

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____ 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

**Проектування системи електропостачання ливарного
виробництва феронікелевого комбінату
Design of a power supply system for a foundry of a
ferronickel plant**

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ-22,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Захар КОВАЛЬОВ
«__» _____ 2026 р.

Керівник роботи
доцент, к.т.н.
_____ Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ
«__» _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Ковальова Захара Вікторовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання ливарного
виробництва феронікелевого комбінату

Design of a power supply system for a foundry of a ferronickel plant

2. Керівник роботи Переверзєв Ігор Олексійович, доцент, к.т.н.

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

3. Строк подання роботи до захисту 08.06.2026 р.

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

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>13.04-17.04</i>	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>18.04-25.04</i>	
3	<i>Побудова графіків електричних навантажень</i>	<i>26.04-28.04</i>	
4	<i>Побудова картограми електричних навантажень</i>	<i>29.04-04.05</i>	
5	<i>Вибір напруги і електричних схем</i>	<i>05.05-09.05</i>	
6	<i>Режими реактивної потужності</i>	<i>10.05-15.05</i>	
7	<i>Вибір трансформаторів</i>	<i>16.05-18.05</i>	
8	<i>Розрахунок струмів КЗ, вибір обладнання та силових мереж системи електропостачання</i>	<i>19.05-24.05</i>	
9	<i>Підвищення ефективності режимів роботи рудотермічних печей феронікелевому комбінаті</i>	<i>25.05-31.05</i>	
10	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>01.06-04.06</i>	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>05.06-08.06</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача

Захар КОВАЛЬОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 70 с.; 14 рис.; 20 табл.; 17 джерел

Ковальов З.В. Проектування системи електропостачання ливарного виробництва феронікелевого комбінату. – Рукопис.

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

У кваліфікаційній роботі розроблено систему електропостачання ливарного виробництва феронікелевого комбінату. Виконано розрахунок електричних навантажень підприємства, побудовано графіки та картограму навантажень, визначено центр електричних навантажень. Обґрунтовано вибір схеми електропостачання та виконано техніко-економічне порівняння можливих варіантів.

У роботі проведено розрахунок і компенсацію реактивної потужності, здійснено вибір кількості та потужності трансформаторів цехових підстанцій, розраховано струми короткого замикання та підібрано основне електротехнічне обладнання і кабельні лінії. Досліджено режими роботи рудотермічних печей феронікелевого комбінату та розглянуто способи підвищення ефективності їх функціонування.

Розроблена система електропостачання забезпечує необхідний рівень надійності електропостачання споживачів, відповідає вимогам щодо якості електричної енергії та сприяє підвищенню енергоефективності виробництва.

Ключові слова: система електропостачання, феронікелевий комбінат, електричне навантаження, реактивна потужність, трансформаторна підстанція, коротке замикання, рудотермічна піч, електроенергія, компенсація реактивної потужності, енергоефективність.

ABSTRACT

Qualification work: 70 p.; 14 Fig.; 20 tables; 17 sources

Kovalov Z. Design of a power supply system for a foundry of a ferronickel plant. – Manuscript.

Qualification work thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

In the qualification thesis, a power supply system for the foundry production of a ferronickel plant was developed. Electrical load calculations were performed, load curves and a load cartogram were constructed, and the center of electrical loads was determined. The selection of the power supply scheme was substantiated, and a technical and economic comparison of alternative solutions was carried out.

The thesis includes the calculation and compensation of reactive power, the selection of the number and rated capacity of workshop transformer substations, the calculation of short-circuit currents, and the selection of the main electrical equipment and cable lines. The operating modes of ferronickel plant submerged arc furnaces were investigated, and methods for improving their operating efficiency were considered.

The developed power supply system provides the required level of reliability for electricity consumers, meets power quality requirements, and contributes to improving the energy efficiency of production.

Keywords: power supply system, ferronickel plant, electrical load, reactive power, transformer substation, short circuit, submerged arc furnace, electrical energy, reactive power compensation, energy efficiency.

Зміст

	Перелік скорочень	6
1.	Вступ. Коротка характеристика технологічного процесу	7
2.	Розрахунок електричних навантажень	9
2.1.	Розрахунок силових електричних навантажень в електричних мережах до 1000 В	9
2.2.	Розрахунок освітлювального навантаження	9
2.3.	Розрахунок електричних навантажень в силових мережах вище 1000 В	10
3.	Побудова графіків електричних навантажень	17
4.	Побудова картограми електричних навантажень та вибір місця розташування РП-2	22
5.	Вибір напруги і схеми зовнішнього і внутрішнього електропостачання	24
6.	Компенсація реактивної потужності	29
6.1.	Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації	29
6.2.	Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності	32
7.	Вибір кількості, потужності трансформаторів	33
8.	Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання	35
8.1.	Розрахунок струмів коротких замикань	35
8.2.	Вибір високовольтного обладнання та пристроїв силових мереж	39
9.	Підвищення ефективності режимів роботи рудотермічних печей феронікелевому комбінаті	42
9.1.	Електричні параметри РТП	42
9.2.	Експлуатаційні характеристики РТП	46
9.3.	Автоматичне налаштування режиму РТП	49
10.	Висновки	63
11.	Перелік посилань	65
	Додатки	67
	Додаток А	68

					Кваліфікаційна робота				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Ковальов				Проектування системи електропостачання ливарного виробництва феронікелевого комбінату Design of a power supply system for a foundry of a ferronickel plant	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.	Переверзев						5	70	
Н.контр.	Переверзев					ЦНТУ, гр. ЕЕ-22			
Затвер	Плешков								

Перелік скорочень

АД – асинхронний двигун

АРР – автоматичний регулятор рудотермічної печі

БК – батарея конденсаторів

ГПП – головна понижувальна підстанція

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

КТП – комплектна трансформаторна підстанція

КУ – компенсувальна установка

КРП – компенсація реактивної потужності

ЛЕП – лінія електропередачі

РП – розподільчий пункт

РТП – рудотермічна піч

СД – синхронний двигун

СП – система електропостачання

ТП – трансформаторна підстанція

ТВП – трансформатор власних потреб

						Арх.
						6
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ВСТУП. КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Сучасна металургійна промисловість належить до найбільш енергоємних галузей народного господарства. Виробництво феронікелю потребує значних витрат електричної енергії, оскільки технологічний процес включає роботу потужних електропечей, компресорного, насосного та іншого електротехнічного обладнання. Від надійності та економічності системи електропостачання безпосередньо залежить ефективність виробничого процесу, якість готової продукції та безпека експлуатації підприємства.

В умовах зростання вартості енергетичних ресурсів особливої актуальності набувають питання оптимального проєктування систем електропостачання промислових підприємств. При цьому важливим є забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів різних категорій, зменшення втрат електричної енергії в мережах, підвищення коефіцієнта потужності та раціональний вибір електрообладнання.

Об'єктом дослідження є система електропостачання ливарного виробництва феронікелевого комбінату, основною продукцією якого є феронікель із вмістом нікелю 15–20 %, що широко використовується для виробництва високоміцних і корозійностійких сталей та сплавів. Підприємство характеризується значними електричними навантаженнями та безперервним режимом роботи основних виробничих цехів, що висуває підвищені вимоги до надійності системи електропостачання.

Феронікель являється сировиною для металургійної промисловості при створенні сплавів високої міцності та високої корозійної стійкості, що застосовуються в машинобудуванні та оборонній промисловості.

Електропостачання феронікелевого комбінату може здійснюватись від ПС системи. Опір на шинах 35 кВ ПС $X_c = 0,82$ Ом, відстань $l = 1,6$ км.

Струм короткого замикання на шинах 10 кВ ГПП складає $I'' = 5,3$ кА.

Заданий коефіцієнт потужності $tg = 0,15$.

						Арх.
						7
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Споживачі електроенергії відносяться в основному до I , II і III категорії.
Плавильний цех працює у три зміни тому, що ливарне виробництво вимагає безперервного технологічного циклу.

Район розташування корпусу відноситься до III-го кліматичного району.

Всі побудови і споруди відносяться до V-го ступеня вогнестійкості.

						Арх.
						8
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

2.1. Розрахунок силових електричних навантажень в електричних мережах до 1000 В

Виконаємо обчислення електричних навантажень методом впорядкованих діаграм [3,4].

Розрахунки робимо в таблицях (див. Табл. 2.1).

2.2. Розрахунок освітлювального навантаження

Розрахункове освітлювальне навантаження визначаємо через коефіцієнт попиту [3, 4]. Всі розрахунки робимо в Табл.2.2.

Табл.1.2 Розрахунок освітлювального навантаження групи цехів ФНК

№ п/ п	Приміщення	F, м ²	P _{уд} , Вт/м ²	K _c	P _{ро} , кВт	cos φ	tg φ	Q _{ро} , квар
1	Плавильний цех	21600	6	0,8	103,7	0,7	1,02	105,8
2	Обжигочний цех	11040	11	0,8	97,2	0,8	0,75	72,9
3	Компресорна	1800	12	0,6	13,0	0,7	1,02	13,2
4	Насосна підйому води	1440	10	0,7	10,1	0,7	1,02	10,3
		35880			224			202

2.3. Розрахунок електричних навантажень в силових мережах вище 1000 В

Розрахунок навантаження по підстанціям групи цехів ливарного виробництва феронікелевого комбінату робимо в табл. 2.3 з урахуванням компенсації реактивної потужності (розділ 6)

						Арх.
						10
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Табл.2.1 Розрахунок навантаження на шинах 0.4 кВ по групі цехів ливарного виробництва ФНК

№п /п	Найменування вузлів і груп електроприймачів	Кількість ЕП	Встановлена потужність		m	K _u	cos φ	tg φ	Середнє навантаження,кВт		n _е	K _М	Розрахункове навантаження, кВт			
			Одного	Σ					P _{CM}	Q _{CM}			P _P	Q _P	S _P	
	Плавильний цех															
1	Кран ливарний	2	248	248	496	<3	0,35	0,70	1,02	173,6	177,11					
2	Кран шлакового двору	2	225	225	450	<3	0,35	0,60	1,33	157,5	210,00					
3	Привід конвертора	4	27	27	108	<3	0,55	0,70	1,02	59,4	60,60					
4	Привід стрічкорозливної машини	4	25	25	100	<3	0,50	0,60	1,33	50,0	66,67					
5	Вентиляція	3	55	55	165	<3	0,70	0,80	0,75	115,5	86,63					
	Всього по цеху	15	25	248	1319	>3	0,42	0,68	1,08	556,0	601,0	11	1,44	801,34	601,00	1001,67
	Обжиговочний цех															
6	Конвеєр 5АМ	2	132	132	264	<3	0,55	0,7	1,02	145,2	148,13					
7	Конвеєр стрічковий	1	50	50	50	<3	0,55	0,7	1,02	27,5	28,06					
8	Сантех.вентиляція	1	55	55	55	<3	0,65	0,8	0,75	35,8	26,81					
9	Вентиляція	5	7,5	7,5	37,5	<3	0,7	0,8	0,75	26,3	19,69					
10	Тролейная лінія	2	3,2	3,2	6,4	<3	0,4	0,7	1,02	2,6	2,61					
11	Лебідка пробовідборника	1	1,7	1,7	1,7	<3	0,3	0,7	1,02	0,5	0,52					
12	Конвеєр	1	7,5	7,5	7,5	<3	0,4	0,7	1,02	3,0	3,06					
	Всього по цеху	13	1,7	132	422,1	>3	0,57	0,72	0,95	240,8	228,9	6,4	1,42	340,9	251,8	423,8

Продовження Табл.2.1

№п/п	Найменування вузлів і груп електроприймачів	Кількість ЕП	Встановлена потужність		m	K_u	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	Середнє навантаження, кВт		n_e	K_M	Розрахункове навантаження, кВт		
			Одного	Σ					P_{CM}	Q_{CM}			P_P	Q_P	S_P
	<u>Компресорна</u>														
13	Кислородний компресор	6	240	240	1440	<3	0,7	0,80	0,75	936,00	702,00				
14	Вентилятор В	14	1,5	1,5	21	<3	0,7	0,80	0,75	14,70	11,03				
15	Вентилятор П	2	20	20	40	<3	0,7	0,80	0,75	28,00	21,00				
16	Мостовий кран 10т	1	13,5	13,5	13,5	<3	0,2	0,60	1,33	2,70	3,60				
17	Підвісний кран 2.5т	1	3,8	3,8	3,8	<3	0,2	0,60	1,33	0,76	1,01				
18	Насос КС 10	2	10	10	20	<3	0,7	0,85	0,62	14,00	8,68				
19	Пусковий маслonaсос	2	2,2	2,2	4,4	<3	0,7	0,85	0,62	3,08	1,91				
20	Турбодетендер (компресор)	2	40	40	80	<3	0,7	0,80	0,75	52,00	39,00				
21	Насос	2	0,27	0,27	0,54	<3	0,7	0,85	0,62	0,38	0,23				
22	Електрокалорифер	3	20	20	60	<3	0,6	0,88	0,54	36,00	19,43				
23	Блок сушки повітря	1	18	18	18	<3	0,5	0,82	0,70	9,00	6,28				
24	Підігрів фундамента	2	2,2	2,2	4,4	<3	0,6	0,75	0,88	2,64	2,33				
25	Центрифуга	1	4,5	4,5	4,5	<3	0,5	0,86	0,59	2,25	1,34				
26	Дренетний насос	2	5	5	10	<3	0,7	0,85	0,62	7,00	4,34				
27	Токарний верстат	1	10	10	10	<3	0,1	0,50	1,73	1,40	2,42				
28	Сверлільний верстат	1	2,8	2,8	2,8	<3	0,1	0,50	1,73	0,39	0,68				

[illegible]

Табл.2.3 Розрахунок навантаження по підстанціям групі цехів ФНК

№ п/ п	Найменування вузлів і груп електроприймачів	Кіль- кість ЕП	Встановлена потужність		m	K _u	cos φ	tg φ	Середнє навантаження,кВт		n _e	K _M	Розрахункове навантаження, кВт			
			Одного	Σ					P _{CM}	Q _{CM}			P _P	Q _P	S _P	
	<u>КТП-1 (2 × 1000)</u>															
1	Плавильний цех	15	25	248	1319	>3	0,42	0,68	1,08	556	600,999					
2	Обжиговочний цех	13	1,7	132	422,1	>3	0,57	0,72	1,0	240,8	228,88					
3	Насосна підйому води	8	7,5	22	147	<3	0,61	0,76	0,85	89,70	76,36					
	Всього по позиціям 1-3	36	1,7	248	1888,1	>3	0,47	0,70	1,02	886,47	906,236	15	1,32	1167,3	906,2	1477,8
4	Освітлення													211	189	
5	Компенсація														-460	
	Всього на 0.4 кВ													1378,3	635,2	1517,7
	Втрати в тр-рах													17,8	103,3	
	Всього на 10 кВ													1396,1	738,6	1579,5
	<u>КТП-2 (2 × 1000)</u>															
6	Компресорна	50	0,27	240	1822,94	>3	0,62	0,795	0,762	1127,58	859,464	15	1,21	1366,42	859,4644	1614,244
7	Освітлення													13	13,2	
8	Компенсація														-460	
	Всього на 0.4 кВ													1379,4	412,7	1439,8

Продовження Табл.2.3

№ п/ п	Найменування вузлів і груп електроприймачів	Кіль- кість ЕП	Встановлена потужність			m	K _u	cos φ	tg φ	Середнє навантаження,кВт		n _e	K _M	Розрахункове навантаження, кВт		
			Одного	Σ	P _{CM}					Q _{CM}	P _P			Q _P	S _P	
	Втрати в тр-рах													16,4	97,0	
	Всього на 10 кВ													1395,9	509,7	1486,00
	<u>Всього по групі цехів</u>															
	Силова	86	0,27	248	3711,04	>3	0,54	0,75	0,88	2014,1	1765,74	30	1,18	2372,6	1765,7	2957,5
	Освітлення													224	202	
	Компенсація 0.4 кВ														-920	
	<u>Всього на 0.4 кВ</u>													2596,6	1047,7	2800,0
	Втрати в тр-рах													33,5	188,20	
	<u>Високовольтне навантаження</u>															
9	Компресорна СД	2	1000	1000	2000		0,70	0,90	0,48	1400,0	-1276,0		1	1400,0	-1276,0	
	<u>Плавильний цех</u>															
10	Газодувка РТП-1,2	2	400	400	800		0,70	0,90	0,48	560,0	271,22		1	560,0	271,2	
11	Вентилятори АД	2	630	630	1260		0,70	0,90	0,48	882,0	427,17		1	882,0	427,2	
12	Насоси оборотной воді АД	2	630	630	1260		0,70	0,90	0,48	882,0	427,17		1	882,0	427,2	
13	Димососи АД	2	1000	1000	2000		0,70	0,90	0,48	1400,0	678,05		1	1400,0	678,05	

Продовження Табл.2.3

[illegible]

3. ПОБУДОВА ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

При побудові добового графіка реактивного навантаження ми враховуємо вимоги щодо компенсації реактивної потужності в режимі максимуму $\operatorname{tg} \varphi = 0,15$.

Розрахункове активне навантаження на шинах 10 кВ РП-2 підприємства

$$P_{p10} = P_{p04} + P_{po} + \Delta P_{mp} + \Delta P_{10}, \quad (3.1)$$

де $P_{p04} = 2372,6$ кВт – силове навантаження на 0,4 кВ (табл. 2.1);

$P_{po} = 224$ кВт – розрахункова потужність освітлення (табл. 2.2);

ΔP_{mp} – втрати на трансформаторах;

P_{10} – високовольтне навантаження ($P_{10} = 5124$ кВт).

Втрати на трансформаторах ($N = 8$ шт) із середнім коефіцієнтом навантаження $0,7$ $S_n = 1000$ кВА

$$\Delta P_{mp} = (\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot K_3^2) \cdot 4 = (2 + 12 \cdot 0,7^2) \cdot 4 = 33,5 \text{ кВт},$$

де $\Delta P_{xx} = 2$ кВт, $\Delta P_{кз} = 12$ кВт.

Розрахункове навантаження по (3.1) складає

$$P_{10} = 2372,6 + 224 + 33,5 + 5124 = 7754 \text{ кВт}$$

З урахуванням компенсації ($\operatorname{tg} \varphi = 0,15$) реактивне навантаження на шинах 10 кВ складає

$$Q_{p10} = P_{p10} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 7754 \cdot 0,15 = 1163,6 \text{ кВар}$$

Відповідні графіки наведені на рис. 3.1 – 3.4.

Всі розрахунки зводимо до табл. 3.1.

Визначимо з річного графіка витрати активної та реактивної енергії

$$\begin{aligned} W_p = \sum_{i=1} P_i \cdot \tau_i = & 7754 \cdot 296 + 7640 \cdot 592 + 7190 \cdot 888 + 6980 \cdot 212 + \\ & + 6880 \cdot 424 + 6830 \cdot 296 + 6470 \cdot 636 + 6360 \cdot 444 + 6150 \cdot 212 + \\ & + 5840 \cdot 444 + 720 \cdot 318 + 5510 \cdot 592 + 5260 \cdot 318 + 4960 \cdot 424 + \\ & + 3880 \cdot 2664 = 47354600 \text{ кВт·год.} \end{aligned}$$

					Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	17

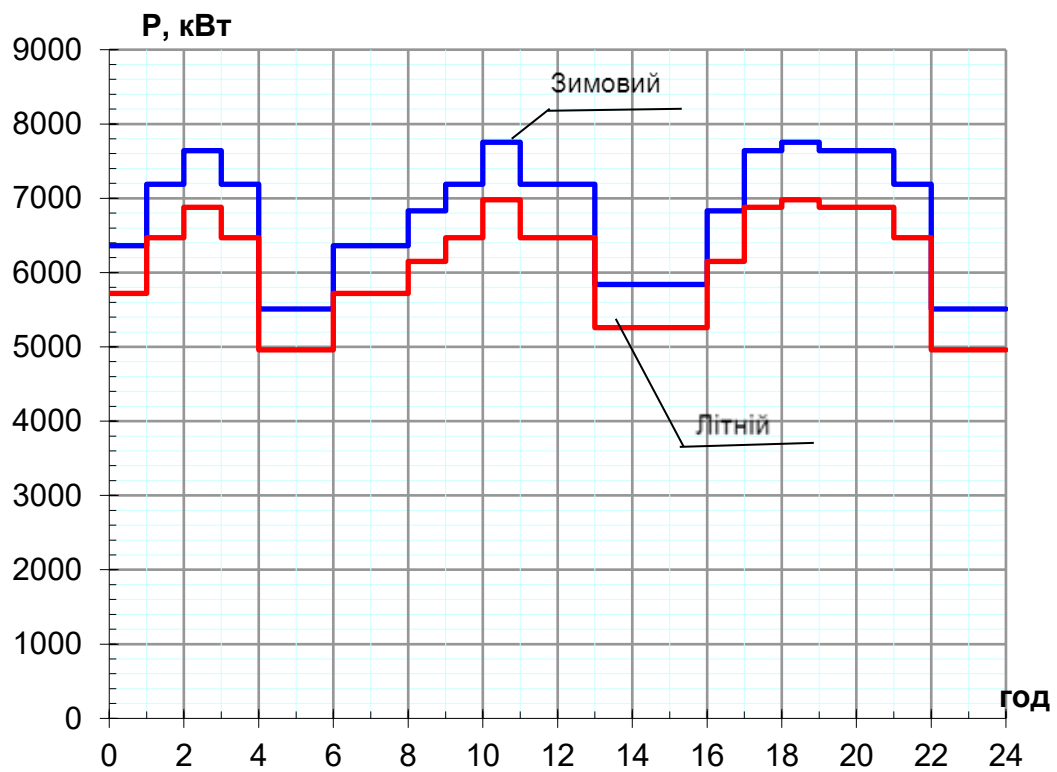


Рис.3.1 Добовий графік активного навантаження

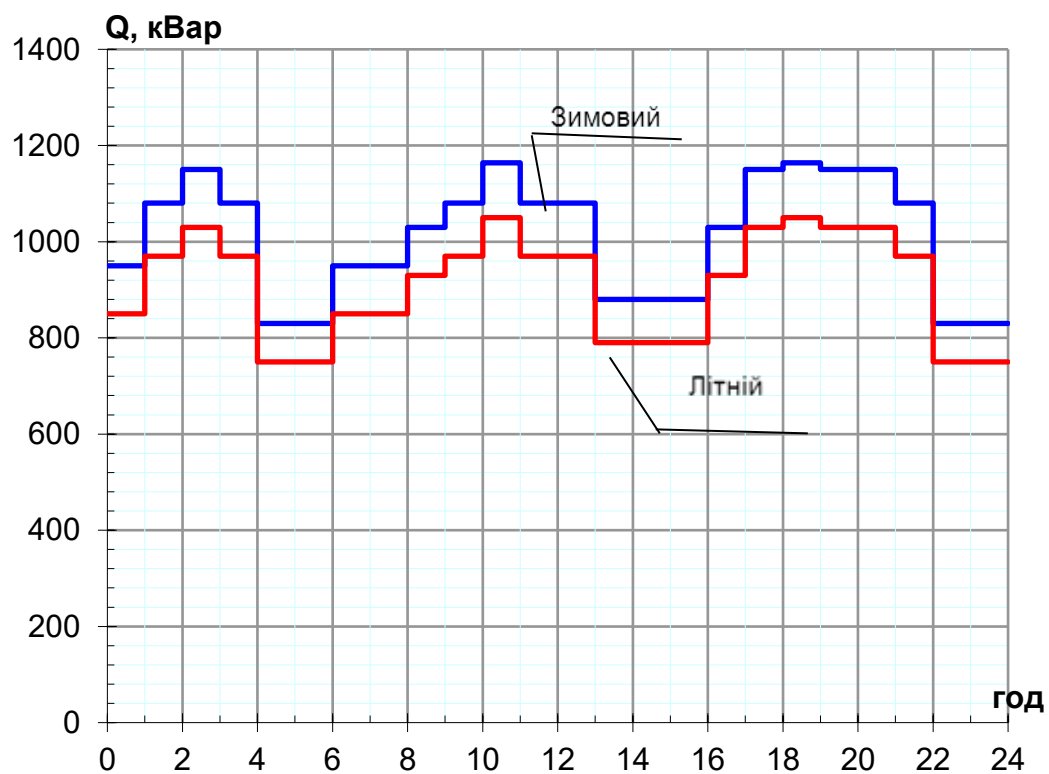


Рис.3.1 Добовий графік реактивного навантаження

Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата

Арх.

18

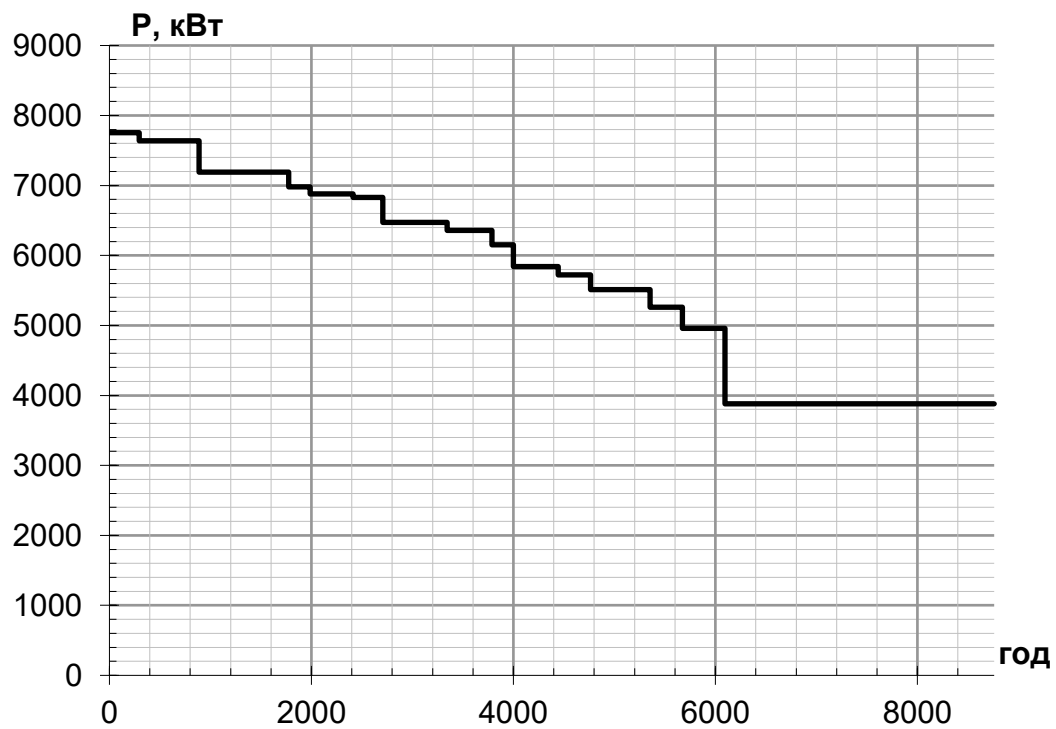


Рис.3.3 Річний графік по тривалості активної потужності.

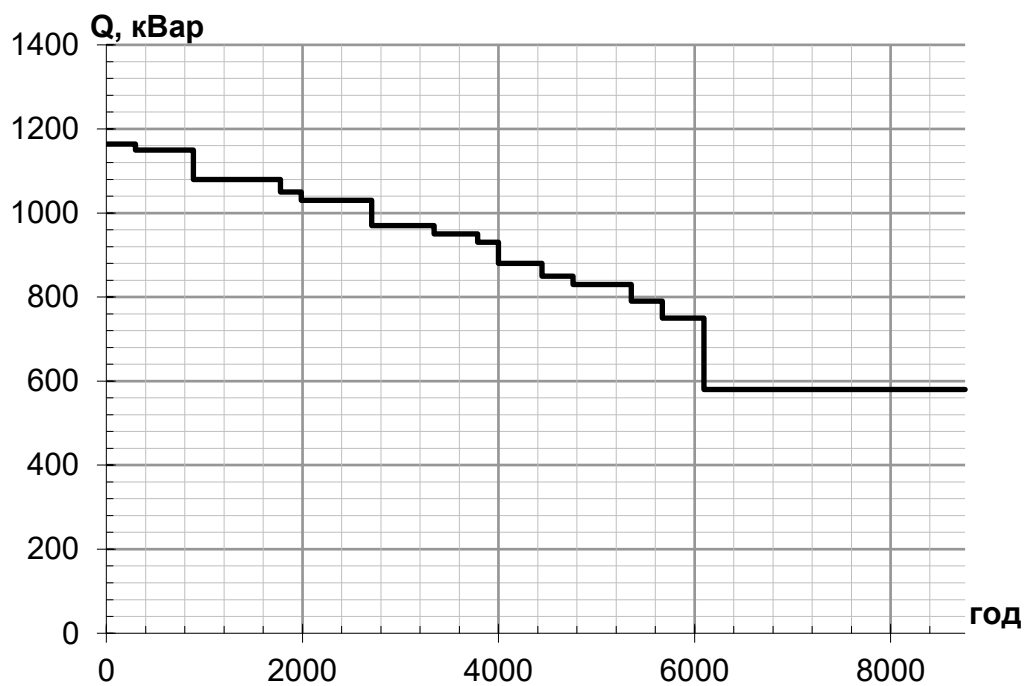


Рис.3.4 Річний графік по тривалості реактивної потужності

Таблиця 3.1 – Розрахунок річного графіка по тривалості

[illegible]

$$V_r = \sum_{i=1} Q_i \cdot \tau_i = 1164 \cdot 296 + 1150 \cdot 592 + 1080 \cdot 888 + 1050 \cdot 212 + 1030 \cdot 720 + 970 \cdot 636 + 950 \cdot 444 + 930 \cdot 212 + 880 \cdot 444 + 850 \cdot 318 + 830 \cdot 592 + 790 \cdot 318 + 750 \cdot 424 + 580 \cdot 2664 = 7106640 \text{ кВар} \cdot \text{год}.$$

Кількість годин використання максимального навантаження визначимо за виразом

$$T_m = \frac{\sqrt{W_z^2 + V_z^2}}{S_m} = \frac{\sqrt{47354600^2 + 7106640^2}}{7840.9} = 6107 \text{ год},$$

$$\text{де } S_m = \sqrt{P_{p10}^2 + Q_{p10}^2} = \sqrt{7754.1^2 + 1163.6^2} = 7840.9 \text{ кВА}.$$

$$\tau_m = \left(0,124 + \frac{T_m}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{6107}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 4728.6 \text{ год}.$$

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		21

4. ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИБІР МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ РП-2

Координати центра електричних навантажень промислового підприємства визначають як центр тяжіння плоских фігур

$$X_0 = \frac{\sum_i^n P_i \cdot X_i}{\sum P} \quad (4.1)$$

$$Y_0 = \frac{\sum_i^n P_i \cdot Y_i}{\sum P} \quad (4.2)$$

Розрахунок картограми виконаний та наведений у вигляді таблиці.

Таблиця 4.1 – Розрахунок картограми навантажень

№ п/п	Приміщення	P _{осв} , кВт	P _{0.4} , кВт	P _{сум} , кВт	α, град	R, см	X, см	Y, см
1	Плавильний цех	103,7	801,3 3724,0	905 3724	41	5,4 10,9	43	33
2	Обжиговочний цех	97,2	340,9	438	80	2,6	47,5	48
3	Компресорна	13,0	1366,4 1400,0	1379 1400	3	6,6 6,7	17,8	34
4	Насосна підйому води	10,1	118,5	129	28	2,0	47	18,4
				7975			38,0	34,0

Примітка: в знаменнику вказані високовольтні навантаження.

Визначаємо центр електричних навантажень

$$X = \frac{\sum_1 P_i \cdot X_i}{\sum_1 P_i} = \frac{905 \cdot 43 + 3724 \cdot 43 + 438 \cdot 47,5 + 1379 \cdot 17,8 + 1400 \cdot 17,8}{7975} +$$

$$+ \frac{129 \cdot 47}{7975} = 38 \text{ см.}$$

						Арх.
						22
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Y = \frac{\sum_1 P_i \cdot Y_i}{\sum_1 P_i} = \frac{905 \cdot 33 + 3724 \cdot 33 + 438 \cdot 48 + 1379 \cdot 34 + 1400 \cdot 34 + 129 \cdot 18,4}{7975} = 34 \text{ см}$$

Отже, визначивши координати X та Y, тобто центр електричних навантажень промислового підприємства, ми можемо встановити місце розташування РП-2. Звісно, доцільно розміщувати РП-2 в умовному центрі електричних навантажень, проте на практиці її встановлюють зі зміщенням від цього центру в бік джерела живлення.

У такому разі вища напруга буде максимально наближена до центру споживання електроенергії, а протяжність розподільчих мереж буде мінімальною. Якщо ж через технологічні чи архітектурні чинники розмістити джерело живлення в центрі електричних навантажень неможливо, його зміщення призводить до зростання річних приведених витрат на систему електропостачання.

						Арх.
						23
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. ВИБІР НАПРУГИ І СХЕМИ ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вибір напруги понад 1000 В неможливо розглядати у відриві від загальної схеми електропостачання феронікелевого комбінату. З огляду на те, що на підприємстві вже використовується напруга 10 кВ, для живлення цехових трансформаторних підстанцій доцільно прийняти напругу 10 кВ.

Під час вибору схеми електропостачання групи цехів ливарного виробництва феронікелевого комбінату розглянемо два найбільш ймовірних варіанти.

Перший варіант передбачає будівництво розподільчого пункту, від якого живляться всі цехові комплектні трансформаторні підстанції. Це рішення дозволяє досягти економії завдяки скороченню загальної довжини кабельних ліній (див. рис. 5.1).

Другий варіант передбачає пряме живлення КТП від ГЗП, розташованого на відстані 400 метрів від групи цехів ливарного виробництва феронікелевого комбінату. Цей варіант потребує меншої кількості комірок із вимикачами, а також використання кабелів меншого перерізу (оскільки відсутні ввідні кабелі до РП).

Критерієм економічності схеми електропостачання є мінімум приведених витрат.

$$Z_{\text{прив.}} = E_n \cdot K_i + C_i + C_{\text{втр } i} + U_i$$

де C_i, K_i – поточні витрати та сумарні капіталовкладення в i -й варіант;

$C_{\text{втр}}$ – вартість втрат енергії;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності.

						Арх.
						24
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

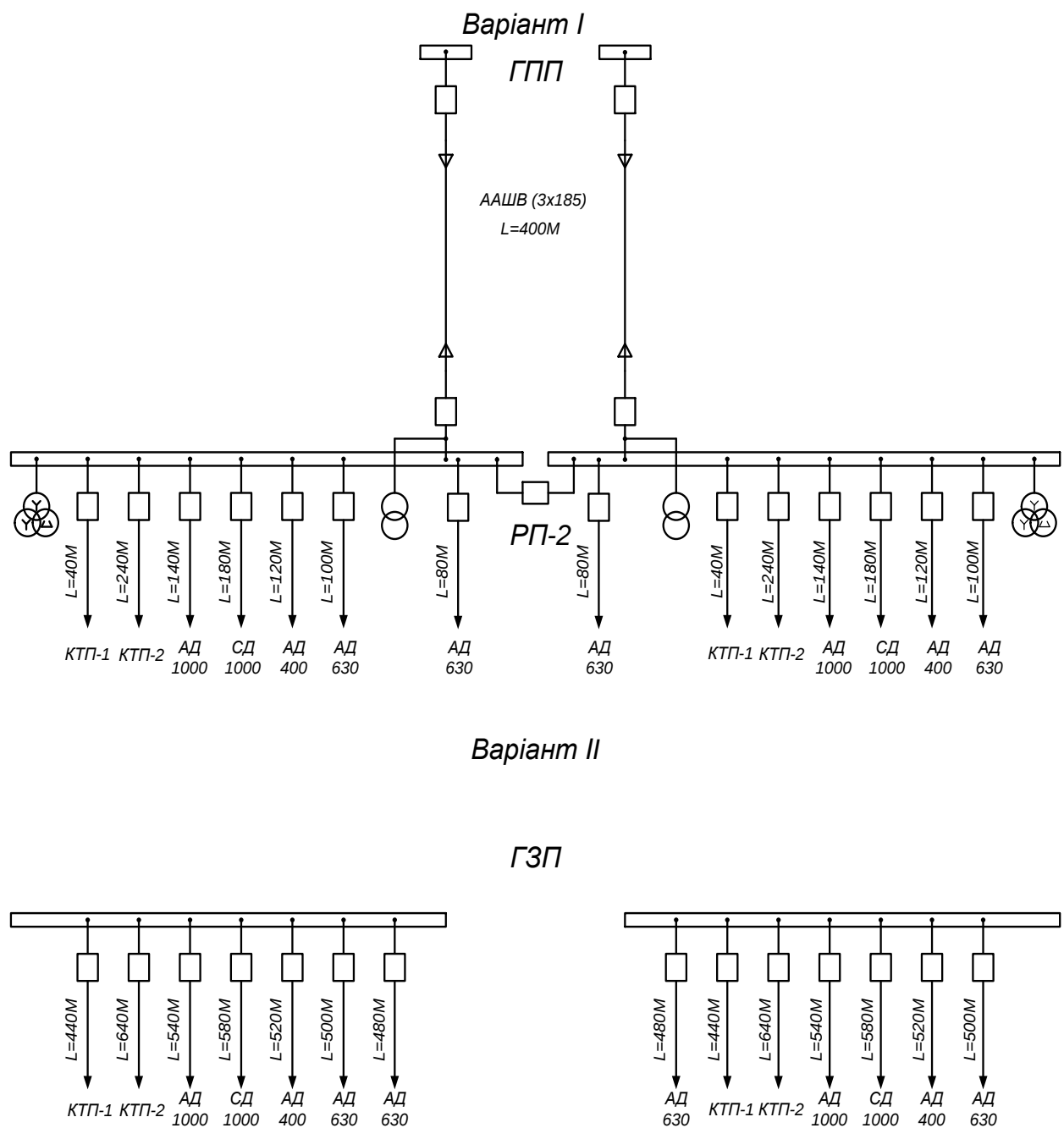


Рис.5.1 Схеми електропостачання групи цехів ливарного виробництва ФНК (переріз кабелів по варіантам однаковий).

Варіант I. Живлення виконується від ГЗП зі спорудженням РП-2.

Розрахунковий струм в лінії $S_p = 7840,9$ кВА (див. розд. 2)

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{7840,9}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 431,6 \text{ А}$$

Переріз визначимо по економічній щільності струму, $j_e = 1,2$ при $T_m > 5000$ год. (Табл. 10.1[1]).

$$F_{ек} = \frac{I_p}{2 \cdot j_{ек}} = \frac{431,6}{2 \cdot 1,2} = 180 \text{ мм}^2.$$

Приймаємо для прокладення 2-х кабельних ліній перерізом 185 мм^2 кожна, марка ААШВ (3×185) з тривало допустимим струмом нагріву $I_{д,доп} = 310$ А.

При виході з ладу одного ланцюга лінії, ланцюг що залишився в роботі забезпечує живлення навантаження

$$I = I_{д,доп} \cdot K_{ап} = 2 \cdot 310 \cdot 1,3 = 806 \text{ А},$$

де $K_{ап}$ – допустимий коефіцієнт аварійного перевантаження.

Попередньо для живлення цехових КТП (2×1000 кВА) вибираємо кабель ААШВ-70 мм^2 , враховуючи перевірку на термічну стійкість.

Вартість втрат електроенергії визначимо по середньому тарифу

$$C_{втр} = C_0 \cdot \Delta E, \quad (5.1)$$

$C_0 = 10,23$ грн/кВт·год. Для 2-го класу (напруга 10 кВ).

Втрати електроенергії визначимо за виразом

$$\Delta E = \Delta P_m \cdot \tau_m, \quad (5.2)$$

$$\Delta P_m = 3 \cdot I^2 \cdot R_0 \cdot l \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (5.3)$$

де l – довжина кабелю $l = 0,4$ км – 185 мм^2 .

Отримуємо:

$R_0 = 0,167$ Ом/км – питомий опір Табл. 7.28[6] для кабелю 185 мм^2 .

Для кабелю 70 мм^2 $R_0 = 0,443$ Ом/км – питомий опір Табл. 7.28[6].

Згідно (5.3) і (5.2) при $T_m = 6107$ год., $\tau_m = 4728,6$ год. (див. Розд. 2).

						Арх.
						26
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримуємо:

$$\Delta P_m = 3 \cdot \left(\frac{431.6}{2}\right)^2 \cdot 0,167 \cdot 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 38^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 0,28 \cdot 10^{-3} + \\ + 3 \cdot 65^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 40^2 \cdot 0,443 \cdot 0,18 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + \\ + 3 \cdot 26^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 23,5 \text{ кВт},$$

де I_p для радіальної лінії КТП-1,2 (2×1000)

$$I_p = \frac{0,7 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 38 \text{ А}, \quad l = 0,28 \text{ км.}, \quad \text{ААШВ-70 мм}^2,$$

$$\text{для СД та АД: } (P_n = 1000 \text{ кВт}), \quad I_p = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9} = 65 \text{ А}, \quad l = 0,32 \text{ км},$$

приймаємо ААШВ-70 мм²,

$$\text{для АД: } (P_n = 630 \text{ кВт}), \quad I_p = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9} = 40 \text{ А}, \quad l = 0,18 \text{ км},$$

приймаємо ААШВ-70 мм²,

$$\text{для АД: } (P_n = 400 \text{ кВт}), \quad I_p = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9} = 26 \text{ А},$$

приймаємо ААШВ-70 мм², $l=0,12$ км

$$C_{\text{пот}} = C_0 \cdot \Delta P_m \cdot \tau_m = 10,23 \cdot 23,5 \cdot 4728,6 = 1136779 \text{ грн.}$$

ВАРІАНТ 2. Живлення групи цехів виконується напряму від ГЗП комбінату по тій же схемі.

Виконуємо розрахунок вартості втрат електроенергії.

Довжина кабелю зі струмом $I_p = 38$ А збільшиться на 2×400 м і складає

$$l = 0,28 + 2 \cdot 0,4 = 1,08 \text{ км.}$$

Довжина кабелю зі струмом $I_p = 65$ А складає $l = 0,32 + 2 \cdot 0,4 = 1,12$ км.

$$\text{Довжина кабелю зі струмом } I_p = 40 \text{ А} \quad l = 0,18 + 2 \cdot 0,4 = 0,98 \text{ км.}$$

$$\text{Довжина кабелю зі струмом } I_p = 26 \text{ А} \quad l = 0,12 + 2 \cdot 0,4 = 0,92 \text{ км.}$$

$$P_m = 3 \cdot 38^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 65^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 1,12 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 40^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 26^2 \cdot 0,443 \cdot 2 \cdot 0,92 \cdot 10^{-3} = 22,54 \text{ кВт}$$

$$C_{\text{втр}} = 10,23 \cdot 22,54 \cdot 4728,6 = 1090340 \text{ грн.}$$

Подальший розрахунок витрат по варіантах наведених в Табл. 5.1-5.3

						Арх.
						27
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 – Розрахунок капітальних вкладень

варіант	Елементи схеми	Кількість довжина	Вартість, од.тис.грн.	Вартість всього тис.грн.
1	Шкаф серії КРУ, з вимикачем 10кВ на РП-2	17	36	612
	НАМИТ-10	2	30	60
	Тр-р власних потреб	2	31	62
	Кабель ААШВ- 185 ,км	0,8	127	101,6
	Траншея,км	0,4	26,4	10,56
	Кабель ААШВ- 70 ,км	1,8	100	180
	Траншея,км	0,9	26,8	24,12
	Всього			1050,28
2	Шкаф з вимикачем ВР-1-10.кВ на ГПП	14	36	504
	Кабель ААШВ- 70 ,км	7,4	100	740
	Траншея,км	3,7	26,8	99,16
	Всього			1343,16

Таблиця 5.2 – Розрахунок поточних витрат

варіант	Елементи схеми	К _ж , тис.грн.	Р _а , %	С _{а_ж} , тис.грн.	Р _з , тис.грн.	С _{з_ж} , тис.грн.	С _ж , тис.грн.
1	Шкаф серії КРУ, на РП-2	734	15	110,1	5	36,7	146,8
	Кабельна лінія з урахуванням траншеї	316,3	5	15,82	5	15,82	31,63
	Всього						178,43
2	Шкаф серії КРУ, з вимикачем на ГПП	504	15	75,6	5	25,2	100,8
	Кабельна лінія з урахуванням траншеї	839,2	5	41,96	5	41,96	83,92
	Всього						184,72

Таблиця 5.3 – Техніко-економічні показники варіантів

Показники	Варіант	
	1	2
Капітальні вкладення, тис.грн.	1050,28	1343,2
Поточні витрати, тис.грн.	178,4	184,7
Вартість втрат електроенергії, тис.грн.	1136,8	1090,3
Приведені витрати, тис.грн.	1341	1486,2

Техніко-економічні порівняння варіантів дає можливість обрати варіант І, тобто спорудження РП-2 на території групи цехів ливарного виробництва ФНК.

6. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

6.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

На шинах 10 кВ РП-2 передбачають підтримувати $\tan \varphi = 0,15$.

Визначимо реактивне навантаження на шинах 10 кВ без врахування компенсації

$$Q_{0,4} = Q_{p0,4} + Q_{po} = 1765,7 + 202 = 1967,7 \text{ кВар}$$

$$Q_{10} = Q_{0,4} + \Delta Q_{mp} + Q_{p10} = 1967,7 + 187,8 + 1803,6 = 3959,1 \text{ кВар}$$

Реактивні втрати в трансформаторах ΔQ_{mp} складають:

$$\Delta Q_{mp} = \left(\frac{U_{\kappa\%}}{100} \cdot \frac{S^2}{S_n} + \frac{I_{xx\%}}{100} \cdot S_n \right) \cdot n = \left(\frac{5,5}{100} \cdot 0,7^2 \cdot 1000 + \frac{2}{100} \cdot 1000 \right) \cdot 16 = 751 \text{ кВар}$$

Тоді у відповідності з (6. 1)

$$Q_{ky} = 3959,1 - 7754,1 \cdot 0,15 = 2796 \text{ кВар}$$

Мінімально можлива кількість трансформаторів

$$N_0 = \frac{P}{\beta \cdot S_n} = \frac{2596,6}{0,7 \cdot 1000} = 3,7 \approx 4 \text{ шт.}$$

де P - активна споживання в мережах до 1 кВ ($P_{04}=10578,7$ кВт)

Величини Z_{1n} і $Z_{1\kappa}$ визначаються за формулами:

$$Z_{1\kappa} = E \cdot K_{\kappa\kappa} \cdot \left(\frac{U_{* \kappa\kappa}}{U_*} \right)^2 + C_0 \cdot \Delta P_{\kappa\kappa} \quad (6.1)$$

$$Z_{1n} = E \cdot K_{\kappa n} \cdot \left(\frac{U_{* \kappa\kappa}}{U_*} \right)^2 + C_0 \cdot \Delta P_{\kappa n} \quad (6.2)$$

Визначаємо питому вартість втрат по тарифу на електроенергію:

$$C_0 = C'_0 \cdot \tau_m = 10,23 \cdot 4728,6 = 48373 \text{ грн.}$$

грн

						Арх.
						30
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо $3_{1н}$ і $3_{1б}$ по (6.1) і (6.2) з урахуванням $U_{бк}=1,05$ для напруги 10 кВ, $U_{бк}=1$ для напруги 0,4 кВ, $U=1$, $C_o = 10,23$ тис. грн./мВт

$$3_{1б} = 0,32 \cdot 18 \left(\frac{1,05}{1} \right)^2 + 48,373 \cdot 2,5 = 127,3 \text{ тис.грн./кВар}$$

$$3_{1н} = 0,32 \cdot 36 \left(\frac{1}{1} \right)^2 + 48,373 \cdot 4,5 = 229,2 \text{ тис.грн./кВар}$$

Втрати активної потужності в трансформаторах РП-2

$$\Delta P_{mn} = \frac{Q_1^2}{U_{ном}^2} R_{тр\Sigma}, \quad (6.3)$$

$$\text{де } R_{mp\Sigma} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{ном}^2}{N \cdot S_{ном}^2} = \frac{12,2 \cdot 10^2}{N \cdot 1000^2} = \frac{12,2}{N} \cdot 10^{-4}$$

ВАРІАНТ I

Передбачається встановлення трансформаторів $S_n=1000$ кВ А із коефіцієнтом завантаження 0,7

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_n)^2 - P^2} \quad (6.3)$$

Тоді по (6.4)

$$Q_1 = \sqrt{(4 \cdot 0,7 \cdot 1,0)^2 - 2,597^2} = 1,048 \text{ мВар}$$

Потужність конденсаторних батарей на 0,4 кВ:

$$Q_{кн} = Q_{р0,4} - Q_1 = 1,9677 - 1,048 = 0,92 \text{ мВар}$$

Потужність компенсації на 10 кВ:

$$Q_{кв} = Q_{кв} - Q_{кн} = 2,796 - 0,92 = 1,876 \text{ мВар}$$

Синхронні двигуни заводу можуть видавати реактивну потужність.

Для двигунів СТД $P_n = 1000$ кВт, $\eta = 0,96$, $n = 3000$ об./хв., $\cos \varphi = 0,9$ максимум генеруючої потужності складатиме

$$Q_m = 2 \frac{\alpha_n P_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n} = 2 \frac{1,27 \cdot 1000 \cdot 0,484}{0,96} = 1280 \text{ кВар}$$

$$\text{де } \alpha_n = 1,27$$

Відповідно до (6.3) маємо

$$\Delta P_{тр} = \frac{1048^2}{10^2} \cdot \frac{12,2}{4} \cdot 10^{-4} = 8,435 \text{ кВт},$$

						Арх.
						31
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді відповідно витрати складають

$$Z_1 = 0,32 \cdot 229,2 + 0,596 \cdot 57,1 + 8,435 \cdot 48,373 = 695 \text{ тис. грн.}$$

Табл.6.1 Порівняння варіантів компенсації реактивної потужності

Кількість тр-рів	Q_1	$Q_{кн}$	$Q_{кв}$, мВар		K_T	$\Delta P_{ТП}$	Z
шт.	мВар	мВар	$Q_{БК}$	$Q_{СД}$	тис.грн.	кВт	тис.грн.
4	1,0477	0,920	0,596	1,2800	-	8,435	694,741
5	2,347	0,000	1,516	1,280	120,000	33,859	1869,156
6	3,301	0,000	1,516	1,280	210,000	55,829	2960,643

Обираємо варіант 1 $N = 4$ трансформатора, $Q_{кн} = 920$ кВар, $Q_{СД} = 1276$ кВар, $Q_{кв.БК} = 600$ кВар.

Обираємо варіант 1 $N = 16$ трансформаторів, $Q_{кн} = 5770$ кВар, $Q_{кв} = 2842$ кВар.

6.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності

На РП-2 феронікелевого комбінату у відповідності з виконаним розрахунком встановлюємо прилади компенсації 2х300 кВар типу УК-10-300/1У, $Q_{СД} = 1276$ кВар.

Для компенсації на низькій стороні обираємо комплектні конденсаторні прилади тип УК-0,38-230Н, 4 штуки.

Потужність КП на 0,4 кВ складає

$$Q_{кн} = 4 \cdot 230 = 920 \text{ кВар}; \quad Q_{кв.БК} = 600 \text{ кВар}; \quad Q_{СД} = 1276 \text{ кВар}$$

Таблиця 6.2 Вибір кількості і місця розташування КП на 0,4 кВ

Номер КТП	Кількість тр-рів	$S_{н.тр}$, кВА	$Q_{ку}$, кВА	Місце встановлення
КТП-1	2	1000	2 х 230	На шинах 0,4 кВ ТП
КТП-2	2	1000	2 х 230	На шинах 0,4 кВ ТП

						Арх.
						32
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

7. ВИБІР КІЛЬКОСТІ, ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Кількість трансформаторів цехових ТП визначається вимогами до надійності електропостачання. З огляду на це, найбільш доцільним є варіант встановлення двох трансформаторів, що гарантує практично безперебійне живлення цеху.

Потужність окремих трансформаторів ТП обирається відповідно до питомої щільності навантаження.

$$S_{уд} = \frac{S_p}{F} = \frac{2596.6}{35880} < 0,2$$

При щільності навантаження до 0,2 кВА/м² доцільно використовувати трансформатори потужністю 1000 кВА.

Для визначення місця розміщення КТП при проєктуванні системи електропостачання на генеральний план наносять картограму навантажень. Цехові КТП встановлюють якомога ближче до центру електричних навантажень цеху.

Потужність трансформаторів обирають залежно від навантаження з урахуванням категорії надійності споживача.

Після цього трансформатори перевіряють на можливість аварійного перевантаження згідно з відповідним виразом:

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

У аварійному режимі відключаємо 3 категорію споживачів

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.1 Вибір потужності, кількості і місця розташування КТП та ТП

Номер п/ст	S _р , кВ А	S _{н.тр} , кВ А	Категорія беспереб.	тип тр-рів	К _з норм. реж.	К _з авар. реж.	п, кіль- кість	місце розташування
КТП-1	1517,7	1000	2,3	ТМЗ- 1000/10	0,76	1,52	2	Плавильний цех
КТП-2	1439,8	1000	2,3	ТМЗ- 1000/10	0,72	1,44	2	Компресорна
Пічні тр-ри:								
ТП-1	19000	20000	1	ЭОЦН- 20000/35	0,95	-	1	Плавильний цех
ТП-2	19000	20000	1	ЭОЦН- 20000/35	0,95	-	1	Плавильний цех

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

8.1 Розрахунок струмів коротких замикань

Розрахунок струмів КЗ виконаємо для однієї секції шин, наведеної на рис. 8.1.

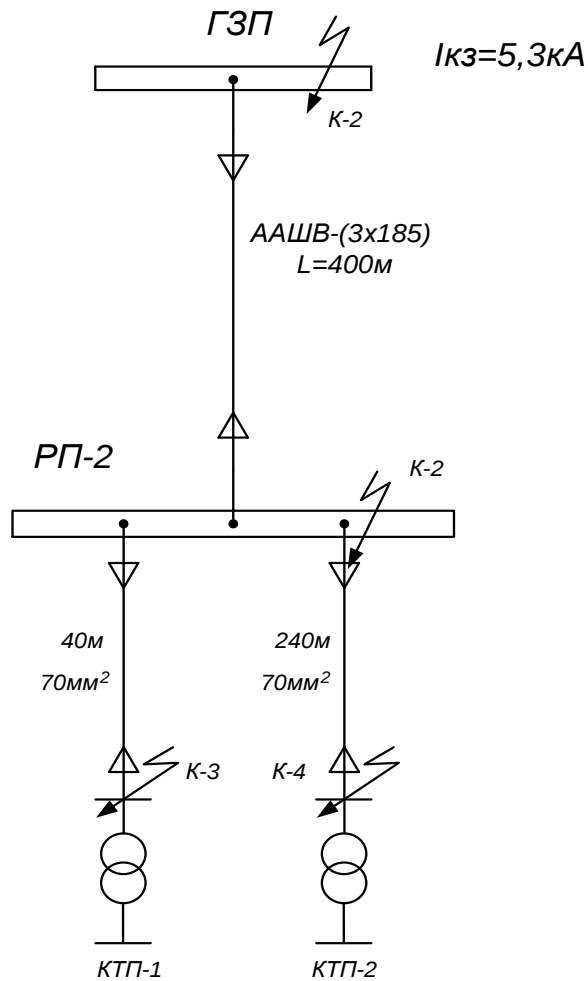


Рис.8.1 Вихідна схема до розрахунку струмів КЗ

Заздалегідь для живлення КТП-1,2 обираємо кабель ААШВ-70 мм² беручи до уваги перевірку на термічну стійкість (орієнтовно І_{кз} на шинах 10 кВ РП-2 - 7 кА).

Результати розрахунків приведені в Табл. 8.1 – 8.3

Таблиця 8.1-Розрахунок для схеми (рис.8.1)

Имя ЦП Режим -	R тр.ЦП НН [Ом]	Опір системи		Rсист (к НН ЦП) [Ом]	Xсист (к НН ЦП) [Ом]	Xсист (к НН ЦП) [Ом]	Xсист (к НН ЦП) [Ом]
		Х тр.ЦП НН MAX	Х тр.ЦП НН MIN				
		[Ом]	[Ом]				
ГПП	.020	.431	.496	.349	.303	.610	.682

Таблиця 8.2-Розрахунок для схеми (рис.8.1)

N п/п -	Начало -	Конец -	Струми КЗ в максимальному режимі			
			Z трассы (к Ун ВН) [Ом]	I кз 3-фазн. [кА]	I кз удар. [кА]	
1	00	ГПП	.371	1.072	5.2615	9.9525
2	ГЗП	РП-2	.437	1.103	4.9424	9.0001
3	РП-2	КТП-1	.455	1.106	4.8704	8.7790
	НН	КТП-1	.002	.009	22.9502	47.0563
4	РП-2	КТП-2	.544	1.123	4.5393	7.8228
	НН	КТП-2	.002	.009	22.6716	45.9573

Таблиця 8.3-Розрахунок для схеми (рис.8.1)

N п/п -	Начало -	Конец -	Струми КЗ в мінімальному режимі			
			Z трассы (к Ун ВН) [Ом]	I кз 3-фазн. [кА]	I кз 2-фазн. [кА]	
1	00	ГПП	.322	1.144	4.7508	4.1143
2	ГЗП	РП-2	.389	1.175	4.4769	3.8771
3	РП-2	КТП-1	.407	1.178	4.4140	3.8226
	НН	КТП-1	.002	.009	21.5393	18.6536
4	РП-2	КТП-2	.495	1.195	4.1240	3.5715
	НН	КТП-2	.002	.009	21.2798	18.4289

Визначимо струм підживлення від високовольтних двигунів, передбачаємо увімкнений секційний вимикач на РП-2.

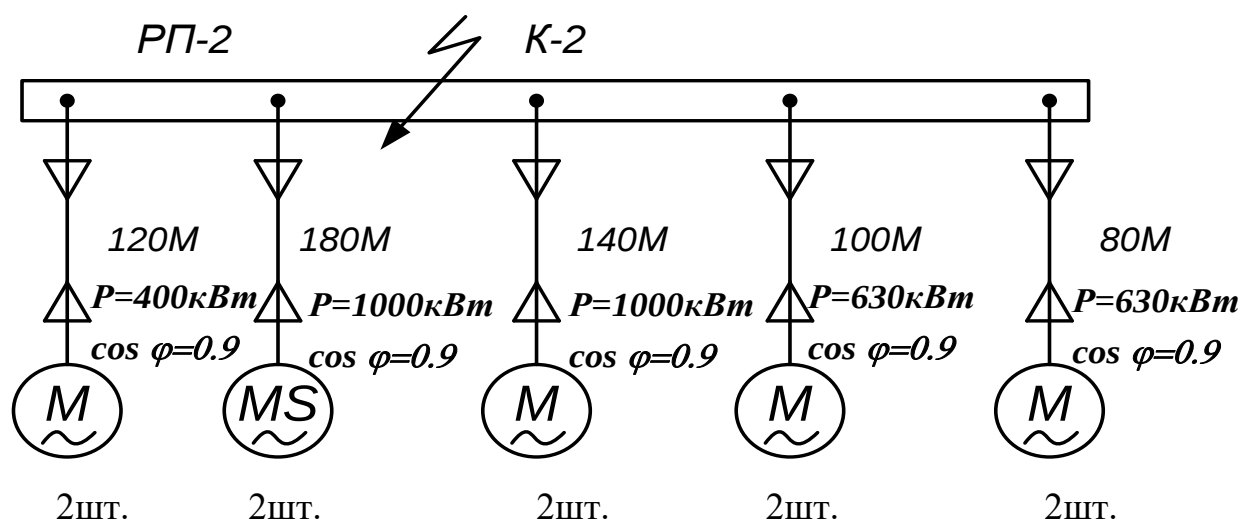


Рис. 8.2 Розрахункова схема для визначення струму підживлення.

Виконаємо розрахунок у відносних базових одиницях.

$$\text{Приймаємо } U_6 = 10 \text{ кВ} \quad S_6 = \frac{P_n}{\cos \varphi} = \frac{0.63}{0.9} = 0.7 \text{ MVA}$$

Опором $Z_{кл}$ можна знехтувати, оскільки $Z_{кл} \gg X_d$ при довжині кабелів менше 300 м.

Визначаємо параметри схеми заміщення рис. 8.3

Опір асинхронного двигуна $P_n = 630 \text{ кВт}$

$$X_{d*} = X_{d*n} \frac{S_6}{S_n} = 0.2 \frac{0.7}{0.7} = 0.2$$

$$\text{Для АД } P_n = 1000 \text{ кВт} \quad X_{d*} = 0.2 \frac{0.7 \cdot 0.9}{1} = 0.126,$$

$$\text{Для АД } P_n = 400 \text{ кВт} \quad X_{d*} = 0.2 \frac{0.7 \cdot 0.9}{0.4} = 0.315,$$

де $X_{d*n} = 0.2$ (табл. 5.1 [5])

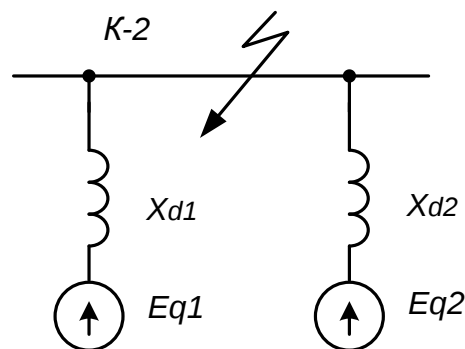


Рис. 8.3. Схема заміщення

Тоді еквівалентний опір асинхронних двигунів (8 шт.)

$$X_{d2} = \frac{1}{\frac{2}{0.2} + \frac{2}{0.126} + \frac{2}{0.315}} = 0.031$$

						Арх.
						37
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для синхронних двигунів $P_H = 1000$ кВт

$$X_{d1} = \frac{1}{2} X_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{1}{2} 0,2 \frac{0,7 \cdot 0,9}{1} = 0,063$$

Для синхронного двигуна $E_{q1} = 1,1$, для асинхронного двигуна

$$E_{q2} = 0,9$$

Визначимо струм КЗ:

$$I_{CD} = \frac{E_{q1}}{X_{d1}} I_{\delta} = \frac{E_{q1}}{X_{d1}} \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta}} = \frac{1,1}{0,063} \frac{0,7}{\sqrt{310}} = 0,71 \text{ кА}$$

$$I_{AD} = \frac{E_{q2}}{x_{d2}} \cdot I_{\delta} = \frac{0,9}{0,031 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 1,17 \text{ кА}$$

Сумарний струм на шинах РП-2 з урахуванням підживлення в точці К-2 складатиме:

$$I_{\Sigma} = I'' + I_{CD} + I_{AD} = 4,94 + 0,71 + 1,17 = 6,82 \text{ кА}$$

У відповідності з [5, рис. 5,15] для синхронного двигуна $K_{уд} = 1,87$

для асинхронного двигуна $K_{уд} = 1,56$

$$i_{уд. CD} = \sqrt{2} K_{уд} \cdot I_{CD} = \sqrt{2} \cdot 1,87 \cdot 0,71 = 1,87 \text{ кА}$$

$$i_{уд. AD} = \sqrt{2} K_{уд} \cdot I_{AD} = \sqrt{2} \cdot 1,56 \cdot 1,17 = 2,57 \text{ кА}$$

Ударний струм в точці К-2 (див. рис. 6.1) складатиме

$$i_{уд \Sigma} = i_{уд} + i_{уд CD} + i_{уд AD} = 9,0 + 1,87 + 2,57 = 13,44 \text{ кА}$$

Визначимо еквівалентне значення постійної часу затухання аперіодичної складової струму:

$$T_{a_{\Sigma}} = \frac{T_{a_{сис}} \cdot I'' + T_{a_{CD}} \cdot I_{CD} + T_{a_{AD}} \cdot I_{AD}}{I_{\Sigma}} = \frac{0,033 \cdot 4,94 + 0,04 \cdot 0,71 + 0,04 \cdot 1,17}{6,82} = 0,035 \text{ с}$$

$$\text{Де } T_{a_{CD}} = 0,04$$

$$T_{a_{сис}} = 0,033$$

$$T_{a_{AD}} = 0,04$$

						Арх.
						38
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

8.2 Вибір високовольтного обладнання та пристроїв силових мереж

Вибір вимикачів на РП-2 ливарного корпусу виконаний в додатку А (табл. А.1).

Для цього визначимо необхідні розрахункові величини:

$$I_{роб.фрс} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{7840,9}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 431,6 A$$

Зверхперехідний струм КЗ

$$I'' = 6,82 \text{ кА (див. розд. 6.1).}$$

Ударний струм КЗ

$$I_{уд} = 13,44 \text{ кА}$$

$$T_a = 0,035 \text{ с.}$$

Аперіодична складова струму КЗ

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 6,82 \cdot e^{-\frac{0,11}{0,035}} = 0,42 \text{ кА,}$$

де

$$\tau = t_{\epsilon} + t_{p.з. \min} = 0,1 + 0,01 = 0,11 \text{ с}$$

Тепловий імпульс при умові $t_{відкл} > T_a$ визначаємо по формулі

$$W_k = I''^2 \cdot (t_{відкл} + T_a) = 6,82^2 \cdot (1,5 + 0,035) = 71,4 \text{ (кА)}^2 \text{ с.}$$

де $t_{відкл.} = 1,5 \text{ с}$ – час спрацювання ввідного вимикача і захисту.

						Арх.
						39
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибираємо запобіжник для захисту ТВП (додаток А, табл.А.2). Номінальний струм ТВП типу ТМ-60/10 рівний

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 10} = 3,47 \text{ А}$$

Вибір перетину жил кабелів виконуємо з урахуванням економічних міркувань табл. 8.4.

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{24,9 \cdot 10^3}}{91} = 55 \text{ мм}^2$$

де $C = 91$ для алюмінію.

Для $t_{\text{відкл}} = 0,5 \text{ с}$

$$B_k = I''^2 \cdot (t_{\text{відкл}} + T_a) = 6,82^2 \cdot (0,5 + 0,035) = 24,9 (\text{кА})^2 \text{ с}$$

Вибір трансформаторів струму та напруги для мереж РЗ та А. виконуємо в додатку А (таблиці А.3-А.8).

						Арх.
						40
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Табл.8.4 Вибір перетину жил високовольтних кабелів

№ п/п	Кабельна лінія	Потужність		I _{ав} , А	Перетин, мм ² вибраний по			Прийнято мм ²	Примітки
		S,кВ А	I, А		J _{эк}	I _{доп}	F _{min}		
1	Від ГПП-2 до РП-2	7840,9	215,8	215,8	185	95	70	185	2 кабеля марки ААШВ
2	Від РП-2 до КТП-1	1579,5	43,5	87,0	50	25	70	70	2кабеля марки ААШВ
3	Від РП-2 до КТП-2	1486	40,9	81,8	50	25	70	70	2кабеля марки ААШВ
4	Від РП-2 до СД 1000кВт	1111	61,2	61,2	70	35	70	70	1кабеля марки ААШВ
5	Від РП-2 до АД 1000кВт	1111	61,2	61,2	70	35	70	70	1кабеля марки ААШВ
6	Від РП-2 до АД 630кВт	700	38,5	38,5	35	25	70	70	1 кабел марки ААШВ
7	Від РП-2 до АД 400кВт	444	24,4	24,4	25	25	70	70	1 кабел марки ААШВ

9. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ РУДОТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ ФЕРОНІКЕЛЕВОМУ КОМБІНАТІ

Споживання електроенергії на виробництво 1 тонни продукції і встановлена потужність печі залежать не лише від особливостей технологічного процесу (сировини, що переробляється, складу шихти та проводів, технічного стану футировки, кваліфікації обслуговуючого персоналу, інтервалу простою), а й від правильного вибору електричного режиму роботи. Електричний режим регулюється змінюванням напруги чи довжини, а отже – і сили струму дуги.

Перший метод застосовується лише кілька разів протягом плавки – під час переходу між різними стадіями.

Другий метод дає змогу плавно і постійно регулювати робочий режим, змінюючи положення електродів через систему автоматичного контролю, яка підтримує фазні струми печі в заданих межах.

Оскільки управління рудотермічними печами (РТП) здебільшого здійснюється завдяки змінам довжини дуги і зміною напруги; відповідно змінюється і струм, важливо розглянути залежність основних режимних характеристик (активної та повної потужності, втрат енергії, електричного ККД, коефіцієнта потужності) від струму. Такі співвідношення визначаються на основі схем заміщення, і отримані їх описують як електричні характеристики.

9.1 Електричні параметри РТП

З точки зору електротехніки апарат РТП можна аналізувати як комбінацію активних та індуктивних опорів, які підключаються послідовно до напруги низьковольтової сторони трансформатора. Для цього всі опори, що належать високовольтному боці, мають бути зведені до низьковольтової сторони, скорочуючи їх у n разів.

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Де n – це коефіцієнт трансформації трансформатора. Серед таких опорів особливо важливим є індуктивний опір реактора. Власний опір трансформатора також має бути приведений до низьковольтної сторони.

Якщо приймати РТП за симетричну трифазну систему, то її електричну модель можливо представити у вигляді еквівалентного однофазного кола з підключеними послідовно до фазної вторинної напруги $U_{2\phi}$ активними й індуктивними опорами: (значеннями x_0 і r_0 можна зневажити); складовими індуктивного і активного опору трансформатора— x_{T1} , x_{T2} , r_{T1} , r_{T2} ; а також індуктивний і активний опори короткої лінії – x_{kc} і r_{kc} ; опір дуги R_d , котрий розглядається як чисто активний (рис. 9.1); R_d допускає зміни, тоді як інші взято сталі. Тому для спрощення усі індуктивні та активні опори підсумовують, позначаючи загальний активний опір як $r_{екв}$, а індуктивний сумарний — як $x_{екв}$.

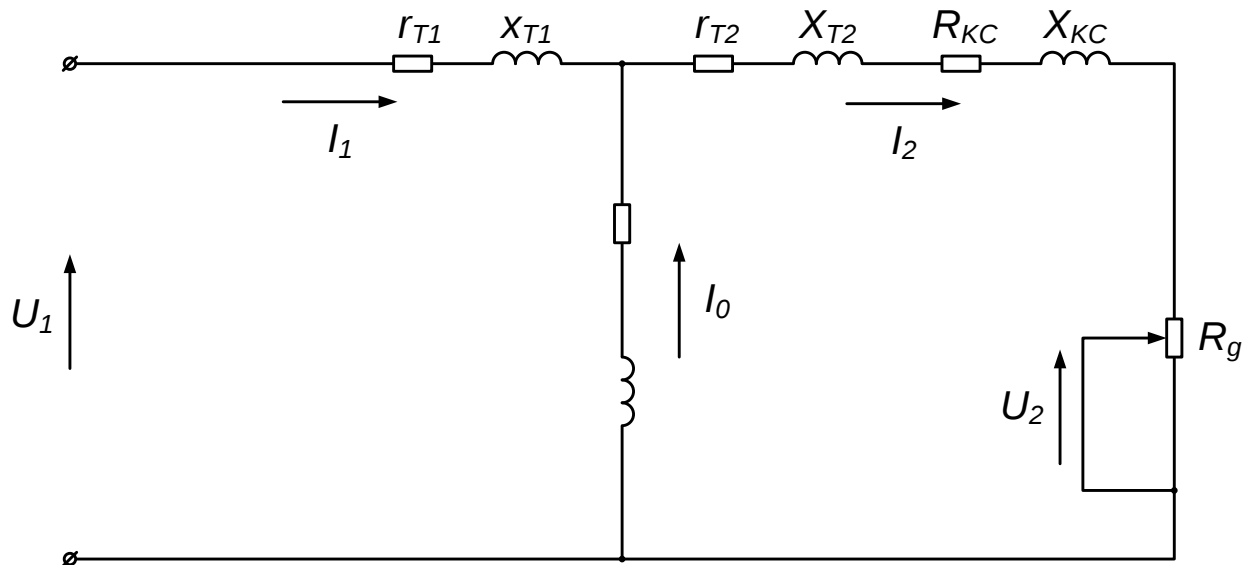


Рис. 9.1 Повна схема заміщення печі.

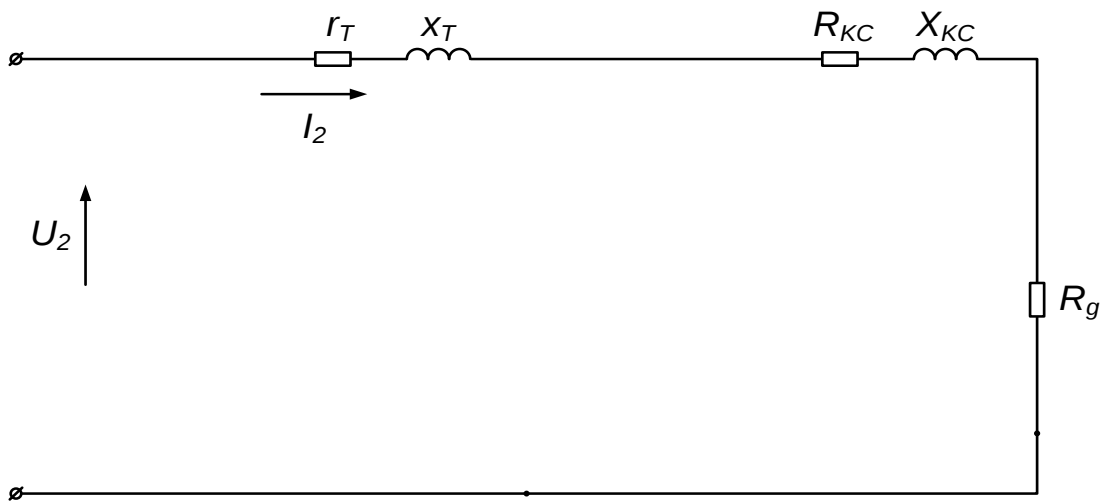


Рис.9.2 Узагальнена схема заміщення.

Всі електричні опори схеми заміщення зводять до сторони вторинної обмотки трансформатора. При цьому опір дуги змінюється від $R_d = \infty$ при струмі х.х., аж до $R_d = 0$ за короткого замкнення $I_2 = I_{K3}$

Основні технічні параметри печі:

Номінальна потужність трансформатора печі $S_{HT} = 20000$ кВА;

Вторинна лінійна напруга при х.х. $U_{KK} = 600$ В;

Значення активного опору трансформатора $r_T = 2,0 \cdot 10^{-4}$ Ом;

Індуктивний опір трансформатора $X_T = 23,4 \cdot 10^{-4}$ Ом;

Активний опір короткої електричної мережі $r_{KC} = 2,9 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Значення індуктивного опору короткої мережі $X_{KC} = 22,5 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Для графічного зображення електричних характеристик приймаємо значення сили струму

I_2 у діапазоні від 0 до I_{2K}

$$I_{2K} = \frac{U_{\phi 2}}{\sqrt{r_{eKB}^2 + x_{eKB}^2}}, \quad (9.1)$$

де $r_{eKB} = r_T + r_{KC} = 2,0 \cdot 10^{-4} + 2,9 \cdot 10^{-4} = 4,9 \cdot 10^{-4}$ Ом;

$x_{eKB} = X_T + X_{KC} = 23,4 \cdot 10^{-4} + 22,5 \cdot 10^{-4} = 45,9 \cdot 10^{-4}$ Ом.

В такому разі відповідно до (9.1)

$$I_2 = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(4,9 \cdot 10^{-4})^2 + (45,9 \cdot 10^{-4})^2}} = 75,1 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{екв}} = 46,16 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Для заданих струмів розраховують такі параметри:

1) питомі втрати електричної енергії $\Delta P_{\text{ел}}$

$$\Delta P_{\text{ел}} = 3 \cdot I_2^2 \cdot (R_T + R_{\text{кк}}) = 3 \cdot I_2^2 \cdot r_{\text{екв}}, \quad (9.2)$$

2) активна потужність печі P_a

$$P_a = 3 \cdot I_2 \cdot \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_2 \cdot x_{\text{екв}})^2}, \quad (9.3)$$

3) корисна потужність, яку виділяє дуга, $P_{\text{кор}}$

$$P_{\text{кор}} = P_a - P_{\text{ел}}, \quad (9.4)$$

4) електричний к.к.д. печі $\eta_{\text{ел}}$

$$\eta_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{кор}}}{P_a}, \quad (9.5)$$

5) коефіцієнт корисної дії потужності печі $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{S}, \quad (9.6)$$

6) загальну потужність печі $S_{\text{п}}$

$$S = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_2, \quad (9.7)$$

Результати обчислень за формулами (9.2) – (9.7) заносимо до таблиці 9.1

Таблиця 9.1 Результати обчислення електричних характеристик РТП

I_2 , кА	10	20	30	40	50	60	70
$\Delta P_{\text{ел}}$, кВт	300	600	1300	2300	3600	5200	7000
P_a , кВт	4800	9500	13500	17000	18800	18500	13800
$P_{\text{кор}}$, кВт	4300	8800	12400	14500	15300	13500	6500
$\eta_{\text{ел}}$	0,98	0,96	0,94	0,87	0,83	0,74	0,55
$\cos \varphi$	0,99	0,97	0,96	0,85	0,76	0,63	0,4

Згідно з Табл. 9.1 будуємо відповідні залежності:

$$P_a = f(I_2), P_{\text{кор}} = f(I_2), \eta_{\text{ел}} = f(I_2), \cos \varphi = f(I_2), \Delta P_{\text{ел}} = f(I_2),$$

які зображені на Рис. 9.3

Дослідження електричних характеристик є підґрунтям для коректного налаштування електричних режимів. Найбільш стабільний електричний режим

відповідає експлуатації у зростаючій лівій області функції $P_{кор}$ у максимальній точці $I_2 \approx 35$ кА.

9.2 Експлуатаційні характеристики РТП

Для оптимального встановлення режиму самих електричних характеристик недостатньо, оскільки РТП як технологічна установка найперше оцінюється питомими витратами електроенергії та продуктивністю. Через це вибір оптимального режиму здійснюють за виробничими характеристиками, які є спільними характеристиками як електричними, так і технологічними. Робочі характеристики не залежать тільки від значення струму в дузі печі :

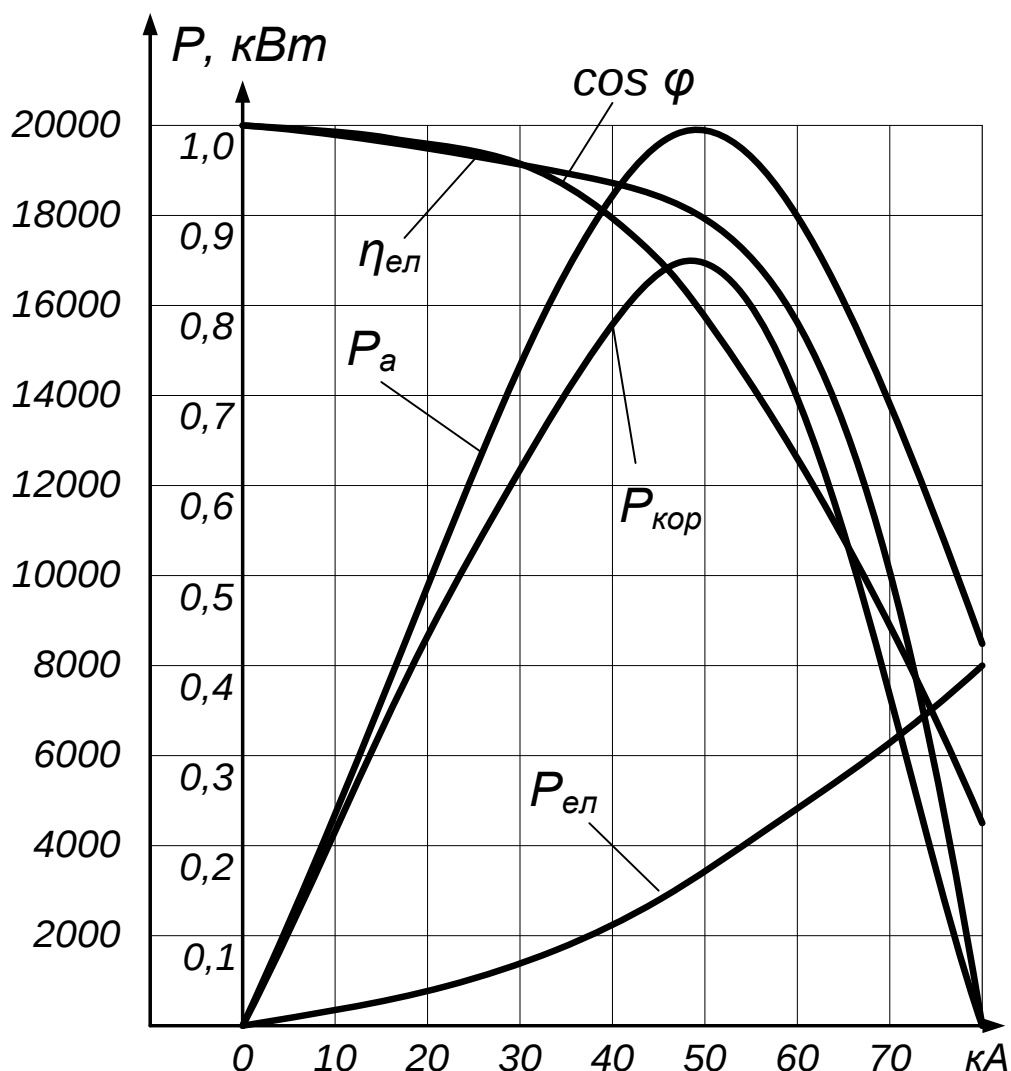


Рис.9.3 Електричні характеристики РТП.

- питомої витрати електроенергії $W_{\text{пит}}, \text{кВт}\cdot\text{год}/\text{Т};$
- годинного виробітку печі $g, \text{Т}/\text{год};$
- часу плавлення 1 т огарка $\tau, \text{год.}/\text{Т};$
- повного ККД. печі $\eta.$

Виріток на годину обчислюється у відповідності до формули

$$g = \frac{P_{\text{кор}}}{a_T}, \quad (9.8)$$

де $a_T = 680 \text{ кВт год}/\text{Т}$ теоретично необхідна питома кількість електроенергії, яка потрібна для плавлення 1 тонни огарка.

Питомі енергозатрати обчислюють, виходячи з:

$$W_{\text{пит}} = \frac{P_a}{g}, \quad (9.9)$$

Тривалість плавлення визначається виразом

$$\tau = \frac{1}{g}, \quad (9.10)$$

Загальний ККД печі

$$\eta = \frac{680}{W_{\text{пит}}}, \quad (9.11)$$

Обчислення за формулами (9.8) – (9.11) для відповідних значень струму I_2 зводяться у таблицю 9.2

Таблиця 9.2 Розрахункові дані робочих характеристик РТП

$I_2, \text{кА}$	10	20	30	40	50	60	70
$g, \text{Т}/\text{год.}$	6,3	12,9	18,2	21,3	22,5	19,9	9,6
$W_{\text{пит}}, \text{кВт}\cdot\text{год.}/\text{Т}$	762	736	742	798	836	930	1438
$\tau, \text{год.}/\text{Т}$	0,16	0,08	0,05	0,05	0,04	0,05	0,1
η	0,89	0,92	0,92	0,85	0,82	0,73	0,47

На основі отриманих даних Табл. 9.2 будуюмо експлуатаційні характеристики, які зображені на Рис. 9.4

Розгляд експлуатаційних характеристик за рис.9.4 свідчить, що перевищення струму, яке перевищує максимум корисної потужності печі (I_2), економічно недоцільно, оскільки це призводить до збільшення електричних витрат, а продуктивності (g) і загального ККД. (η) знижуються.

Як видно, робочий діапазон режимів істотно вужчий, ніж електричний (Рис. 9.4). Крива питомих енергозатрат досягає мінімуму при струмі I_2' , цьому значенню відповідає максимум ККД. Продуктивність стає максимальною при іншому струмі I_2'' , котрий відповідає мінімальному часу плавлення огарка.

У підсумку, оптимальна величина струму K_{opt} лежить в зазначених межах.

$$I_2' < I_{2opt} < I_2''$$

Якщо частка електроенергії у структурі витрат вагома, то K_{opt} визначають ближче до I_2' , а коли вона незначна — ближче до I_2'' .

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		48

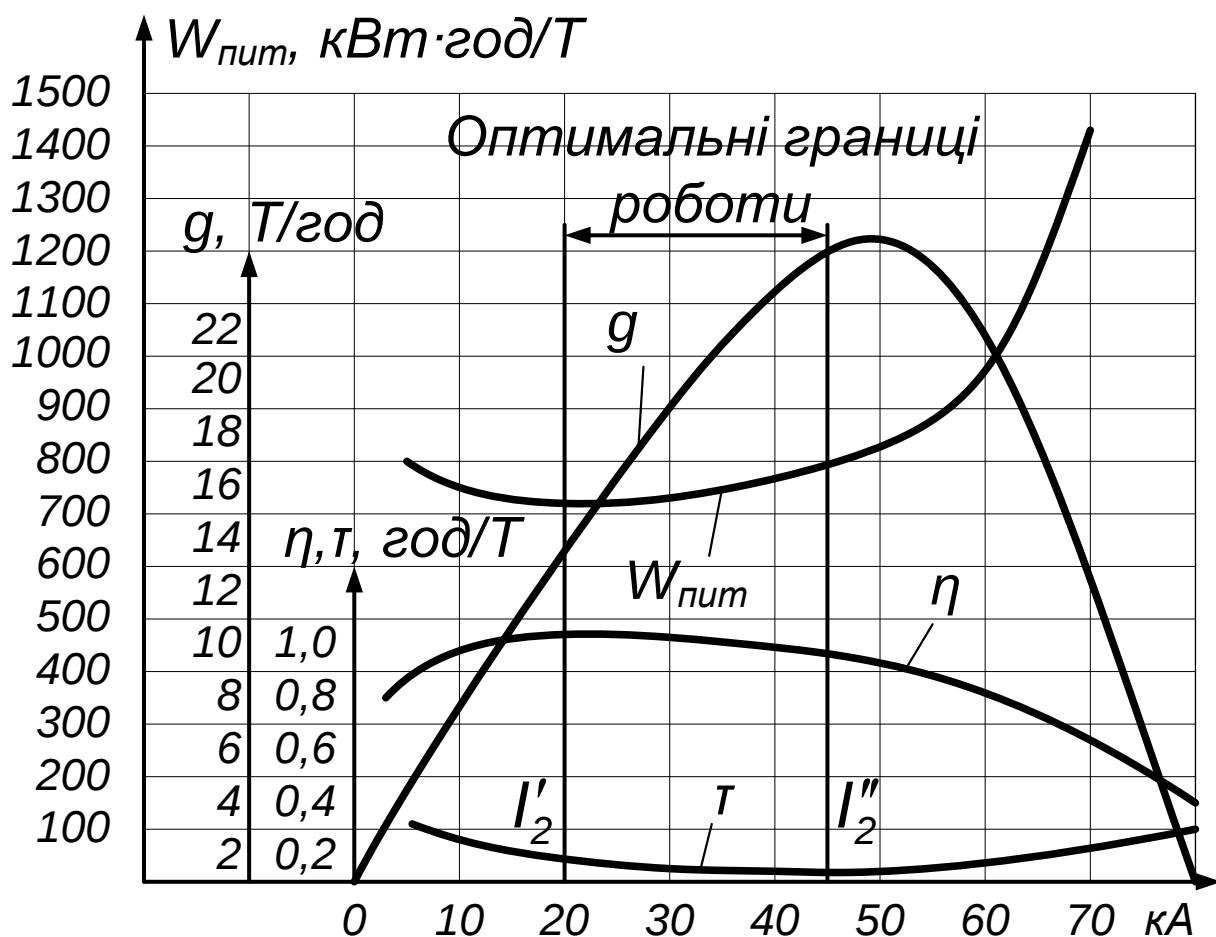


Рис.9.4 Робочі характеристики РТП.

9.3 Автоматичне налаштування режиму РТП

У руднотермічних печах із закритою дугою вихід електричного режиму за межі встановленого значення викликає помітні рухи електродів. Це може спричинити обвалювання тигля чи дестабілізувати плавку. Внаслідок цього погіршуються виробничо-економічні показники роботи. Для того, щоб скоротити амплітуду переміщення електродів без зменшення продуктивності, застосовують можливість регулювати потужність печі за допомогою трансформатора. При змінюванні напруги подачі можна змінювати не тільки загальне навантаження печі, але і регулювати розподіл потужності у ванні, тобто керувати тепловим режимом більш гнучко.

На печах із закритою дугою регулювання рівнів напруги трансформатора проводять, якщо струм електрода досягає визначеного максимального відхилення або якщо електродотримач підходить до крайнього положення (межі зони роботи), а також коли температура газів чи тиск під сводом перевищують допускаємі межі.

У дугових печах для плавки сталі опір навантаження (дуги) змінюється від 0 (коротке замикання) до (дуга розірвана), тож для РТП важлива робота по стабілізації електричного режиму.

Найбільш нестійкий режим функціонування РТП спостерігається під час плавки металу (див. рис. 9.5).

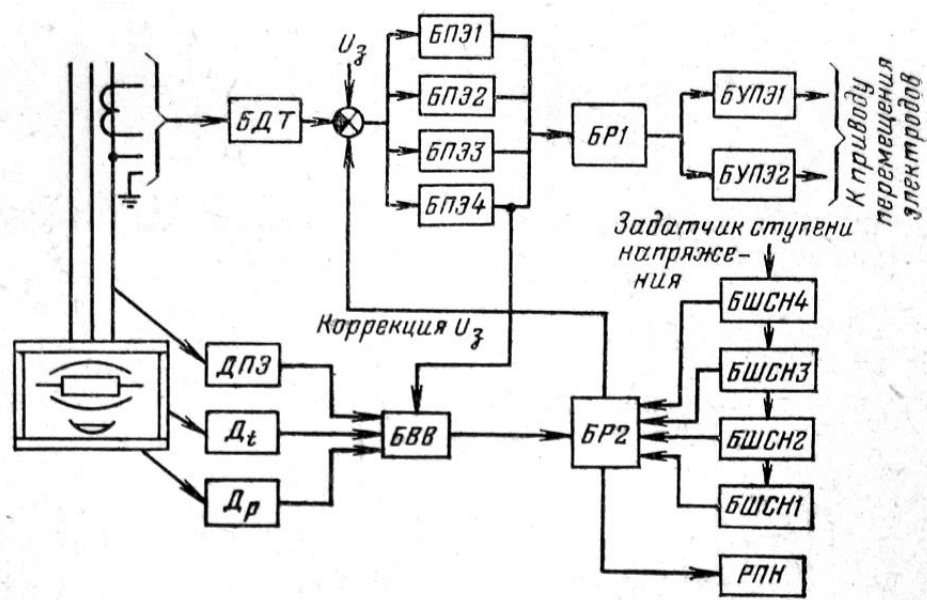


Рис. 9.5. Структурна схема регулятора APP-1-23У4 (для однієї фази).

Регулятори серії APP-1

З метою забезпечення вимог РТП різних моделей було розроблено серію автоматичних регуляторів типу APP-1.

Ця серія охоплює моделі з різноманітними наборами регульованих параметрів і варіантів впливу — для більшості печей різного призначення, нових і вже працюючих, для гідравлічного й електромеханічного підйому електродів.

Аббревіатура регулятора розшифровується наступним чином: А – автоматичний; Р – регулятор; Р – рудотермічних печей; 1 — номер модифікації приладу.

Перша цифра після індексу вказує на набір параметрів контролю і впливу:

1 – струми електродів з регулюванням переміщення електродів;

2 – струми електродів із впливом на переміщення електродів та регулюванням ступенів напруги;

3 – активний опір і провідність «електрод – подина» із впливом на переміщення електродів, а також активна потужність печі зі зміною ступенів напруги;

4 – струми електродів та активна потужність із впливом на переміщення електродів і налаштуванням напруги.

Наступна цифра визначає число електродів (3 або 6); літера (У або Т) - кліматична категорія; остання цифра — конструктивна модифікація.

Приміром, регулятор для трьохелектродної печі для виробництва фосфору позначають як: АРР-1-43У4.

На рис.9.5 показана структурна схема однієї фази регулятора АРР-1-43У4.

Принцип роботи регулятора наступний.

Вихідний сигнал трансформатора струму надходить у модуль БУПЕ1 (датчик струму). Цей модуль забезпечує узгодження, випрямлення й згладжування сигналу, після чого відбувається порівняння з опорною напругою (завдання), яка подається стабілізованим джерелом чи програмним пристроєм. Різниця напруги (невідповідності) проходить випрямлення і згладжування й далі спрямовується на граничні елементи БПЕ1, БПЕ3, які визначають наявність і знак неузгодженості.

Блок БПЕ1 встановлено на мінімальну зону нечутливості, яка налаштовується в діапазоні 2-6% від максимальної уставки;

БПЕ2 – на середню зону нечутливості в межах 6-10%;

						Арх.
						51
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

БПЕЗ – на 25-50% від максимальної уставки.

Від граничних елементів сигнал надходить до релейного блоку БР, при цьому з БПЕ1 з затримкою часу, яку можна регулювати в межах 0,5-10 с. Релейний блок формує команди для блоків керування рухом електродів БУПЕ1 і БУПЕ2. Коли блоку БУПЕ1 надходять сигнали неузгодженості для мінімальної або середньої зон нечутливості, спрацьовує гідрозолотник гідроприводу електродів, і електрод починає переміщатись з робочою швидкістю (приблизно 0,5 м/хв). При появі одночасних сигналів максимальної та середньої зон нечутливості від БУПЕ1 і БУПЕ2 запускаються два гідрозолотники, що забезпечує переміщення електродів із маршовою швидкістю (до 1,5 м/хв). Коли граничний елемент БПЕЗ спрацьовує, подається блокування на опускання електрода донизу.

Вибраний ступінь напруги закріплюється блоком шифратора БШСН4, а фактичне положення регулювання ступенів напруги фаз визначають шифратори БШСП1-БШСН3. У релейному блоці БР2 здійснюється порівняння заданого і фактичного положення РПН. Якщо виявлено неузгодженість, автоматично виконується регулювання напруги у потрібний бік.

Автоматичне регулювання рівнів напруги трансформатора електропечі також проводиться залежно від стану низки технологічних граничних параметрів із подальшим (після скасування обмеження) поверненням до заданого рівня напруги на всіх фазах. Якщо виникає випадковий перекид напруги між фазами, регулювання ступенів напруги зупиняється.

До граничних технологічних параметрів відносять: температуру відхідних газів; тиск під кришкою печі; положення електротримачів (робоча зона); струми електродів; а також інші величини, наприклад, стан електрофільтра газоочистки.

Якщо спрацьовує хоча б один із зазначених датчиків, із релейного блоку БР2 через ланку витримки часу БВВ надходить команда на зниження напруги. Перемикання напруги в більшу сторону можливе тоді, коли держач електрода одного з електродів опускається до нижньої межі заданої робочої зони, визначеної технологічними вимогами.

						Арх.
						52
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Для забезпечення стабільності струму на встановленому рівні під час регулювання ступенів напруги реалізована можливість коригування номінального струму відповідно до паспортних характеристик електропічного трансформатора або електрода.

9.3.1 Сучасні мікропроцесорні та програмно-логічні системи керування РТП

Описана вище аналогова система регулювання APP-1, побудована на дискретних блоках БДТ, БПЭ, БР, БУПЕ і БШСН, забезпечує надійне керування основними параметрами рудотермічної печі, однак має істотні принципові обмеження. Уставки зон нечутливості (2–6 %, 6–10 %, 25–50 %) задаються апаратно і не змінюються у процесі експлуатації, що унеможливорює адаптацію режиму до зміни складу шихти, відновного потенціалу коксу або зносу електродів. Відсутні засоби архівування технологічних подій, дистанційної діагностики та інтеграції з заводською інформаційною мережею. У зв'язку з цим у новітніх проектах модернізації РТП аналогова частина регулятора замінюється програмно-логічними контролерами (ПЛК) сучасних серій [12].

Типова архітектура мікропроцесорної системи керування РТП має три ієрархічні рівні. Нижній рівень утворюють польові датчики (трансформатори струму та напруги, термопари, тензометричні датчики тиску, оптичні пірометри, газоаналізатори) та модулі віддаленого вводу-виводу, що передають дискретні й аналогові сигнали по промисловій шині. Середній рівень представлений програмно-логічним контролером — найчастіше Siemens SIMATIC S7-1500, Allen-Bradley ControlLogix або Schneider Electric Modicon M580, — який реалізує усі функції попереднього APP-1 програмно, із суттєвим розширенням можливостей. Верхній рівень утворює система SCADA/HMI (Wonderware InTouch, Siemens WinCC, Ignition), що забезпечує візуалізацію режиму, реєстрацію подій, аварійну сигналізацію та звітність.

Передача даних між рівнями здійснюється через промислові протоколи Profinet, Modbus TCP та OPC UA, що замінюють розгалужені пучки сигнальних кабелів аналогової системи. Така зміна не лише знижує вартість монтажу, а й підвищує діагностовність — кожен датчик звітує про власний стан, тому

						Арх.
						53
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

помилкові показання виявляються алгоритмічно, до того, як вони спричинять помилкову реакцію регулятора.

Цифрова реалізація відкриває низку нових функцій, недоступних у АРР-1: адаптивна корекція уставок за поточним складом шихти; багатозонні режими захисту, що активуються в залежності від фази технологічного процесу (завантаження, плавлення, випуск); повне архівування технологічних подій із можливістю послідовного розслідування інцидентів; дистанційне оновлення алгоритмів керування. Інтеграція з системами рівня MES/ERP уможливорює автоматичний облік виплавленої продукції, спожитої електроенергії та витрат електродів у режимі реального часу, що дає основу для оптимізації собівартості на рівні підприємства.

Окремо слід відзначити вимоги до надійності. Сучасні ПЛК передбачають резервування на рівні центрального процесора (режим Hot Standby), джерел живлення та модулів вводу-виводу. У такій конфігурації коефіцієнт готовності системи перевищує 99,99 %, що відповідає вимогам безперервного металургійного процесу. У разі виявлення відмови основного процесора резервний переймає керування за час, що не перевищує одного циклу сканування (10–50 мс), без переривання роботи печі та втрати поточних уставок.

Для рудотермічних печей феронікелевого виробництва, де якість кінцевого продукту критично залежить від стабільності електричного режиму та оперативності реакції на коливання якості латеритної сировини, перехід від аналогового АРР-1 до сучасних ПЛК-систем розглядається як один із ключових резервів підвищення енергоефективності та зниження браку.

9.3.2 Алгоритми регулювання положення електродів

Релейний принцип роботи АРР-1, що базується на пороговому розпізнаванні зон нечутливості з фіксованими межами, є частковим випадком пропорційного регулятора з релейною характеристикою. Такий підхід не враховує нелінійності вольт-амперної характеристики дуги, сильного взаємозв'язку між фазами і дрейфу параметрів коксової шихти у часі. У сучасних мікропроцесорних регуляторах базовим алгоритмом регулювання струму електродів є пропорційно-

						Арх.
						54
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтегрально-диференційний (ПІД) закон, реалізований програмно. Однак практичний досвід показує, що класичний ПІД у застосуванні до трифазних РТП не забезпечує задовільної якості регулювання через міжфазну взаємодію — переміщення одного електрода змінює струми двох інших [13].

Для подолання міжфазної взаємодії застосовують адаптивні алгоритми з розділяючими (декомпозируючими) мережами. У роботі [13] описано нейроадаптивний регулятор PSD (пропорційно-сумарно-диференційний) із розділяючою матрицею, що в реальному часі підлаштовує коефіцієнти пропорційності, інтегрування та диференціювання під поточний стан печі та одночасно зменшує зв'язок між каналами фаз. Заявлене зменшення часу регулювання — у 1,8–2,3 рази порівняно з класичним ПІД.

Іншим напрямком є нечітке (fuzzy) керування. Класичний нечіткий ПІД-регулятор має постійну статичну похибку через відсутність інтегральної складової. Нелінійні нечіткі ПІД-регулятори усувають цей недолік, водночас зберігаючи здатність працювати з невизначеністю датчиків і нелінійностями дугового розряду.

Найновіші розробки використовують модельно-прогнозне керування (Model Predictive Control, MPC) — на основі попередньо ідентифікованої моделі печі алгоритм прогнозує її реакцію на кілька кроків керування вперед і вибирає таку послідовність уставок, яка мінімізує заданий критерій (наприклад, відхилення струмів від оптимальних значень при обмеженні швидкості переміщення електродів). У роботі [14] представлено систему керування на основі лінеаризації за зворотним зв'язком з пропорційно-інтегральним регулятором дробового порядку PID_μ , яка демонструє підвищену робастність до зміни параметрів печі внаслідок зносу футерівки чи зміни геометрії електродів.

Орієнтовні показники якості регулювання типової РТП для різних алгоритмів зведено в табл. 9.3.

						Арх.
						55
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Табл. 9.3. — Показники якості регулювання струму електродів РТП для різних алгоритмів керування.

Алгоритм	Час регулювання, с	Перерегулювання, %	Обчислювальні витрати	Робастність
Класичний ПД	4,5–6,0	12–18	низькі	низька
Нейроадаптивний PSD	2,0–2,5	4–7	середні	висока
Нечіткий ПД (fuzzy)	2,5–3,0	5–8	низькі–середні	середня
Модельно-прогнознiй MPC	1,5–2,0	1–3	високі	висока
Дробовий РІμ	2,0–2,8	3–6	середні	дуже висока

Найкращу швидкодiю та найменше перерегулювання забезпечує MPC, проте його впровадження вимагає попередньої iдентифікації моделі печі та обчислювальних ресурсів, доступних не на всіх підприємствах. Адаптивний PSD і дробовий РІμ є компромісним вибором для модернізації наявних регуляторів АРР-1 на діючих рудотермічних печах.

Для рудотермічних печей феронікелевого виробництва, які працюють зі змінним складом латеритної сировини й тому характеризуються істотним дрейфом електричних параметрів, перевагу мають саме адаптивні та модельно-прогнознi алгоритми, здатні зберігати оптимальний електричний режим без ручної корекції з боку оператора.

9.3.3 Компенсація реактивної потужності та якість електроенергії

Класичний АРР-1 розв'язує задачу підтримання заданого струму електродів, але не розглядає вплив печі на якість електроенергії у мережі живлення. Тим часом рудотермічна піч є одним з найскладніших навантажень загальнозаводської мережі: коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) звичайно становить 0,7–0,85, спектр споживаного струму містить значні гармонічні складові (3-ї, 5-ї, 7-ї і 11-ї гармонік), а нестійкість дугового розряду спричиняє коливання напруги — ефект, відомий як фліккер. У сучасних автоматизованих комплексах РТП ці

питання вирішуються паралельно з регулюванням електродів за допомогою динамічних компенсаторів реактивної потужності.

Найпоширенішою технологією є статичний компенсатор реактивної потужності (СКРП, англ. Static VAR Compensator, SVC). Конструктивно він включає реактор, регульований тиристорами (TCR), та фіксовані конденсаторні фільтрові батареї, налаштовані на пригнічення найзначніших гармонік. Регулятор SVC безперервно вимірює реактивну потужність на шинах живлення печі та керує кутом провідності тиристорів TCR таким чином, щоб результуюча реактивна потужність на шинах підходила до нуля. Час реакції сучасних SVC становить менше 20 мс — на два порядки швидше від механічної комутації конденсаторних батарей [15].

Сучаснішою альтернативою SVC є статичні синхронні компенсатори (STATCOM) на базі повністю керованих ключів IGBT. Вони мають ширший робочий діапазон, симетричну ємнісно-індуктивну характеристику й істотно нижчий рівень власних гармонік. У комплексі з активними фільтрами гармонік (Active Harmonic Filter) сучасні системи здатні утримувати коефіцієнт несинусоїдальності напруги (THD) у межах вимог стандарту IEEE 519 навіть при різких змінах режиму печі.

Економічний ефект застосування СКРП/STATCOM на РТП проявляється у кількох напрямках: зменшення штрафів за споживання реактивної потужності, стабілізація напруги в загальнозаводській мережі (що сприяє нормальній роботі іншого електрообладнання), пригнічення фліккеру (вимоги стандарту IEEE 1453), а також — опосередковано — продовження ресурсу електродів за рахунок стабільнішої дуги.

Принцип роботи SVC можна формалізувати співвідношенням:

$$Q_{\text{СКРП}} = V^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{filt}} - V^2 / X_{\text{TCR}}(\alpha),$$

де V — діюче значення напруги мережі, ω — кутова частота, C_{filt} — сумарна ємність конденсаторних фільтрових батарей, $X_{\text{TCR}}(\alpha)$ — еквівалентний реактивний опір реактора, керованого тиристорами, як функція кута відкриття α . Регулятор SVC у режимі реального часу обчислює необхідне значення $Q_{\text{СКРП}}$ так, щоб результуюча реактивна потужність на шинах підстанції наближалася до

						Арх.
						57
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

нуля, тобто $Q_{\text{СКРП}} \approx -Q_{\text{РТП}}$. Подібна формалізація лежить в основі системи керування STATCOM з тією відмінністю, що замість дискретного перемикання фільтрових батарей використовується безперервне керування ШІМ-інвертора.

Для рудотермічних печей феронікелевого комбінату, де нерівномірне завантаження може суттєво коливати реактивну складову споживання, інтеграція системи СКРП з автоматичним регулятором електродів є необхідною умовою для уникнення штрафів з боку енергопостачальної компанії та забезпечення безперервної роботи решти технологічної лінії (роторних печей, насосного господарства, систем газоочистки).

9.3.4 Сучасні методи контролю стану печі та прогнозування

АРР-1 оперує лише вузькою сукупністю вимірюваних величин — струмами електродів, напругою РПН, температурою газів, тиском під кришкою та положенням електродотримачів. Цього достатньо для підтримання поточного режиму, але недостатньо для раннього виявлення відхилень, прогнозування ресурсу обладнання та оптимізації режиму на тривалих часових інтервалах. Сучасні системи розширюють список сигналів і застосовують методи інтелектуального аналізу даних.

На рівні датчиків додатково встановлюються оптичні пірометри (для безконтактного вимірювання температури шихти та електродів), тепловізійні камери (для моніторингу стану футерівки та виявлення локальних перегрівів), акустичні датчики (для діагностики стабільності дуги — нестійке горіння має характерний звуковий спектр), віброметри (для контролю стану механічних приводів електродів) та газоаналізатори вмісту CO і CO₂ (як індикаторів надлишку чи нестачі відновника).

Зібрані потоки сигналів є основою для побудови моделей машинного навчання. У роботі [16] показано застосування глибоких нейронних мереж типу LSTM для прогнозування температури футерівки електродугової печі феронікелевого виробництва за багатовимірними часовими рядами технологічних параметрів. Точність прогнозу температури на 30 хвилин вперед досягає рівня,

						Арх.
						58
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

достатнього для упереджувального коригування режиму і запобігання локальним перегрівам, що призводять до прискореного зносу футерівки.

Логічним розвитком цього підходу є концепція цифрового двійника (digital twin) — обчислювально-математичної моделі печі, яка працює в режимі реального часу паралельно з реальним обладнанням, отримує ті ж самі вхідні сигнали й дозволяє симулювати наслідки гіпотетичних рішень оператора («що буде, якщо змінити ступінь напруги на дві позиції»). Цифровий двійник є інструментом як для оперативного керування, так і для навчання персоналу та оптимізації технологічних режимів без ризику для основного обладнання.

Окремим напрямком є прогнозування технічного стану електродів та футерівки на основі історії параметрів режиму — predictive maintenance. Замість регламентного графіка перефутерування та заміни електродів виконується індивідуальне планування на основі фактичного стану, що скорочує простої та продовжує міжремонтні періоди.

Орієнтовні технічні характеристики типових датчиків сучасної системи моніторингу РТП наведено в табл. 9.4.

Табл. 9.4 — Характеристики типових датчиків системи моніторингу РТП

Тип датчика	Діапазон	Точність	Час відгуку	Типові виробники
Оптичний пірометр	600–2000 °C	±0,5 %	10–30 мс	Endress+Hauser, Raytek, Optris
Тепловізійна камера	до 2000 °C, 640×480 пікс.	±2 °C	30 Гц	FLIR, Fluke, InfraTec
Акустичний датчик	20 Гц – 20 кГц	—	реальний час	Brüel & Kjær, PCB Piezotronics
Віброметр	0–10 кГц, 0–50 g	±0,5 % FS	<1 мс	SKF, Bently Nevada
Газоаналізатор CO/CO ₂	0–25 % об.	±2 % FS	<5 с	Siemens, ABB, Servomex

Усі перелічені датчики мають промислове виконання за рівнем захисту IP-65 і вище та обладнані стандартними інтерфейсами 4–20 мА або шинними

Modbus RTU/Profinet, що забезпечує безпосереднє підключення до сучасної ПЛК-системи без додаткових перетворювачів.

Для рудотермічних печей феронікелевого виробництва, у яких одна доба простою еквівалентна десяткам тисяч доларів недоотриманої продукції, інвестиції у сучасні системи моніторингу та прогнозування мають короткий період окупності й суттєво підвищують надійність технологічного процесу.

9.3.5 Порівняльний аналіз AC-SAF та DC-SAF систем керування

Усе попереднє обговорення стосувалося рудотермічних печей змінного струму (AC-SAF — Alternating Current Submerged Arc Furnace) з трьома електродами, які власне і є предметом цієї роботи. Проте за останні два десятиліття у світовій феронікелевій промисловості динамічно розвивається альтернативний тип печей — рудотермічні печі постійного струму (DC-SAF — Direct Current Submerged Arc Furnace) — з одним порожнистим електродом, що подає шихту, та подовим (нижнім) електродом-анодом, на який замикається струм через шихту й розплавлений метал [12, 17]. Конструктивні відмінності між двома типами печей наведено на рис. 9.6.

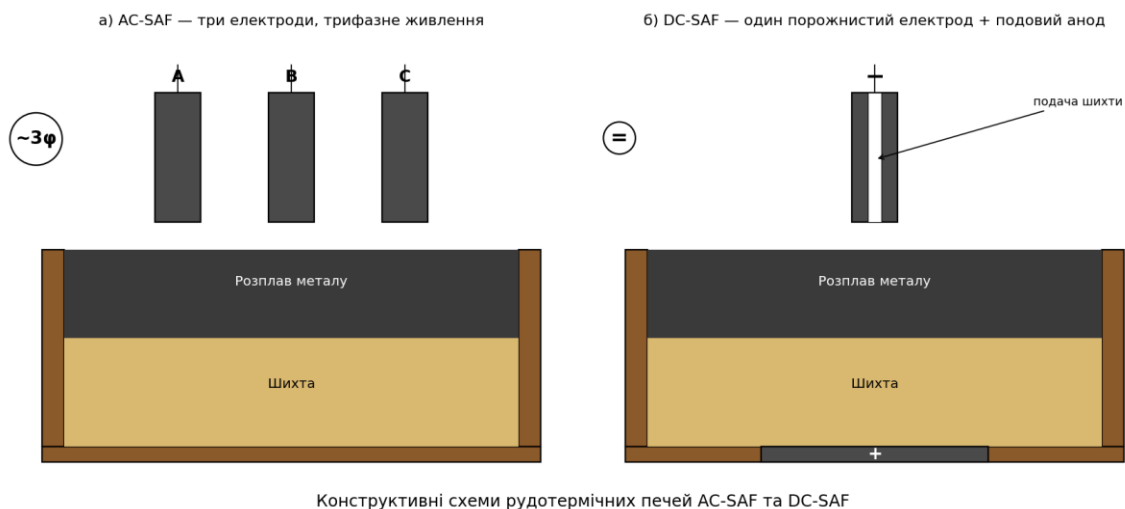


Рис. 9.6 — Конструктивні схеми рудотермічних печей AC-SAF (а) та DC-SAF (б)

З погляду автоматичного керування DC-SAF мають низку фундаментальних переваг. Перш за все, відсутнє питання трифазної взаємодії — є тільки один контур регулювання струму, що значно спрощує алгоритм і виключає

ефекти міжфазного зв'язку, які створюють основні труднощі для APP-1 та його сучасних мікропроцесорних аналогів. По-друге, спектр споживаного струму майже не містить непарних гармонік (3-ї, 5-ї, 7-ї), характерних для трифазного дугового навантаження, а отже зменшуються вимоги до системи компенсації реактивної потужності та активних фільтрів. По-третє, дугова характеристика DC-SAF більш стабільна у часі, що дозволяє підтримувати оптимальний електричний режим з меншими коливаннями і, відповідно, меншим зносом електродів.

На технологічному рівні DC-SAF забезпечують вищу енергоефективність (питома витрата електроенергії на 1 т феронікелю на 5–10 % нижча порівняно з AC-SAF аналогічної потужності), кращу однорідність хімічного складу металу за рахунок інтенсивнішого перемішування розплаву електромагнітними силами, а також можливість роботи з більш бідними та дрібнішими фракціями латеритної руди — що особливо цінно в умовах виснаження легкозбагачуваних родовищ.

Узагальнене порівняння AC-SAF та DC-SAF за основними критеріями автоматизації та технологічної ефективності наведено в табл. 9.5.

Табл. 9.5 — Порівняння AC-SAF та DC-SAF за основними критеріями

Параметр	AC-SAF	DC-SAF
Кількість електродів	3	1 + подовий анод
Тип живлення	трифазне змінне	постійне
Складність контурів регулювання	висока (міжфазний зв'язок)	низька
Гармоніки 3-ї, 5-ї, 7-ї	значні	майже відсутні
Питома витрата енергії, кВт·год/т Fe-Ni	базова	на 5–10 % нижча
Стабільність дуги	помірна	висока
Знос електродів	помірний	низький
Вимоги до системи СКРП/STATCOM	високі	помірні
Капітальні витрати на впровадження	базові	у 1,5–2 рази вищі
Прийнятність бідних руд (низький вміст Ni)	обмежена	висока

Разом з тим заміна існуючих AC-SAF на DC-SAF потребує значних капітальних інвестицій (нові випрямлячі великої потужності, перепроєктування подової футерівки під подовий електрод, зміна схеми газовідсмоктування), тому в умовах діючих виробництв оптимальною стратегією є модернізація AC-SAF — заміна аналогового APP-1 на сучасну ПЛК-систему з адаптивними алгоритмами, компенсаторами реактивної потужності та системою прогнозування, описаними у попередніх підрозділах. Така модернізація дозволяє наблизитися до показників DC-SAF без зміни основного технологічного устаткування і при значно меншому капіталовкладенні.

На сьогодні DC-SAF комерційно експлуатуються на підприємствах Mintek (ПАР), Sumitomo Metal Mining (Філіппіни), Vale (Бразилія, Канада) та низці китайських феронікелевих виробників. Потужність одиничних агрегатів сягає 80–120 МВт; для феросиліцієвого виробництва діють установки потужністю понад 60 МВт на одну піч. Українська металургійна галузь не має промислових DC-SAF, проте провідні постачальники технології (SMS group, Tenova, Danieli, Hatch) пропонують типові проектні рішення модернізації, які можуть бути впроваджені при відповідних інвестиційних умовах і відсутності обмежень на капітальне будівництво.

Тому стратегічне рішення для конкретного феронікелевого комбінату ухвалюється з урахуванням стану наявного обладнання, доступності інвестицій і прогнозу зміни сировинної бази: вибір технології DC-SAF доцільний у нових проектах та при глибокій реконструкції, тоді як для діючих AC-SAF комплексний підхід «APP-1 → ПЛК + СКРП + ML-моніторинг» забезпечує найкраще співвідношення ефективності та вартості модернізації.

						Арх.
						62
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано проектування системи електропостачання ливарного виробництва феронікелевого комбінату та вирішено комплекс завдань, пов'язаних із забезпеченням надійного й економічного електропостачання промислового підприємства.

За результатами розрахунку електричних навантажень визначено активні та реактивні навантаження цехів підприємства. Розрахункова активна потужність освітлення склала 224 кВт, а сумарне навантаження на шинах 10 кВ — 7754 кВт. Отримані результати стали основою для подальшого вибору обладнання та елементів системи електропостачання.

Під час побудови графіків електричних навантажень визначено річне споживання активної електроенергії 47,35 млн кВт·год та реактивної енергії 7,11 млн квар·год. Кількість годин використання максимального навантаження становить 6107 годин на рік, що свідчить про високий рівень завантаження обладнання підприємства.

Під час вибору схеми електропостачання виконано техніко-економічне порівняння двох варіантів. За критерієм мінімуму приведених витрат обрано варіант із будівництвом РП-2 на території групи цехів. Приведені витрати для цього варіанта становлять 1341 тис. грн, що менше порівняно з альтернативним варіантом.

При розрахунку компенсації реактивної потужності встановлено необхідність компенсації реактивного навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів та синхронних двигунів. Для компенсації на стороні 10 кВ прийнято встановлення двох батарей конденсаторів по 300 квар, а на стороні 0,4 кВ — чотирьох комплектних конденсаторних установок. Це забезпечує підтримання заданого коефіцієнта потужності та зменшення втрат електроенергії.

За результатами вибору трансформаторного обладнання для живлення споживачів 0,4 кВ прийнято встановлення двох комплектних трансформаторних

						Арх.
						63
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

підстанцій із трансформаторами потужністю 1000 кВА кожний. Для живлення рудотермічних печей передбачено використання двох спеціальних пічних трансформаторів потужністю 20000 кВА. Обрані трансформатори забезпечують необхідну надійність електропостачання та допускають роботу в аварійних режимах.

Під час розрахунку струмів короткого замикання та вибору обладнання визначено максимальні та мінімальні значення струмів КЗ у характерних точках мережі. Найбільший розрахунковий струм короткого замикання на шинах РП-2 становить 6,82 кА з урахуванням підживлення від електродвигунів. За результатами розрахунків виконано вибір комутаційної апаратури, трансформаторів струму, напруги та кабельних ліній, які відповідають умовам термічної та електродинамічної стійкості.

У спеціальному розділі роботи досліджено режими роботи рудотермічних печей феронікелевого комбінату. Встановлено, що ефективність роботи печі значною мірою залежить від вибору електричного режиму та сили струму дуги. Розглянуто електричні та експлуатаційні характеристики печі, а також особливості автоматичного регулювання режимів роботи за допомогою регуляторів серії АРР-1. Це дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу та підвищити енергоефективність виробництва.

Загалом у роботі розроблено систему електропостачання ливарного виробництва феронікелевого комбінату, яка забезпечує необхідний рівень надійності електропостачання споживачів усіх категорій, відповідає технічним вимогам щодо якості електроенергії, дозволяє знизити втрати електричної енергії та створює умови для ефективної й безпечної експлуатації виробничого обладнання підприємства.

						Арх.
						64
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.]; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України). Наказ Міністерства енергетики України від 21.07.2017 №476, 2017. – 617 с.
5. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
6. Енергетичний інжиніринг та менеджмент. Проектування ефективних енергетичних систем: навч. посіб. / П. Г. Плешков, С. В. Серебренніков, О. І. Сіріков, І. В. Савеленко; ред.: Плешков П. Г. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018.– 156 с.
7. Кваліфікаційна робота бакалавра : метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роб. для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. : П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 80 с.
8. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид.2-е, / Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен / За ред. Академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.

						Арх.
						65
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Проектування схем електропостачання: Методичні вказівки до виконання організаційно-економічних розрахунків /Укл. О.О.Ляшенко. Кіровоград КІСМ, 1998.- 24с

10. Губський А.І. Цивільна оборона. Підручник для вищих учбових закладів. – К.: Міністерство Освіти, 1995. – 216 с.

11. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією та її споживачами. НКРЕ України, 1997.

12. SR Furnace. Ferronickel Smelting with DC Submerged Arc Furnace (DC-SAF): Technology, Process, and Industry Advantages. URL: <https://www.srfurnace.com/ferronickel-smelting-with-dc-submerged-arc-furnace-dc-saf.html>

13. He J., Wang C., Zhu Q., Shen L., Jing M., Gui W. An intelligent optimization control method for the electrode current of submerged arc furnaces based on case reasoning // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. — 2020. — DOI: 10.1177/0959651820906000.

14. Synthesis of an Electric Arc Furnace Electrode Movement Control System Based on Feedback Linearization with PI or PI μ Controllers // Energies (MDPI). — 2025. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/18/4873>

15. An improved SVC control for electric arc furnace voltage flicker mitigation // Electric Power Systems Research. — 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061521000715>

16. Pérez-Aragón D. et al. Temperature Prediction Using Multivariate Time Series Deep Learning in the Lining of an Electric Arc Furnace for Ferronickel Production // Sensors. — 2021. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8541558/>

17. Huaxiao Special Steel. Production of Ferronickel by Using Laterite Nickel Ore Electric Furnace. URL: <https://www.huaxiao-ss.com/blogs-news/blogs/production-of-ferronickel-by-using-laterite-nickel-ore-electric-furnace.html>

						Арх.
						66
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Табл.А.1 Вибір вимикачів в ЗРУ-10 кВ

Параметри вимикача	Умови вибору	Перевірка умов вибору			
		Ввідний	Секційний	Лінійний (КТП-2х1000)	Лінійний (синх.двигун)
Номінальна напруга, кВ	$U_{уст} \leq U_n$	10=10	10=10	10=10	10=10
Довготривалий номінальний струм, А	$I_{роб.форс} \leq I_{дл.н}$	431,6 ≤ 630	215,8 ≤ 630	77 ≤ 630	61 ≤ 630
Ном. струм дин. стійкості, кА симетричний і асиметричний	$I'' \leq I_{дин.с}$	68,2 < 20	68,2 < 20	68,2 < 20	68,2 < 20
	$i_y \leq \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot I_{д.с}$	13,44 < 51	13,44 < 51	13,44 < 51	13,44 < 51
Ном. струм відключення, кА симетричний асиметричний	$I_{nt} \leq I_{відкл.н}$	68,2 ≤ 20	68,2 ≤ 20	68,2 ≤ 20	68,2 ≤ 20
	$i_{a\tau} + i_{n\tau} \leq \sqrt{2} \cdot I_{відкл.н} \cdot (1 + \beta_n)$	7,24 ≤ 28	7,24 ≤ 28	7,24 ≤ 28	7,24 ≤ 28
Тепловий імпульс(кА ²)с	$B_k \leq I_{т.н}^2 \cdot t_{т.н}$	71,4 ≤ 3200	48 ≤ 3200	24,9 ≤ 3200	24,9 ≤ 3200
Тип		ВР-1-10- 20/630УЗ	ВР-1-10- 20/630УЗ	ВР-1-10- 20/630УЗ	ВР-1-10- 20/630УЗ

Таблиця А.2 – Запобіжник для захисту ТВП

Умови вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{уст} \leq U_n$	10 кВ	10 кВ
$I_n \leq I_{н.пл.вс}$	3,47 А	5 А
$I'' \leq I_{відкл.}$	6,82 кА	20 кА

Табл.А.3 Завантаження фаз контрольно вимірювальними приладами

Прилади	Тип	Потужність		
		Фаза А	Фаза В	Фаза С
Амперметр	Э-377	0,1	0,1	0,1
Лічильник активної та реактивної енергії	ZFB/405	0,3	0,3	0,3
Всього		0,4	0,4	0,4

Табл.А.4 Вибір ввідного ТС типу ТЛМ-10-600

Умови вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{уст} \leq U_n$	10 кВ	10 кВ
$I_{р.мах} \leq I_n$	431,6 А	600 А
$i_y \leq K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_n$	13,44 кА	91 кА
$B_k \leq (K_m \cdot I_n)^2 \cdot t_m$	$71,4 \text{ (кА)}^2 \text{ С}$	$1966 \text{ (кА)}^2 \text{ С}$
$Z_2 \leq Z_{2н0,5}$	0,306 Ом	0,4 Ом

Табл.А.5 Завантаження вторинного ланцюга трансформатора струму

Обладнання	Тип	Навантаження, ВА	
		Фаза А	Фаза В
Фмперметр	Е-377	0,1	0,1
Лічильник активної енергії	САЗУ-5007	1,5	1,5
Ватметр	Д-365	0,5	0,5
Всього		2,1	2,1

Табл.А.6 Вибір ТС відходячих ліній ТПЛ-10-100

Умови вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{уст} \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{p.max} \leq I_H$	77 А	100 А
$i_y \leq K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_H$	13,44 кА	27 кА
$B_k \leq (K_m \cdot I_H)^2 \cdot t_m$	$24,9 \text{ (кА)}^2 \text{ С}$	$34 \text{ (кА)}^2 \text{ С}$
$Z_2 \leq Z_{2H0,5}$	0,476 Ом	0,6 Ом

Табл.А.7 Навантаження вторинної мережі ТН

Прилад	Тип	Кіль- кісь	Потужність			
			Р, Вт	P_Σ , Вт	Q, Вар	Q_Σ , ВАр
Лічильник активної енергії	САЗУ-5007	8	1,5	10,5	5,8	40,6
Лічильник реактивної енергії	СРЧУ-5008	1	1,5	1,5	5,8	5,8
Комбінований лічильник	ZFB/405	1	9	9	4	4,5
Вольтметр	Е-377	1	2	2		
Ватметр	Д-365	7	1,5	9		
Варметр	Д-365	1	1,5	1,5		
Всього				36,5		56,7

Табл.А.8 Вибір ТН типу НАМИ-10

Умови вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{уст} \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$S_\Sigma \leq S_{H0,5}$	60,9 ВА	120 ВА