднанні конденсаторів у трикутник або зірку значення коефіцієнта k_c визначається відповідно типом схеми підключення. Для схеми трикутника:

$$k_c = \sqrt{3}$$

Допустимий режим роботи конденсаторної батареї за струмом забезпечується за умови:

$$\sqrt{I_p^2 + \sum I_{np}^2} \leq C_I I_{\text{пр}}$$

де I_p - струм основної гармоніки в колі фільтра; I_{np} - струм гармоніки n -го порядку; $I_{\text{пр}}$ - номінальний струм батареї конденсаторів; C_I - коефіцієнт допустимого перевантаження.

Якщо в мережі встановлено декілька фільтрів, то через кожен із них переважно проходить струм тієї гармоніки, на яку він налаштований. У такому випадку потужність батареї конденсаторів для фільтра гармоніки n -го порядку визначається виразом:

$$Q_p \geq \frac{\sqrt{3} U_n I_{\text{пр}}}{\sqrt{C_I^2 - \alpha_p^2 k_u^2}}$$

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

У практичних розрахунках часто використовують спрощений вираз:

$$Q_p \geq 1.2k_c U_{\text{пр}} I_{\text{пр}}$$

де $k_c = \sqrt{3}$ - для з'єднання конденсаторів у трикутник;

$k_c=3$ - для схеми зірки.

Під час визначення потужності батареї необхідно також виконання умови:

$$Q_p \geq Q_{1p} + Q_{np} \quad \text{де}$$

Q_{1p} - реактивна потужність батареї на частоті основної гармоніки; Q_{np} - реактивна потужність на частоті гармоніки n -го порядку.

Зазначена умова виконується при:

$$\alpha_p^2 k_u^2 + \frac{\xi_p^2}{n_p} \leq 1$$

Отримані залежності показують, що при проєктуванні силових резонансних фільтрів необхідно враховувати допустимі струмові навантаження конденсаторних батарей та рівень гармонічних спотворень у мережі. Правильний вибір параметрів фільтра забезпечує ефективне пригнічення гармонік і підвищує надійність роботи системи електропостачання.

При стабільній несиметрії напруги силові резонансні фільтри можуть одночасно виконувати функцію симетрування навантаження. Це пояснюється тим, що при промисловій частоті індуктивний опір реакторів значно менший порівняно з опором конденсаторних батарей.

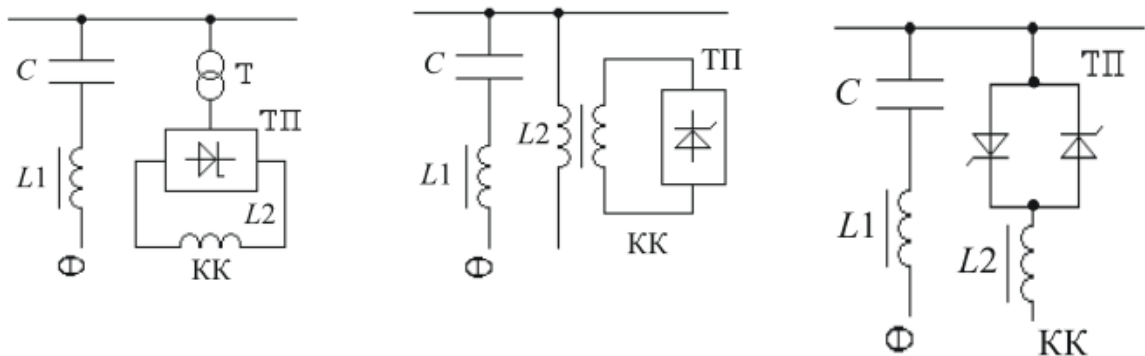


Рисунок 7.11 - Приклади схем фільтрокомпенсуючих пристроїв.

На рисунку 7.11 наведені приклади схем фільтрокомпенсуючих пристроїв. Такі системи поєднують у собі елементи компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонічних складових струму.

Фільтрокомпенсуючі пристрої зазвичай складаються з: 1) батареї конденсаторів; 2) реакторів; 3) тиристорних перетворювачів; 4) комутаційних елементів.

У схемах, наведених на рисунку, реактивна потужність компенсується за допомогою конденсаторних установок, а фільтрація гармонік забезпечується LC-фільтрами, налаштованими на певні гармонічні складові.

Енергетичні фільтри являють собою послідовні індуктивно-ємнісні контури, резонансна частота яких відповідає частоті конкретної гармоніки вентильного електропривода.

Резонансна частота LC-фільтра визначається виразом:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

де L - індуктивність реактора; C - ємність конденсаторної батареї.

При правильному налаштуванні фільтр створює мінімальний опір для гармонічної складової відповідної частоти, унаслідок чого гармонічний струм переважно проходить через фільтр, а не в мережу живлення.

Кількість паралельно підключених резонансних фільтрів визначається допустимим рівнем гармонічних спотворень напруги. У промислових мережах рівень несинусоїдальності напруги зазвичай обмежують значенням не більше 5 %.

Для кожної непарної гармоніки, як правило, застосовують окремий фільтр. Для парних гармонік часто використовують спільний фільтрувальний контур.

Використання фільтрокомпенсуючих пристроїв дозволяє:

- зменшити рівень гармонічних спотворень;
- покращити коефіцієнт потужності;
- знизити втрати електроенергії;

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

- стабілізувати напругу;
- підвищити надійність роботи електрообладнання.

Такі пристрої широко застосовуються в системах електропостачання підприємств із потужними нелінійними навантаженнями, зокрема дуговими сталеплавильними печами та вентильними електроприводами.

Реактивна потужність, яка генерується фільтром для гармоніки n-го порядку, визначається виразом:

$$Q_{\phi n} = \left(U_1 \frac{n^2}{n^2 - 1} \right)^2 2\pi f_1 C_n$$

де U_1 - напруга основної гармоніки лінійної напруги мережі; f_1 - частота основної гармоніки; C_n - ємність фільтра гармоніки n-го порядку.

Сумарна реактивна потужність фільтрокомпенсуючого пристрою визначає величину компенсованої реактивної потужності системи електропостачання.

Регулювання реактивної потужності зазвичай виконується шляхом зміни режиму роботи керованого компенсатора, до складу якого входить реактор L_2 , керований тиристорним перетворювачем.

При закритих тиристорах реактор практично не споживає реактивної потужності, тому реактивна потужність, яка генерується пристроєм, дорівнює потужності фільтрів.

Після відкриття тиристорів реактор починає споживати реактивну потужність. У цьому випадку потужність, що передається в мережу, визначається як різниця між потужністю, створеною фільтрами, та потужністю, яку споживає реактор:

$$Q_{\phi k} = \sum Q_{\phi} - Q_{pk}$$

де $Q_{\phi k}$ - результуюча реактивна потужність фільтрокомпенсуючого пристрою; $\sum Q_{\phi}$ - сумарна реактивна потужність фільтрів; Q_{pk} - реактивна потужність реактора.

Використання фільтрокомпенсуючих пристроїв у системах електропостачання промислових підприємств дозволяє одночасно вирішувати декілька задач: компенсувати реактивну потужність, знижувати рівень гармонічних спотворень та покращувати показники якості електроенергії. Особливо ефективними такі пристрої є в мережах із потужними нелінійними навантаженнями, зокрема дуговими сталеплавильними печами та вентильними електроприводами.

У результаті аналізу встановлено, що найбільш ефективним рішенням для промислових підприємств із потужними нелінійними навантаженнями є комплексне застосування компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік. Це дозволяє:

- знизити втрати електроенергії;
- підвищити коефіцієнт потужності;
- покращити режими роботи електрообладнання;
- підвищити надійність системи електропостачання;
- збільшити енергоефективність підприємства.

Таким чином, впровадження сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв у системах електропостачання підприємств сільськогосподарського машинобудування є ефективним заходом підвищення енергетичних показників та забезпечення належної якості електричної енергії.

						Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі виконано розробку системи електропостачання заводу сільськогосподарського машинобудування та проведено комплексний аналіз режимів роботи електричних мереж підприємства.

У результаті виконання роботи були визначені силові та освітлювальні навантаження виробничих підрозділів підприємства, побудовано картограму електричних навантажень та визначено координати центру електричних навантажень. На основі отриманих результатів обґрунтовано розташування трансформаторних підстанцій та обрано раціональну схему внутрішнього електропостачання.

Проведено техніко-економічне порівняння варіантів зовнішнього електропостачання підприємства. За результатами розрахунків встановлено, що економічно доцільним є варіант електропостачання напругою 35 кВ із використанням головної понижувальної підстанції 35/10 кВ. Обраний варіант забезпечує зменшення втрат електроенергії, покращення режимів роботи мережі та підвищення надійності електропостачання.

Для живлення виробничих підрозділів було вибрано однострансформаторні та двохтрансформаторні цехові підстанції з урахуванням категорії надійності електроприймачів та величини розрахункових навантажень. Виконано вибір силових трансформаторів, кабельних ліній, комутаційної апаратури та захисних пристроїв.

В роботі проведено розрахунок струмів короткого замикання в мережах 35 кВ, 10 кВ та 0,4 кВ, що дозволило здійснити перевірку електрообладнання за умовами термічної та динамічної стійкості.

Особливу увагу приділено питанням компенсації реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності. В результаті розрахунків вибрано високовольтні та низьковольтні компенсуючі установки, що забезпечують зниження реактивних навантажень, зменшення втрат електроенергії та покращення енергетичних показників системи електропостачання.

						Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В спеціальному розділі роботи досліджено вплив дугових сталеплавильних печей на систему електропостачання підприємства. Встановлено, що робота дугових печей супроводжується значним споживанням реактивної потужності, появою вищих гармонік, додатковими втратами електроенергії та погіршенням показників якості електроенергії.

Проаналізовано вплив гармонічних спотворень на роботу трансформаторів, кабельних ліній, конденсаторних батарей та електродвигунів. Визначено, що одним із найбільш ефективних способів підвищення енергоефективності системи електропостачання є застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв, які забезпечують одночасно компенсацію реактивної потужності та фільтрацію вищих гармонік.

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено технічно обґрунтовану систему електропостачання підприємства, яка забезпечує:

- надійне електроживлення виробничих підрозділів;
- зменшення втрат електроенергії;
- підвищення коефіцієнта потужності;
- покращення якості електричної енергії;
- зниження негативного впливу нелінійних навантажень на електричну мережу;
- підвищення енергоефективності підприємства.

						Арк.
						82
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.
						83
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

						Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		