

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
_____ П. Пешков
“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему:

Розроблення системи електроспоживання заводу з виробництва білого цукру **Development of a power consumption system for a white sugar production plant**

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ22
ОПП «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Олександр БАРДИШ
« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи
доцент, канд. техн. наук
_____ Руслан ТЕЛЮТА
« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ П. Плешков

«_____» _____ 2026 р.

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

Бардиш Олександр Олександрович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи

Розроблення системи електроспоживання заводу з виробництва білого цукру

Development of a power consumption system for a white sugar production plant

2. Керівник роботи

Телюта Руслан Васильович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 12.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є розробка системи електроспоживання заводу з виробництва білого цукру. Завдання: дати коротку характеристику заводу з виробництва білого цукру. Розрахунок силових електричних навантажень. Побудова графіків електричних навантажень заводу з виробництва білого цукру. Побудова картограм електричних навантажень. Вибір напруги і електричних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання заводу з виробництва білого цукру. Режим реактивної потужності системи електропостачання заводу з виробництва білого цукру. Вибір кількості та потужності трансформаторів. Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання і високовольтних мереж системи електропостачання. Вимірювання режимних параметрів системи електропостачання. Спеціальний розділ. Висновки. Перелік посилань.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача завдання</i>	<i>08.05.26</i>	
2	<i>Вступ</i>	<i>09.05.26</i>	
3	<i>Електричні навантаження в системі електропостачання</i>	<i>10.05.26</i>	
4	<i>Побудова картограми електричних навантажень</i>	<i>15.05.26</i>	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем електропостачання</i>	<i>18.05.26</i>	
6	<i>Вибір кількості, потужності та місця розташування трансформаторів</i>	<i>22.05.26</i>	
7	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>25.05.26</i>	
8	<i>Розрахунок струмів короткого замикання</i>	<i>29.05.26</i>	
9	<i>Вибір обладнання електропостачання</i>	<i>31.05.26</i>	
10	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>05.06.26</i>	
11	<i>Висновки</i>	<i>10.06.26</i>	
12	<i>Список літератури</i>	<i>10.06.26</i>	
13	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>11.06.26</i>	
14	<i>Оформлення графічної частини</i>	<i>12.06.26</i>	

Дата видачі завдання

« 08 » травня 20 26 р.

Підпис керівника

_____ Руслан ТЕЛЮТА

Завдання прийнято до виконання

« 08 » травня 20 26 р.

Підпис керівника

_____ Олександр БАРДИШ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 73 с.; 22 рис.; 31 табл.; 8 джерел

Бардиш О. О. Розроблення системи електроспоживання заводу з виробництва білого цукру. – Рукопис.

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

Дана робота спрямована на проектування комплексної та високонадійної системи електропостачання цукрового заводу з урахуванням сучасних вимог енергоефективності. У ході дослідження виконано детальний розрахунок електричних навантажень об'єкта, проведено аналіз режимів реактивної потужності та обчислено параметри струмів короткого замикання. На основі багатокритеріального техніко-економічного аналізу обґрунтовано вибір раціональних схем зовнішнього та внутрішнього енергозабезпечення. Визначено оптимальну кількість та потужність трансформаторних підстанцій, підібрано засоби компенсації реактивної потужності, а також здійснено вибір силових провідників та комутаційного високовольтного обладнання. Особливий акцент зроблено на мінімізації технологічних втрат енергії та інтеграції сучасних апаратів захисту.

Спеціальний розділ присвячено вдосконаленню роботи електропривода центрифуги. В результаті моделювання визначено критичні вимоги до приводного двигуна, проведено верифікацію його навантажувальної здатності та розраховано динамічні характеристики. Доведено, що впровадження системи частотного регулювання забезпечує суттєве зниження питомих витрат електроенергії та оптимізує пускові режими, що позитивно впливає на механічну тривалість роботи обладнання.

Ключові слова: система електропостачання, розрахунок навантажень, короткі замикання, енергоефективність, електропривод центрифуги, частотне регулювання, скалярне управління, імітаційне моделювання.

ABSTRACT

Qualification work: 73 p.; 22 Fig.; 31 tables; 8 sources

Bardysh O.O. Development of a power consumption system for a white sugar production plant.

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

The bachelor's thesis is focused on the design of a comprehensive and high-reliability power supply system for a sugar factory, aligned with modern energy efficiency standards. The study involves a detailed calculation of electrical loads, analysis of reactive power modes, and determination of short-circuit current parameters. Based on a multi-criteria technical and economic analysis, rational schemes for external and internal power supply were justified. The optimal number and capacity of transformer substations were determined, reactive power compensation devices were selected, and power conductors and high-voltage switching equipment were specified. Special emphasis was placed on minimizing technological energy losses and integrating advanced protection systems.

A special section is devoted to improving the operation of the centrifuge electric drive. Through simulation modeling, critical requirements for the drive motor were identified, its load capacity was verified, and dynamic characteristics were calculated. It is proven that the implementation of a variable frequency control system ensures a significant reduction in specific energy consumption and optimizes starting modes, which positively affects the mechanical durability of the equipment.

Key words: power supply system, load calculation, short circuits, energy efficiency, centrifuge electric drive, frequency control, scalar control, simulation modeling.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	7
1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ	8
1.1 Розрахунок споживання потужності в низьковольтних мережах цукрового заводу (до 1000 В)	8
1.2 Обґрунтування параметрів освітлювальних установок виробничих цехів	12
1.3 Оцінка електронавантаження високовольтних споживачів цукрового заводу (понад 1000 В)	12
1.4 Формування та аналіз графіків електроспоживання об'єкта.....	20
2. РОЗРОБКА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАВОДУ	25
3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРО-ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	27
3.1. Обґрунтування робочої напруги та конфігурації схеми зовнішнього живлення.....	27
3.2. Вибір структури та топології внутрішньої схеми розподілу енергії .	31
4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У МЕРЕЖАХ ЗАВОДУ	32
4.1. Оцінка балансу реактивної енергії та визначення дефіциту потужності	32
4.2. Вибір параметрів та локалізація пристроїв компенсації реактивної потужності.....	41
5. ОБґРУНТУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	43

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата										
Розробив		Бардиш О.О.			Розроблення системи електроспоживання заводу з виробництва білого цукру					Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевірів		Телюта Р.В.										5	73	
										ЦНТУ гр. ЕЕ-22				
Н. Контр.														
Затвердив		Плещков П.Г.												

6. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПІДБІР ВИСОКО ВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	44
6.1. Розрахунок струмів трифазного короткого замикання в системі заводу.....	44
6.2. Технічний вибір та перевірка високовольтних кабельних ліній.....	54
6.3. Верифікація комутаційних апаратів високої напруги за умовами стійкості	55
6.4. Вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги	58
7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРИФУГИ.....	61
7.1. Огляд існуючих технологій та постановка завдань дослідження.....	61
7.2 Розробка математичної моделі функціонування електродвигуна	61
7.3 Дослідження динамічних режимів роботи двигуна при впровадженні методів енергозбереження.....	63
7.3.1 Аналіз механічних характеристик та перехідних процесів	63
7.3.2 Регулювання параметрів шляхом варіювання амплітуди напруги на статорі.....	65
7.3.3 Частотне регулювання швидкості обертання привода	66
7.4. Проектування систем скалярного керування електроприводом.....	67
7.4.1 Концептуальні основи скалярного регулювання.....	67
7.4.2 Дослідження розімкнених систем керування частотою	68
7.4.3 Моделювання та синтез замкнених контурів керування	69
7.5. Вибір напівпровідникового перетворювача частоти.....	70
7.6 Висновки за спеціальним розділом	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

ВСТУП

Цукрова промисловість є однією з найважливіших галузей агропромислового комплексу України. Сучасне виробництво білого цукру характеризується високим рівнем енергоємності та складністю технологічних процесів, що потребує безперебійного та якісного електрозабезпечення. В умовах ринкової економіки та постійного зростання вартості енергоносіїв, питання розроблення надійних та економічно ефективних систем електроспоживання стає критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності підприємства.

Метою даного дипломного проекту є проектування та розроблення комплексної системи електроспоживання заводу з виробництва білого цукру, яка забезпечить надійну роботу технологічного обладнання, мінімізацію втрат електроенергії та підвищення загальної енергоефективності підприємства.

Об'єктом дослідження є система електроспоживання цукрового заводу, що включає силові електроприводи технологічних цехів (обробки буряків, очищення соку, продуктового комплексу тощо), системи електричного освітлення та допоміжні підрозділи.

Завдання проекту: провести аналіз технологічного процесу виробництва білого цукру як об'єкта електроспоживання; здійснити розрахунок силових та освітлювальних електричних навантажень за сучасними методиками з урахуванням перспективного розширення виробничих потужностей; вибрати раціональну схему електропостачання та визначити місця розташування ТП; розрахувати та спроектувати систему компенсації реактивної потужності для покращення показників якості електроенергії; вибрати комутаційну та захисну апаратуру, а також перерізи кабельних ліній для надійної експлуатації мережі; розглянути питання керування електроспоживанням та спецпитання.

Отримані в проекті розрахунки та технічні рішення дозволяють створити стійку до перевантажень систему електропостачання, що мінімізує ризики аварійних зупинок виробництва та оптимізує витрати на оплату активної та реактивної електроенергії.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						7

1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

Для обґрунтованого визначення параметрів системи електропостачання об'єктів цукрового виробництва було використано методичні рекомендації та нормативні матеріали, що застосовуються при проектуванні аналогічних підприємств харчової промисловості [1].

1.1 Розрахунок споживання потужності в низьковольтних мережах

Оцінка розрахункових потужностей виконувалася методом впорядкованих діаграм (метод коефіцієнта максимуму). Розглянемо алгоритм обчислення параметрів для станції дифузії, що входить до складу цеху обробки буряків:

$$P_{\text{см}} = P_{\text{сум}} K_{\text{н}} = 150 \cdot 0,71 = 106,5 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \operatorname{tg} \varphi = 150 \cdot 0,72 = 77,1 \text{ кВар}.$$

Для визначення групового коефіцієнта використання та інших параметрів розраховуємо ефективну кількість електроприймачів ($n_{\text{еф}}$) для даного технологічного вузла. Попередньо визначаємо показник кратності потужностей m :

$$m = \frac{P_{\text{н.мах}}}{P_{\text{н.мін}}} = \frac{50}{10} = 5$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \sum P_{\text{н}}}{P_{\text{н.мах}}} = \frac{2 \cdot 150}{50} = 5$$

Згідно з даними [1], для отриманої кількості обладнання та відповідного коефіцієнта використання $K_{\text{в}}$, значення коеф. максимуму для даної групи $K_{\text{м}} = 1,3$.

Розрахункові показники активної ($P_{\text{р}}$) та реактивної ($Q_{\text{р}}$) потужності:

$$P_{\text{р}} = P_{\text{см}} K_{\text{м}} = 106,5 \cdot 1,3 = 138,48 \text{ кВт}, \quad Q_{\text{р}} = Q_{\text{см}} = 84,81 \text{ кВар}.$$

Максимальне повне навантаження ($S_{\text{р}}$) по даному об'єкту

$$S_{\text{р}} = \sqrt{P_{\text{р}}^2 + Q_{\text{р}}^2} = \sqrt{138,48^2 + 84,81^2} = 162,39 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Результати комплексного оцінювання навантажень до 1000 В для всіх підрозділів цеху обробки буряків та загальні показники по заводу в табл. 1.1.1

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						8

Таблиця 1.1.1 - Розрахунок силових електричних навантажень до 1 кВ цеху обробки буряків

№ п/п	Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн} , кВт		Р _{сум} кВт	m	К _и	cos j	tg j	Середнє		n _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження		
			Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА
1.	Станція дифузії (головні приводи)	5	10	50	150	5	0,71	0,81	0,72	106,5	77,1	5	1,3	138,48	84,81	162,39
2.	Вузол віджиму жому (жомопresi)	19	15	22	338	1,5	0,22	0,65	1,17	74,36	86,94	19	1,53	114,12	86,94	143,46
3.	Транспортно-мийний комплекс	2	22	22	44	1	0,46	0,76	0,86	20,24	17,31	2	2,4	48,51	19,04	52,11
4.	Барабанна установка очищення	2	7,5	7,5	15	1	0,41	0,72	0,96	6,15	5,93	2	2,58	15,85	6,52	17,14
5.	Ваговий дозатор буряків	2	3	3	6	1	0,41	0,61	1,3	2,46	3,2	2	2,58	6,34	3,52	7,25
6.	Бурякорізальна установка	4	18,5	18,5	75	1	0,45	0,71	0,99	33,75	33,47	4	1,78	60,15	36,82	70,52
7.	Класифікатор соку	2	22	22	44	1	0,81	0,75	0,88	35,64	31,43	2	1	35,64	34,57	49,65
8.	Фільтр-преси першої сатурації	14	5,5	22	160,5	4	0,4	0,75	0,88	64,2	56,62	14	1,39	89,52	56,62	105,92
9.	Насосна станція поверненої води	9	7,5	30	134,5	4	0,61	0,75	0,88	82,04	72,35	9	1,3	106,5	79,59	132,95
10.	Система вентиляції цеху	4	18,5	18,5	74	1	0,65	0,81	0,72	48,1	34,82	4	1,45	69,68	38,3	79,51
11.	Компресорна установка цеху	15	11	55	527	5	0,61	0,81	0,72	321,47	232,74	15	1,22	391,92	232,74	455,82
	Всього	78	3	55	1568	18,3	0,506 958	0,773	0,82	794,91	651,91	57	1,14	902,86	651,91	1113,62

Таблиця 1.1.2. Розрахунок електричних навантажень до 1 кВ цукрового заводу

№ п/п	Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tg j	Середнє		n _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
			Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
1.	Цех обробки буряків	78	3	55	1568	18,3	0,506 _q	0,773	0,82	794,82	652,31	57	1,14	902,78	652,31	1113,79
2.	Відділ фільтрації та очищення соку	61	1,5	90	2580	60	0,69	0,92	0,43	1780,2	758,36	57	1,08	1917,16	758,36	2061,7
3.	Продуктовий технологічний комплекс	66	2,2	30	561,5	13,6	0,55	0,69	1,05	308,83	323,96	37	1,15	356,63	323,96	481,8
4.	Дільниця фасування та пакування	11	1,1	5,5	31,5	5	0,6	0,75	0,88	18,9	16,67	11	1,27	24,04	16,67	29,25
5.	Мийний комплекс буряків	27	3	55	318	18,3	0,51	0,67	1,11	162,18	179,7	12	1,33	215,67	179,7	280,72
6.	Дільниця очищення транспортувальної води	13	1,5	7,5	64,5	5	0,54	0,64	1,2	34,83	41,82	13	1,29	44,96	41,82	61,4
7.	Теплоелектроцентрально (власна генерація)	38	3	125	1560,5	41,7	0,68	0,82	0,7	1061,14	740,68	25	1,13	1196,71	740,68	1407,38
8.	Модульна газова котельня	9	2,2	30	128,4	13,6	0,62	0,72	0,96	79,61	76,73	9	1,29	102,62	84,4	132,87
9.	Дільниця електротехнічного обслуговування	17	2,2	37	334,2	16,8	0,45	0,76	0,86	150,39	128,61	17	1,31	197,24	128,61	235,47
10.	Відділення підготовки вапняного молока	9	10	30	145	3	0,57	0,87	0,57	82,65	46,84	9	1,34	110,35	51,52	121,78
11.	Комплекс зберігання енергоносіїв	10	7,5	30	165	4	0,41	0,78	0,8	67,65	54,27	10	1,47	99,53	59,7	116,06
12.	Насосна станція першого підйому	6	11	30	121	2,7	0,7	0,86	0,59	84,7	50,26	6	1,28	108,26	55,29	121,56
13.	Станція виробництва стисненого повітря	12	4	125	605	31,2	0,74	0,88	0,54	447,7	241,64	10	1,16	521,02	265,8	584,9
14.	Насосна станція технічного водопостачання	4	3	5,5	16,5	1,8	0,71	0,87	0,57	11,71	6,64	4	1,35	15,83	7,3	17,43
15.	Насосна станція живлення котельні	13	3	40	83	13,3	0,71	0,87	0,57	58,93	33,4	4	1,35	79,66	36,74	87,72
16.	Транспортно-логістичний залізничний в'їзд	8	3,3	11	71,1	3,3	0,28	0,67	1,11	19,91	22,06	8	1,75	34,9	24,27	42,51
17.	Склад цукру-піску (Секція №1)	28	1,1	22	262,3	20	0,42	0,68	1,08	110,17	118,79	24	1,27	140,41	118,79	183,92
18.	Склад цукру-піску (Секція №2)	5	5,5	7,5	33,5	1,4	0,55	0,67	1,11	18,43	20,42	5	1,52	27,98	22,46	35,88
19.	Склад цукру-піску (Секція №3)	6	5,5	7,5	37	1,4	0,51	0,68	1,08	18,87	20,35	6	1,51	28,47	22,39	36,22

Продовження таблиці 1.1.2

№ п/п	Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	K _ч	cosj	tgj	Середнє		п _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
			Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см'} кВт	Q _{см'} кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
20.	Склад цукру-піску (Секція №4)	8	5,5	7,5	48	1,4	0,48	0,72	0,96	23,04	22,21	8	1,46	33,55	24,43	41,5
21.	Сховище резервної цукросировини	27	1,8	23	208	12,8	0,42	0,68	1,08	87,36	94,2	18	1,32	115,68	94,2	149,18
22.	Майданчик зберігання бурякових кагатів	7	5,5	15	57,5	2,7	0,61	0,71	0,99	35,07	34,78	7	1,35	47,32	38,26	60,85
23.	Комплекс очисних відстійників	5	3	11	31	3,7	0,61	0,82	0,7	18,91	13,2	5	1,44	27,16	14,52	30,8
24.	Цех термічної обробки та сушіння жому	57	2,2	75	1382,2	34,1	0,71	0,86	0,59	981,36	582,3	37	1,09	1069,38	582,3	1217,64
25.	Сховище гранульованого сухого жому	5	4	7,5	31	1,9	0,51	0,67	1,11	15,81	17,52	5	1,58	24,91	19,27	31,49
26.	Ремонтно-механічний підрозділ	15	3	15	104	5	0,185	0,61	1,3	19,24	24,99	14	1,72	33,1	24,99	41,47
27.	Ремонтно-будівельна діляниця	9	2,2	7,5	24,5	3,4	0,48	0,81	0,72	11,76	8,51	7	1,5	17,6	9,36	19,93
	Всього по заводу	554	1,1	125	10572,2	113,6	0,615 214	0,832	0,67	6504,17	4331,22	169	1,05	6861,76	4331,22	8114,38

1.2 Обґрунтування параметрів освітлювальних установок виробничих цехів

Розрахунок освітлювальних навантажень по цукровому заводу виконується згідно методики [1]. Результати розрахунків освітлювальних навантажень табл 1.2.

Таблиця 1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень по приміщеннях.

№	Найменування приміщення цукрового заводу	$F, \text{м}^2$	$P_0, \text{Вт/м}^2$	$P_v, \text{кВт}$	K_c	K_1	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	Розр навантаження приміщення заводу		
									$P_p, \text{кВт}$	$Q_p, \text{квар}$	$S_p, \text{кВА}$
1.	Цех обробки буряків	1360	17,1	23,26	0,94	1,21	0,91	0,456	26,46	12,07	29,08
2.	Відділ фільтрації та очищення соку	1758	17,1	30,06	0,94	1,21	0,91	0,456	34,19	15,59	37,58
3.	Продуктовий технологічний комплекс	1658	17,1	28,35	0,95	1,21	0,91	0,456	32,59	14,86	35,82
4.	Дільниця фасування та пакування	648	16,1	10,43	0,95	1,21	0,91	0,456	11,99	5,47	13,18
5.	Мийний комплекс буряків	476	15,1	7,19	0,95	1,21	0,91	0,456	8,26	3,77	9,08
6.	Дільниця очищення транспортувальної в	592,5	15,2	9,01	0,95	1,21	0,91	0,456	10,36	4,72	11,38
7.	Теплоелектроцентраль (власна генерація)	2240	10,05	22,51	0,95	1,21	0,91	0,456	25,88	11,8	28,44
8.	Модульна газова котельня	906,5	11,05	10,02	0,95	1,21	0,91	0,456	11,52	5,25	12,66
9.	Дільниця електротехнічного обслуговува	302,5	16,1	4,87	0,95	1,21	0,91	0,456	5,6	2,55	6,15
10.	Відділення підготовки вапняного молока	710,5	13,1	9,31	0,95	1,21	0,91	0,456	10,7	4,88	11,76
11.	Комплекс зберігання енергоносіїв	129,6	8,2	1,06	0,093	1,21	0,91	0,456	0,12	0,05	0,13
12.	Насосна станція першого підйому	148,4	12,2	1,81	0,95	1,21	0,91	0,456	2,08	0,95	2,29
13.	Станція виробництва стисненого повітря	188,5	12,2	2,3	0,95	1,21	0,91	0,456	2,64	1,2	2,9
14.	Насосна станція технічного водопостача	190,5	12,2	2,32	0,95	1,21	0,91	0,456	2,67	1,22	2,94
15.	Насосна станція живлення котельні	137,8	12,2	1,68	0,95	1,21	0,91	0,456	1,93	0,88	2,12
16.	Транспортно-логістичний залізничний в	414,6	16,05	6,65	0,95	1,21	0,91	0,456	7,64	3,48	8,4
17.	Склад цукру-піску (Секція №1)	1788,9	6,05	10,82	0,95	1,21	0,91	0,456	12,44	5,67	13,67
18.	Склад цукру-піску (Секція №2)	1258,4	6,05	7,61	0,95	1,21	0,91	0,456	8,75	3,99	9,62
19.	Склад цукру-піску (Секція №3)	1709	6,05	10,34	0,95	1,21	0,91	0,456	11,89	5,42	13,07
20.	Склад цукру-піску (Секція №4)	1780,5	6,05	10,77	0,95	1,21	0,91	0,456	12,38	5,65	13,61
21.	Сховище резервної цукросировини	2940,1	6,05	17,79	0,95	1,21	0,91	0,456	20,45	9,33	22,48
22.	Майданчик зберігання бурякових кагатів	27298	0,175	4,78	0,62	1,12	0,52	1,643	3,32	5,45	6,38
23.	Комплекс очисних відстійників	302,5	6,05	1,83	0,95	1,21	0,91	0,456	2,1	0,96	2,31
24.	Цех термічної обробки та сушіння жому	708,4	16,05	11,37	0,95	1,21	0,91	0,456	13,07	5,96	14,36
25.	Сховище гранульованого сухого жому	1878,8	6,05	11,37	0,95	1,21	0,91	0,456	13,07	5,96	14,36
26.	Ремонтно-механічний підрозділ	986,5	15,5	15,29	0,95	1,21	0,91	0,456	17,58	8,02	19,32
27.	Ремонтно-будівельна дільниця	554,5	15,5	8,59	0,95	1,21	0,91	0,456	9,87	4,5	10,85
28.	Територія цукрового заводу	86364	0,12	10,36	0,62	1,12	0,51	1,687	7,19	12,13	14,1
	Всього по заводу			291,7					326,7	161,7	364,6

1.3 Оцінка електронавантаження високовольтних споживачів цукрового заводу (понад 1000 В)

Для визначення електронавантаження понад 1 кВ для цукрового заводу використаємо метод, що використали у навчальному посібнику [1], а саме коефіцієнта розрахункової потужності. Результати зведено в таблицю 1.3.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					12

Таблиця 1.3 - Розрахунок електричних навантажень вище 1000 В цукрового заводу (без БК)

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tg j	Середнє		n _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
ТП1, ТП2, ТП3															
Цех обробки буряків															
силове:	78	3	55	1568	18,3	0,51	0,77	0,82	794,82	652,31	57	1,14	902,78	652,31	1113,79
освітлювальне:									23,26				26,46	12,07	
Всього:									818,08	652,31			929,24	664,38	1142,32
Відділ фільтрації та очищення соку															
силове:	61	1,5	90	2580	60	0,69	0,92	0,43	1780,2	758,36	57	1,08	1917,16	758,36	2061,7
освітлювальне:									30,06				34,19	15,59	
Всього:									1810,26	758,36			1951,35	773,95	2099,23
Продуктовий технологічний комплекс															
силове:	66	2,2	30	561,5	13,6	0,55	0,69	1,05	308,83	323,96	37	1,15	356,63	323,96	481,8
освітлювальне:									28,35				32,59	14,86	
Всього:									337,18	323,96			389,22	338,82	516,03
Дільниця фасування та пакування															
силове:	11	1,1	5,5	31,5	5	0,6	0,75	0,88	18,9	16,67	11	1,27	24,04	16,67	29,25
освітлювальне:									10,43				11,99	5,47	
Всього:									29,33	16,67			36,03	22,14	42,29
Мийний комплекс буряків															
силове:	27	3	55	318	18,3	0,51	0,67	1,11	162,18	179,7	12	1,33	215,67	179,7	280,72
освітлювальне:									7,19				8,26	3,77	
Всього:									169,37	179,7			223,93	183,47	289,49
Дільниця очищення транспортувальної води															
силове:	13	1,5	7,5	64,5	5	0,54	0,64	1,2	34,83	41,82	13	1,29	44,96	41,82	61,4

Продовження таблиці 1.3

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tg j	Середнє		п _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{мін} кВт	Р _{мак} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
освітлювальне:									9,01				10,36	4,72	
Всього:									43,84	41,82			55,32	46,54	72,29
Відділення підготовки вапняного молока															
силове:	9	10	30	145	3	0,57	0,87	0,57	82,65	46,84	9	1,34	110,35	51,52	121,78
освітлювальне:									9,31				10,7	4,88	
Всього:									91,96	46,84			121,05	56,4	133,54
Майданчик зберігання бурякових кагатів															
силове:	7	5	15	57,5	3	0,61	0,71	0,99	35,07	34,78	7	1,35	47,32	38,26	60,85
освітлювальне:									4,78				3,32	5,45	
Всього:									39,85	34,78			50,64	43,71	66,9
Насосна станція першого підйому															
силове:	6	11	30	165	2,7	0,7	0,86	0,59	115,5	68,53	6	1,28	147,63	75,38	165,76
освітлювальне:									1,81				2,08	0,95	
Всього:									117,31	68,53			149,71	76,33	168,05
Всього по ТП1, ТП2, ТП3:															
силове:	278	1,1	90	5491	81,8	0,61	0,84	0,64	3332,98	2122,97	122	1,07	3558,1	2122,97	4143,32
освітлювальне:									124,2				139,95	67,76	
БК 0,4 кВ										0				0	
Всього на шинах 0.4 кВ ТП1, ТП2, ТП3:									3457,18	2122,97			3698,05	2190,73	4298,24
Втрати в трансформаторах:													52,89	273,22	
Кількість трансформаторів: 5															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Kз = 0,86															
Всього на шинах 10 кВ ТП1, ТП2, ТП3:													3750,94	2463,95	4487,83

	Apk.
	15

Продовження таблиці 1.3

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} , кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tgj	Середнє		η _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
БК 0,4 кВ										0				0	
Всього на шинах 0.4 кВ ТП4, ТП5:									1726,52	1138,31			1911,55	1164,63	2238,39
Втрати в трансформаторах:													25,72	133,86	
Кількість трансформаторів: 3															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Kз = 0,75															
Всього на шинах 10 кВ ТП4, ТП5:													1937,27	1298,49	2332,19
ТП6															
Цех термічної обробки та сушіння жому															
силове:	57	2,5	75	1382,2	30	0,71	0,86	0,59	981,36	582,3	37	1,09	1069,38	582,3	1217,64
освітлювальне:									11,37				13,07	5,96	
Всього:									992,73	582,3			1082,45	588,26	1231,97
Ремонтно-будівельна діляниця															
силове:	9	2,2	7,5	24,5	3,4	0,48	0,81	0,72	11,76	8,51	7	1,5	17,6	9,36	19,93
освітлювальне:									8,59				9,87	4,5	
Всього:									20,35	8,51			27,47	13,86	30,77
Насосна станція технічного водопостачання															
силове:	4	3	5,5	16,5	1,8	0,71	0,87	0,57	11,71	6,64	4	1,35	15,83	7,3	17,43
освітлювальне:									2,32				2,67	1,22	
Всього:									14,03	6,64			18,5	8,52	20,37
Насосна станція живлення котельні															
силове:	13	3	40	83	13,3	0,71	0,87	0,57	58,93	33,4	4	1,35	79,66	36,74	87,72
освітлювальне:									1,68				1,93	0,88	
Всього:									60,61	33,4			81,59	37,62	89,85

Продовження таблиці 1.3

[illegible]

Продовження таблиці 1.3

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tgj	Середнє		n _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		P _{min} кВт	P _{max} кВт						P _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			P _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
силове:	6	5,5	7,5	37	1,4	0,51	0,68	1,08	18,87	20,35	6	1,51	28,47	22,39	36,22
освітлювальне:									10,34				11,89	5,42	
Всього:									29,21	20,35			40,36	27,81	49,01
Склад цукру-піску (Секція №4)															
силове:	8	5,5	7,5	48	1,4	0,48	0,72	0,96	23,04	22,21	8	1,46	33,55	24,43	41,5
освітлювальне:									10,72				12,22	5,91	
Всього:									33,76	22,21			45,77	30,34	54,91
Транспортно-логістичний залізничний відділ															
силове:	8	3,3	11	71,1	3,3	0,28	0,67	1,11	19,91	22,06	8	1,75	34,9	24,27	42,51
освітлювальне:									6,65				7,64	3,48	
Всього:									26,56	22,06			42,54	27,75	50,79
Сховище гранульованого сухого жому															
силове:	5	4	7,5	31	1,9	0,51	0,67	1,11	15,81	17,52	5	1,58	24,91	19,27	31,49
освітлювальне:									11,37				13,07	5,96	
Всього:									27,18	17,52			37,98	25,23	45,6
Комплекс очисних відстійників															
силове:	5	3	11	31	3,7	0,61	0,82	0,7	18,91	13,2	5	1,44	27,16	14,52	30,8
освітлювальне:									1,83				2,1	0,96	
Всього:									20,74	13,2			29,26	15,48	33,1
Територія заводу															
освітлювальне:									10,36				7,19	12,13	
Всього:									10,36	0			7,19	12,13	14,1
Всього по ТП7:															
силове:	92	1,1	23	721,9	20,9	0,43	0,69	1,05	312,5	328,75	63	1,15	360,69	328,75	488,03

1.4 Формування та аналіз графіків електроспоживання об'єкта

У даному підрозділі було розраховано параметри графіків електр. навант. Розрахунки були виконані згідно методики [1]. Результати розрахунків зведено в табл. 1.4.1 - 1.4.2 а також наієдені на рис. 1.1 - 1.5.

Таблиця 1.4.1 - Вихідні дані графіків електр. навант. цукрого заводу

Доба, години	Робочий період цукрового заводу		Вихідний період цукрового заводу	
	P,кВт	Q, квар	P,кВт	Q, квар
1	45	82	38	80
2	46	84	37	79
3	46	79	37	79
4	46	79	37	79
5	51	79	37	79
6	51	80	37	79
7	81	78	37	79
8	89	76	37	79
9	100	100	26	59
10	100	100	26	59
11	91	76	26	59
12	81	77	26	59
13	91	76	26	59
14	91	76	26	59
15	100	79	26	59
16	100	79	26	59
17	91	79	26	59
18	91	76	37	79
19	61	75	37	79
20	61	81	37	79
21	51	81	37	79
22	51	81	37	79
23	51	82	37	79
24	45	83	37	79

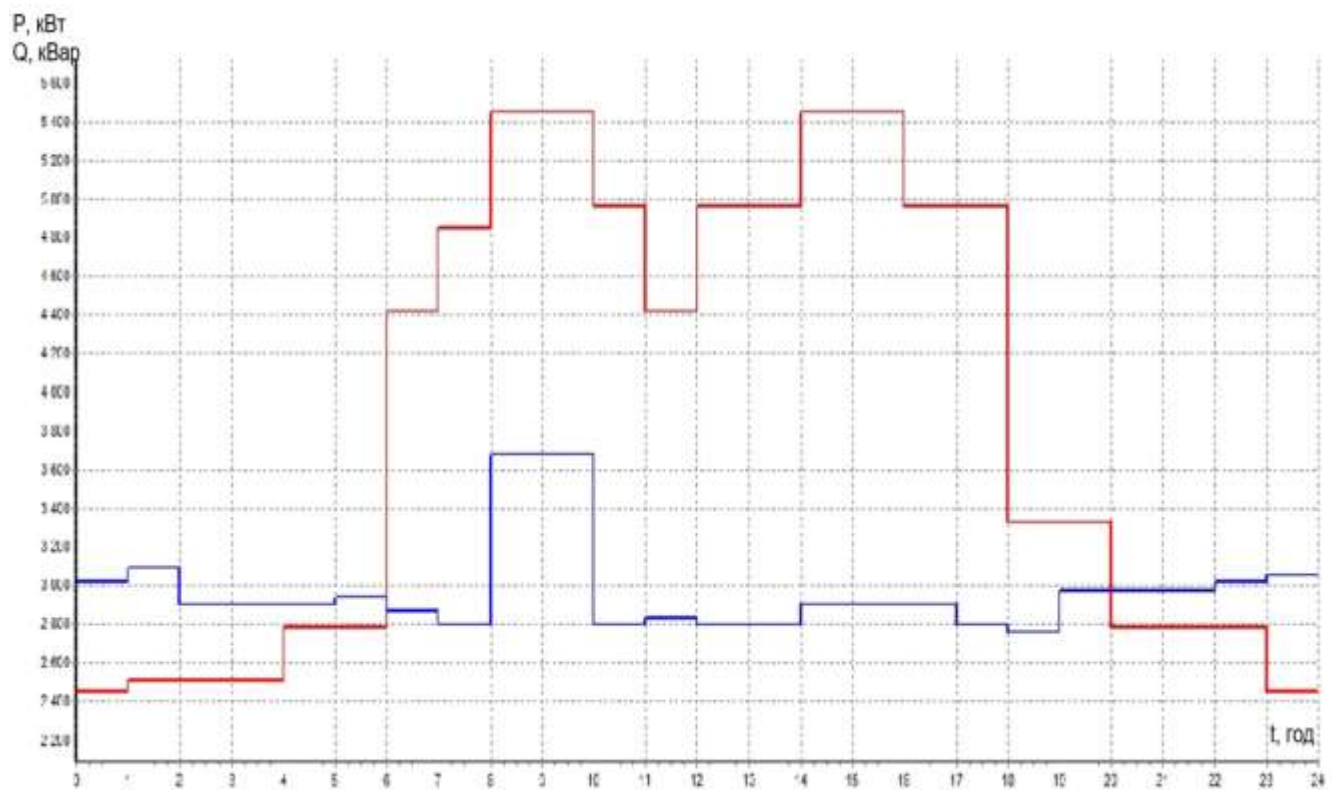


Рисунок 1.4.1 - Добовий графік цукрового заводу, для літні робочих днів, активного P та реактивного Q навантажень

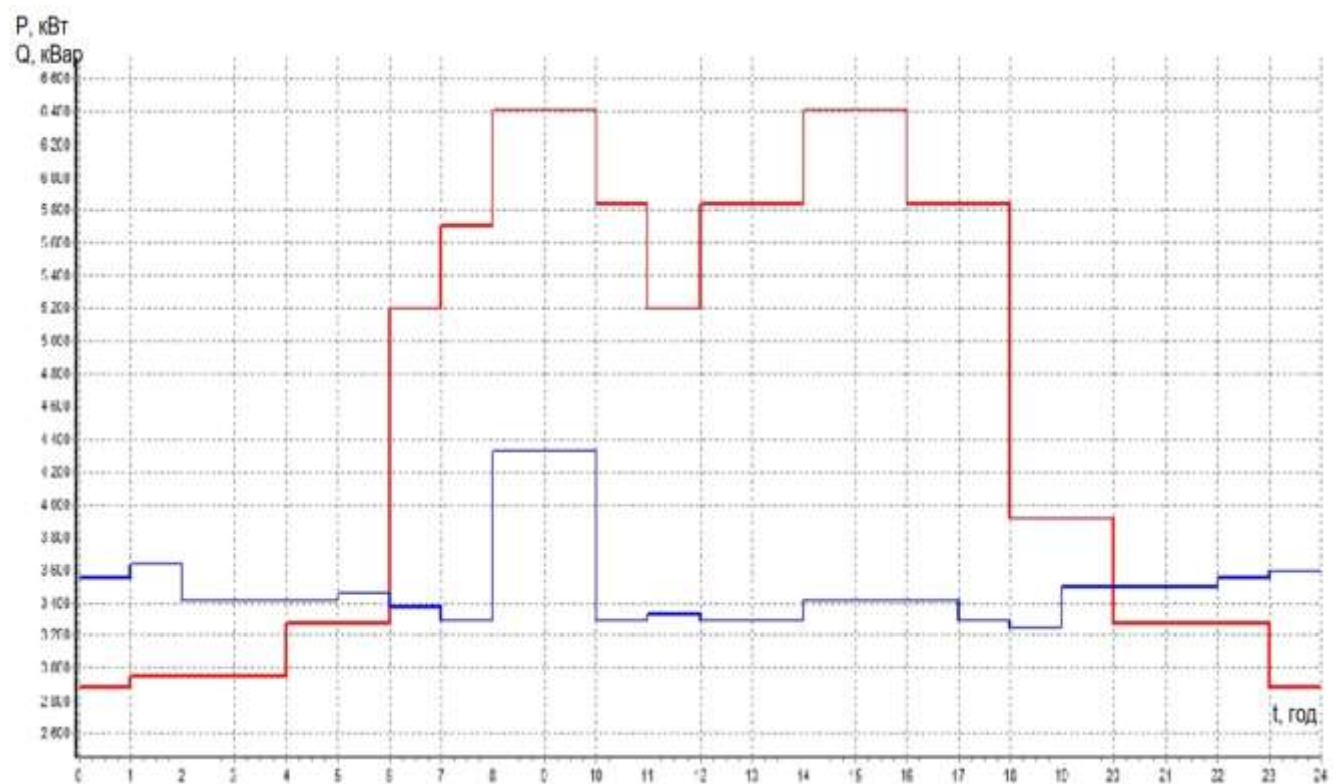


Рисунок 1.4.2 - Добовий графік цукрового заводу, для зимових робочий днів, активного P та реактивного Q навантажень

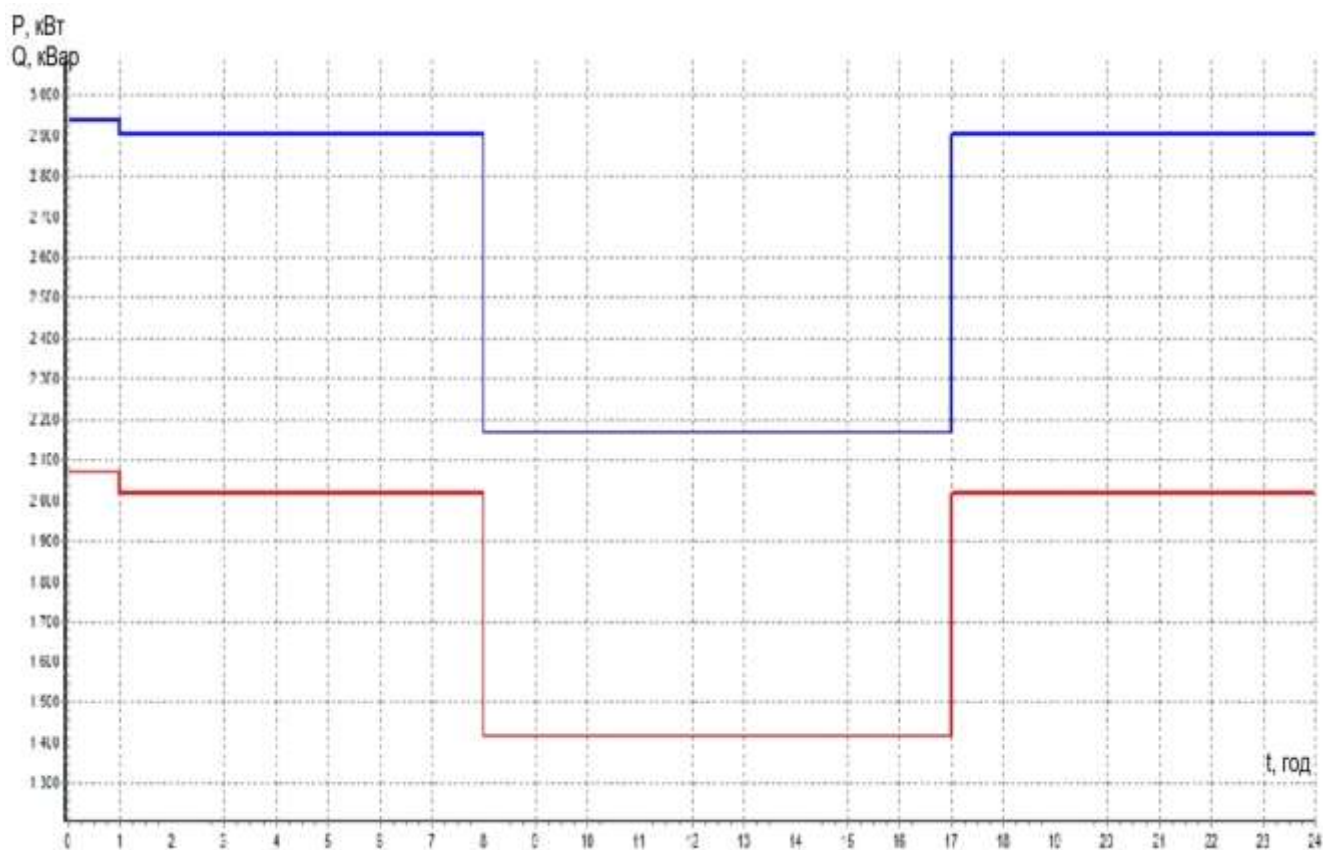


Рисунок 1.4.3 - Добовий графік цукрового заводу, для літніх вихідних днів, активного P та реактивного Q навантажень

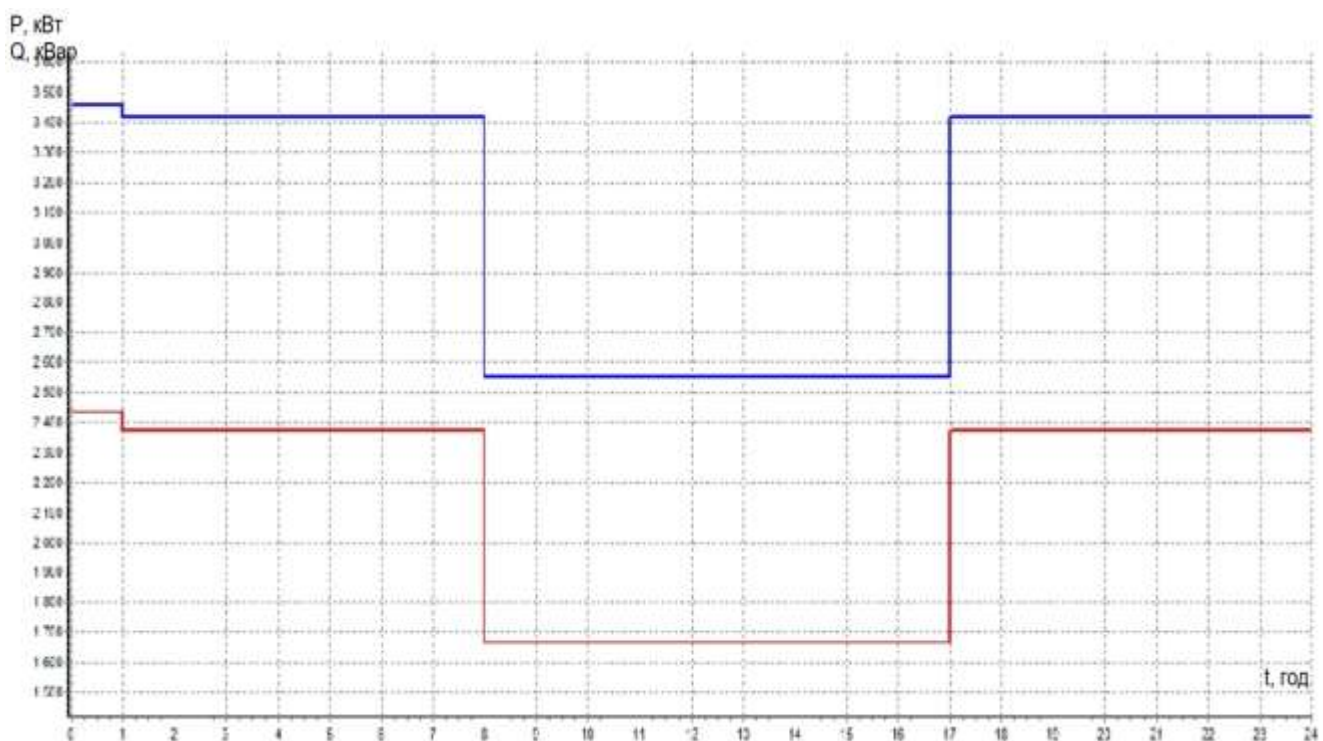


Рисунок 1.4.4 - Добовий графік цукрового заводу, для зимових вихідних днів, активного P та реактивного Q навантажень

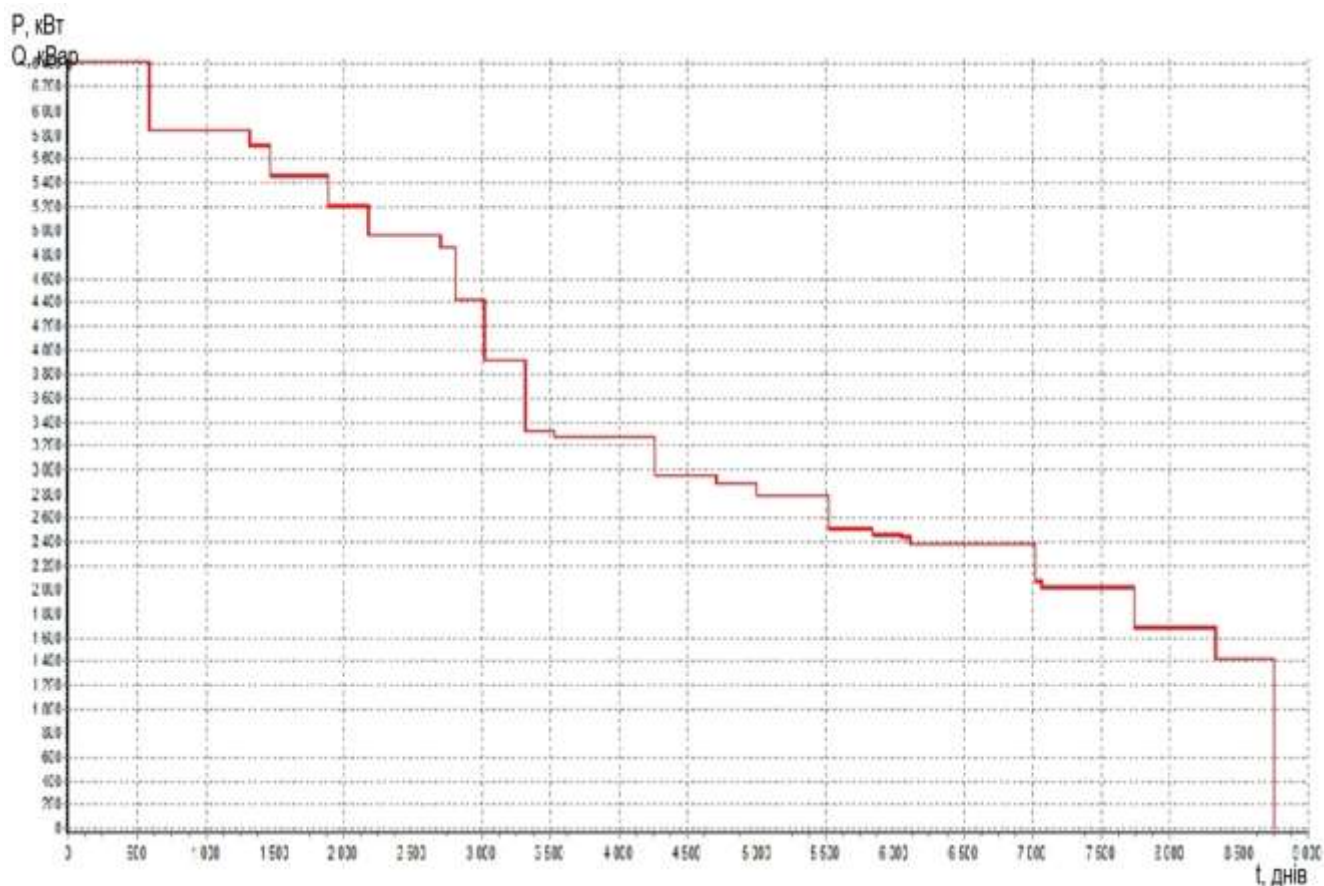


Рисунок 1.4.5 - Річний графік активного Р (по цукровому заводу)

Розрахункові величини графіків електричного навантаження цукрового заводу складають наступне:

$W_{з.р.} =$	16134573	кВт год.	$S_p =$	7747,14	МВА
$V_{з.р.} =$	12375342	кВар год.	$T_{max} =$	5401,229	год.
$W_{з.в.} =$	3293680	кВт год.	τ	3863,679	год.
$V_{з.в.} =$	4848350	кВар год.			
$W_{л.р.} =$	9796290	кВт год.			
$V_{л.р.} =$	7513590	кВар год.			
$W_{л.в.} =$	2067456	кВт год.			
$V_{л.в.} =$	3042912	кВар год.			
$W_p =$	31291999	кВт год.			
$V_p =$	27780194	кВар год.			

2. РОЗРОБКА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАВОДУ

Графічне відображення розподілу споживання енергії (картограма) реалізовано згідно з методичними рекомендаціями, викладеними у посібнику [1]. Кожен об'єкт на генеральному плані заводу представлений у вигляді кола, радіус якого пропорційний його розрахунковій потужності.

Алгоритм обчислення на прикладі продуктового технологічного комплексу:

Радіус кола, що відповідає силовому навантаженню цеху визначається:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_1}{\pi t}} = \sqrt{\frac{P_{\text{р.осв}} + P_{\text{р.сил}}}{\pi t}} = \sqrt{\frac{902,78 + 26,46}{3,14 \cdot 0,1}} = 54,39$$

Частка освітлювального навантаження у загальному балансі енергоспоживання об'єкта візуалізується у формі сектора з відповідним кутом α .

$$\alpha_i = \frac{P_{\text{і.осв}} \cdot 360}{P_i} = \frac{26,46 \cdot 360}{916,33} = 10,25^\circ$$

Координати умовного центру електричних навантажень (ЦЕН) підприємства, що визначають оптимальне місце розташування головної знижувальної підстанції, обчислюються як середньозважені величини:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{3138493,24}{9079,66} = 345,7 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{1175451,62}{9079,66} = 129,5 \text{ м}$$

Параметри геометричної побудови та просторового розміщення для всіх 27 підрозділів заводу систематизовано та наведено у підсумковій таблиці 2.1.

						Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Таблиця 2.1-Дані розрахунку ЦЕН цукрового заводу та побудови КЕН.

№ п/п	Найм. приміщень цукрового заводу	Р _{Р.сил} , кВт	Р _{Р.осв} , кВт	Р _Р , кВт	m	R, мм	α	x, м	y, м	Р·х, кВт·м	Р·у, кВт·м
1	Цех обробки буряків	902,78	26,46	929,24	0,1	54,39	10,25	377,59	61,93	350871,98	57550,03
2	Відділ фільтрації та очищення соку	1917,16	34,19	1951,35	0,1	78,81	6,31	332,41	84,52	648656,34	164928,93
3	Продуктовий технологічний	356,63	32,59	389,22	0,1	35,20	30,14	279,60	110,64	108825,58	43063,47
4	Дільниця фасування та пакування	24,04	11,99	36,03	0,1	10,71	119,80	248,96	127,97	8970,08	4610,82
5	Мийний комплекс буряків	215,67	8,26	223,93	0,1	26,70	13,28	363,79	42,38	81463,72	9490,92
6	Дільниця очищення транспортувальної	44,96	10,36	55,32	0,1	13,27	67,42	317,46	65,38	17562,16	3616,94
7	Теплоелектроцентральної (власна генерація)	1196,71	25,88	1222,59	0,1	62,38	7,62	347,12	137,34	424381,68	167904,91
8	Модульна газова котельня	102,62	11,52	114,14	0,1	19,06	36,33	349,17	178,32	39854,31	20353,73
9	Дільниця електротехнічного	197,24	5,6	202,84	0,1	25,41	9,94	300,96	20,12	61045,74	4081,93
10	Відділення підготовки вапняного молока	110,35	10,7	121,05	0,1	19,63	31,82	398,95	95,20	48292,44	11523,77
11	Комплекс зберігання енергоносіїв	99,53	0,12	99,65	0,1	17,81	0,43	395,25	183,00	39386,67	18236,39
12	Насосна станція першого підйому	108,26	2,08	110,34	0,1	18,74	6,79	154,26	94,95	17020,60	10477,00
13	Станція виробництва стисненого повітря	521,02	2,64	523,66	0,1	40,83	1,81	383,09	134,62	200610,77	70497,65
	Компресорна (АД,10кВ	1260	0	1260,00	0,1	63,33	0,00	383,09	134,62	482697,87	169627,32
14	Насосна станція технічного	15,83	2,67	18,50	0,1	7,67	51,96	516,73	324,69	9559,56	6006,82
15	Насосна станція живлення котельні	79,66	1,93	81,59	0,1	16,12	8,52	416,93	406,34	34017,69	33153,18
16	Транспортно- логістичний	34,9	7,64	42,54	0,1	11,64	64,65	93,39	182,68	3972,87	7771,03
17	Склад цукру-піску (Секція №1)	140,41	12,44	152,85	0,1	22,06	29,30	180,79	164,44	27633,24	25134,82
18	Склад цукру-піску (Секція №2)	27,98	8,75	36,73	0,1	10,81	85,76	127,73	247,81	4691,35	9102,12
19	Склад цукру-піску (Секція №3)	28,47	11,89	40,36	0,1	11,33	106,06	197,21	212,82	7959,57	8589,44
20	Склад цукру-піску (Секція №4)	33,55	12,38	45,93	0,1	12,09	97,03	276,40	172,00	12694,86	7899,86
21	Сховище резервної цукросировини	115,68	20,45	136,13	0,1	20,82	54,08	287,40	221,28	39124,07	30122,97
22	Майданчик зберігання бурякових кагатів	47,32	3,32	50,64	0,1	12,70	23,60	150,72	19,55	7632,66	989,96
23	Комплекс очисних відстійників	27,16	2,1	29,26	0,1	9,65	25,84	235,00	308,51	6876,04	9027,06
24	Цех термічної обробки та сушіння жому	1069,38	13,07	1082,45	0,1	58,70	4,35	382,27	231,55	413790,50	250639,33
25	Сховище гранульованого сухого	24,91	13,07	37,98	0,1	11,00	123,89	299,07	259,97	11358,52	9873,59
26	Ремонтно-механічний підрозділ	33,1	17,58	50,68	0,1	12,70	124,88	298,98	259,97	15152,50	13175,18
27	Ремонтно-будівельна дільниця	17,6	9,87	27,47	0,1	9,35	129,35	442,32	242,97	12150,40	6674,26
28	Територія цукрового заводу	0	7,19	7,19	0,1	4,78	360,00	311,47	184,73	2239,46	1328,20
	Всього по заводу	8752,92	326,74	9079,66						3138493,24	1175451,62

Арк.

26

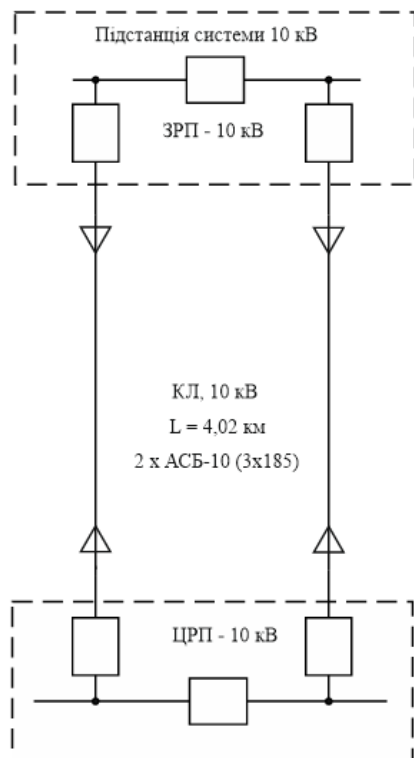
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата
-----	------	----------	---------	------

3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРО-ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

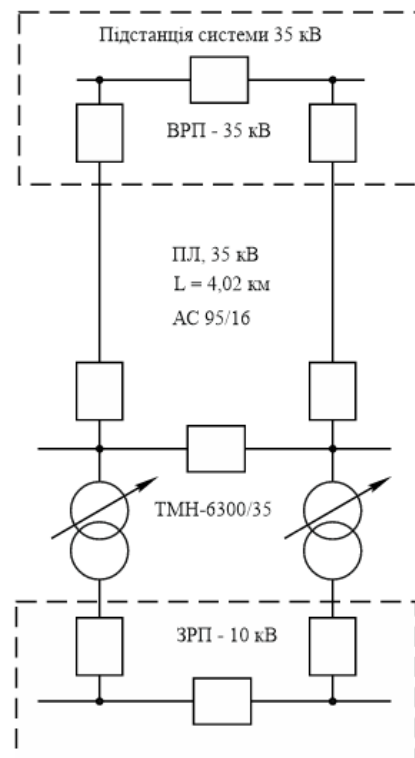
Метою даного етапу проектування є вибір найбільш раціональних схем зовнішнього та внутрішнього електрозабезпечення цукрового заводу на основі порівняння технічних і вартісних показників.

3.1. Обґрунтування робочої напруги та конфігурації схеми зовнішнього живлення

Відповідно до методики [1], проведено порівняльне техніко-економічне дослідження двох альтернативних варіантів подачі енергії від вузла живлення (КТП 35/10 кВ), що знаходиться на відстані 4,02 км (рис. 3.1).



Побудова кабельної лінії (КЛ)
напругою 10 кВ



Побудова повітряної лінії (ПЛ)
напругою 35 кВ

Рисунок 3.1 - Схема зовнішнього електропостачання цукрового заводу.

Варіанти, що розглядаються: Побудова кабельної лінії (КЛ) напругою 10 кВ; Будівництво повітряної лінії (ПЛ) напругою 35 кВ із встановленням на території заводу ГЗП 35/10 кВ.

Аналіз Варіанту №1 (Живлення на напрузі 10 кВ): Електропостачання реалізується двома паралельними КЛ (рис. 3.1 а). Розрахунковий струм лінії:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						27

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{7747,14}{\sqrt{3} \cdot 10} = 447,28 \text{ А}$$

Проектується встановлення двох КЛ марки АСБ-10 (3х185) із параметрами:
 $I_{доп} = 390 \text{ А}$, $\Delta P_{1км} = 57 \text{ кВт/км}$, $K_{КЛ} = 398,75 \text{ тис. грн./км}$.

Контроль обраної кабельної лінії (КЛ) за критерієм допустимого теплового нагріву в умовах стандартної експлуатації здійснюється за формулою:

$$I_p = 223,22 \text{ А} \leq K_n I_{доп} = 0,92 \cdot 390 = 358,8 \text{ А}$$

Аналіз працездатності обраної лінії АСБ-10 (3х185) у післяаварійних обставинах за критерієм термічної стійкості:

$$I_{р.ав} = 2I_p = 2 \cdot 223,22 = 446,44 \text{ А} \leq K_{ав} K_n I_{доп} = 1,25 \cdot 1 \cdot 390 = 487,5 \text{ А}$$

Марка кабелю АСБ-10 (3х185) повністю відповідає встановленим технічним вимогам за результатами проведених перевірок. Розрахунковий показник експлуатаційного завантаження даної лінії у штатному (нормальному) режимі:

$$K_z = \frac{I_p}{I_{доп}} = \frac{223,22}{390} = 0,57$$

Величина технічних втрат потужності в межах проекрованої кабельної лінії марки АСБ-10(3х185) становить:

$$\Delta P_{кл} = \Delta P_{1км} l_{\Sigma} K_z^2 = 57 \cdot 8,04 \cdot 0,3249 = 148,9 \text{ кВт}$$

Обсяг втрат електричної енергії в обраній КЛ марки АСБ-10(3х185) становить:

$$\Delta W_z = \Delta P_z \tau = 148,9 \cdot 3863,68 = 575301,95 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Сумарні річні витрати підприємства на компенсацію втрат електричної енергії в проектованій кабельній лінії марки АСБ-10(3х185) становлять:

$$C_{вир} = \Delta W_{\Sigma} C_o = 575301,95 \cdot 12,1078 \cdot 0,001 = 6965,64 \text{ тис.грн}$$

Показники кошторисної вартості (капітальних інвестицій) для реалізації першого варіанта зовнішньої мережі напругою 10 кВ систематизовано у табл. 3.1.1

Обчислення щорічних експлуатаційних витрат цукрового заводу за першим сценарієм зовнішнього енергопостачання (10 кВ) представлено у таблиці 3.1.2.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		28

Таблиця 3.1.1 - Обсяг капітальних вкладень у систему зовнішнього енергозабезпечення (Варіант №1, 10 кВ)

№	Назва заводського елемента схеми	Од. виміру	Кількість	Вартість вкладень	Всього
1	КЛ 10 кВ	км	8,04	2636,13	21194,49
2	Траншея	км	4,02	300	1206
3	Шафи КРП серії КУ-10	шт.	2	120	240
Всього					22640,49

Таблиця 3.1.2 - Показники річних експлуатаційних витрат для першого проектного рішення

№ з/п	Назва електричного елемента схеми	K_j , тис.грн.	P_{aj} , %	C_{aj} , тис.грн.	P_{ej} , %	C_{aj} , тис.грн.	C_j , тис.грн.
1	КЛ 10 кВ	21194,5	5	199,774	5	199,774	2119,45
2	Траншея	1206	5	31,1873	5	31,1873	120,6
3	Шафи КРП серії КУ-10	240	15	137,34	5	45,78	48
Всього для варіанту схеми 1							2288,05

До складу комутаційного вузла схеми включено високовольтний вимикач та кабельну лінію (КЛ). Показники надійності цих компонентів прийняті наступними:
 - вимикач на 10 кВ має: $T_b = 0,45 \cdot 10^{-3}$ рік, $\lambda_a = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/рік, $K_n = 2 \cdot 10^{-3}$ в.о.; - КЛ 10 кВ має: $T_b = 0,2814 \cdot 10^{-3}$ рік, $\lambda_a = 0,3216$ 1/рік, $K_n = 0,3618 \cdot 10^{-4}$.

Сумарний параметр потоку відмов для першої гілки ел.схеми визначається

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,004 + 0,3216 = 0,3256 \text{ 1/рік}$$

Середньостатистичний показник тривалості відновлення працездатності 1-ої гілки

$$T_g = \frac{\sum \lambda_i T_{gi}}{\lambda} = \frac{(0,004 \cdot 0,00045 + 0,3216 \cdot 0,0002814)}{0,3256} = 0,00028347 \text{ рік}$$

Показник очікуваного планового простою для першої гілки електромережі:

$$K_n = 1,2 K_{n\max} = 1,2 \cdot 0,002 = 0,0024$$

Величина коефіцієнта аварійного простою для першої гілки ел. схеми:

$$K_a = \lambda T_g = 0,3256 \cdot 0,00028347125 = 0,00009229$$

Імовірність виникнення критичної ситуації, за якої 1-ша гілка схеми перебуває у стані регламентного обслуговування (планового ремонту), а друга виходить із ладу через раптове пошкодження, визначається за допомогою коефіцієнта простою:

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					29

$$K_{ав} = 0.5 \lambda K_n^2 = 0,5 \cdot 0,3256 \cdot 0,00000576 = 0,000000937728$$

Коефіцієнт аварійного простою для варіанту 2-х ланцюгів:

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2K_{ав} = 0,00000000851897 + 2 \cdot 0,000000937728 = 0,000001884$$

Сумарна середньорічна тривалість перебування системи в аварійному стані:

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,000001884 \cdot 8760 = 0,0165$$

Прогнозовані фінансові втрати підприємства, зумовлені недопостачанням електричної енергії під час аварійних ситуацій, розраховуються як:

$$Y = Y_0 P_{cp} T_a = 23 \cdot 3,95 \cdot 0,0165 = 1,5 \text{ тис.грн.}$$

Сумарні зведені витрати за 1-им проектним сценарієм (схема на 10 кВ):

$$\begin{aligned} Z_i &= E_n K_i + C_i + C_{втр.i} + Y_i = \\ &= 0.12 \cdot 22640,48 + 2288,048 + 6965,64 + 1,5 = 11972,05 \text{ тис.грн./рік} \end{aligned}$$

За ідентичним алгоритмом здійснено обчислення основних показників для другого проектного рішення (схема напругою 35 кВ). Результати техніко-економічного аналізу 2-х варіантів живлення підприємства таблиці 3.1.3.

Таблиця 3.1.3 - Зведені техніко-економічні характеристики схем живлення

Техніко-економічні показники	Варіанти живлення цукрового заводу	
	1-й на 10 кВ	2-й на 35 кВ
Капітальні вкладення	22640,485	15143,20
Поточні витрати	2288,0485	2964,32
Вартість втрат ел.енергії	6965,64	5691,97
Збиток	1,5	2,41
Зведені витрати	11972,047	10475,88

Зіставлення отриманих результатів обчислень наведено у підсумковій таблиці 3.3. Аналіз представлених даних дозволяє стверджувати, що зведені витрати за другим проектним рішенням (зовнішнє електроживлення на напрузі 35 кВ) є економічно вигіднішими порівняно з першим варіантом (10 кВ). З огляду на меншу капіталомісткість та нижчі експлуатаційні витрати, для подальшого проектування та деталізації технічних рішень приймається Варіант №2 (мережа 35 кВ).

3.2. Вибір структури та топології внутрішньої схеми розподілу енергії

Порівняльний аналіз архітектур внутрішнього електрозабезпечення показав, що магістральна схема має певні переваги за критерієм капітальних витрат. Однак, враховуючи специфіку цукрового виробництва та високі вимоги до безперебійності технологічних процесів, радіальна схема розподілу енергії є більш доцільною завдяки вищому рівню експлуатаційної надійності.

З огляду на пріоритетність гарантованого живлення відповідальних споживачів, для подальшої розробки проекту цукрового заводу обрано радіальну структуру розподілу електричної енергії. Графічне представлення прийнятої схеми внутрішнього електропостачання підприємства наведено на рисунку 3.2.

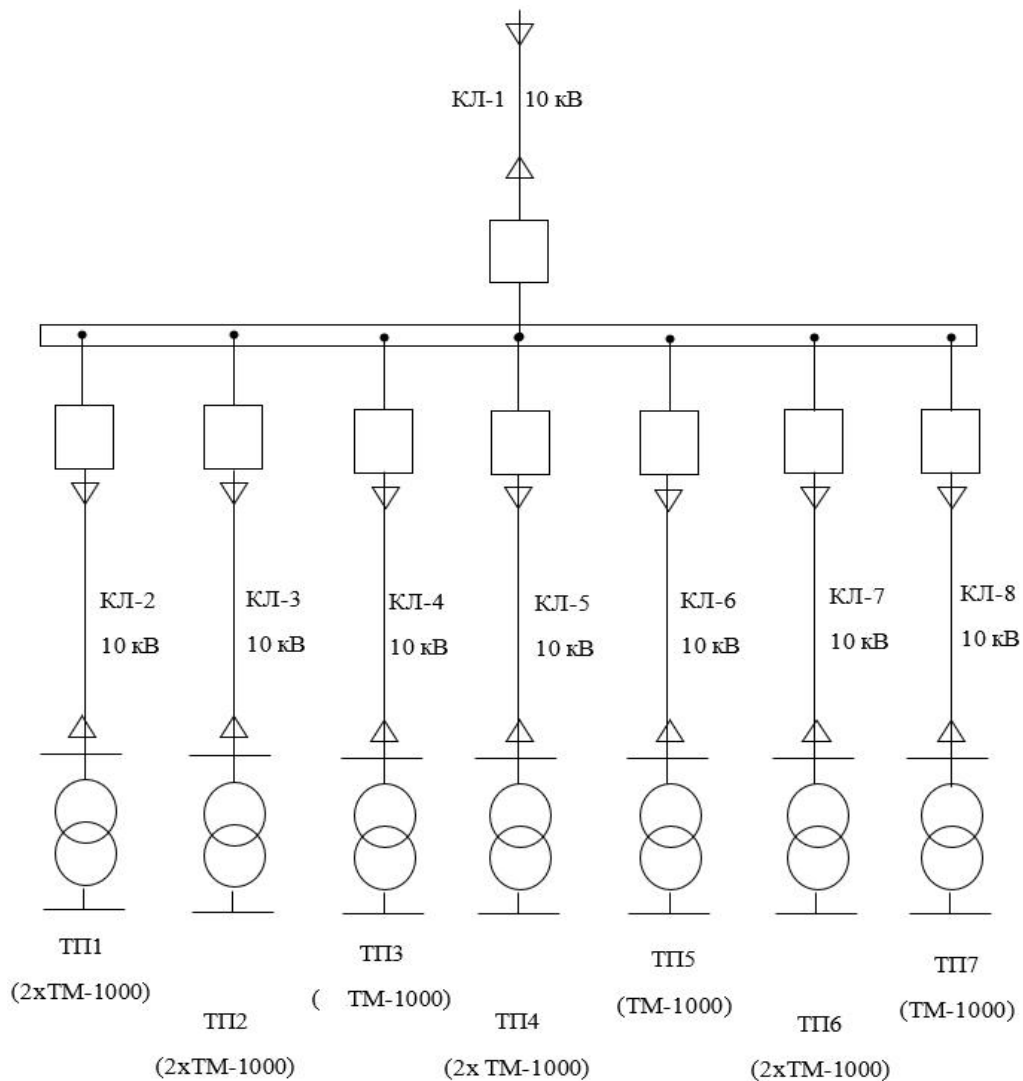


Рисунок 3.2 - Прийнята схема внутрішнього енергозабезпечення цукрового заводу

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					31

4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У МЕРЕЖАХ ЗАВОДУ

4.1 Оцінка балансу реактивної енергії та визначення дефіциту потужності.

Метою даного розрахунку є визначення оптимального співвідношення між споживанням та генерацією реактивної енергії для мін. втрат у заводській мережі. Сумарний обсяг низьковольтного електроспоживання об'єктів заводу ($U < 1 \text{ кВ}$):

$$P_n = \sum P_{\text{ТП}} = 7250,26 \text{ кВт} \quad Q_n = \sum Q_{\text{ТП}} = 4380,37 \text{ кВАр}$$

Технологічні втрати реактивної потужності в цехових КТП заводу:

$$\Delta P_m = \sum \Delta P_{\text{ТП}} = 99,84 \text{ кВт} \quad \Delta Q_m = \sum \Delta Q_{\text{ТП}} = 518,5 \text{ кВАр}$$

Сумарне споживання енергії високовольтним обладнанням заводу:

$$\Delta P_{\text{в}} = \sum \Delta P_{\text{ВН}} = 1260 \text{ кВт} \quad \Delta Q_{\text{в}} = \sum \Delta Q_{\text{ВН}} = 945 \text{ кВАр}$$

Показник ном. реактивної потужності для синхронного генератора цукр.заводу:

$$\Delta Q_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{СТ}} = 1000 \cdot 0,484 = 484 \text{ кВАр}$$

Величина активної потужності встановленого на цукровому заводі СГ:

$$P_{\text{СТ}} = N_{\text{СТ}} \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{вик}} = 2 \cdot 1000 \cdot 0,7 = 1400 \text{ кВт}$$

Номінальна реактивна потужність, що генерується заводського СГ:

$$\Delta Q_{\text{сг}} = P_{\text{СТ}} \cdot \text{tg} \varphi_n = 1400 \cdot 0,484 = 677,6 \text{ кВАр}$$

Граничний рівень реактивної потужності, що генерується внутрішнім ДЖ:

$$\Delta Q_{\text{max сг}} = \frac{\alpha_M P_{\text{СТ}} \cdot \text{tg} \varphi_n}{\eta} = \frac{1,21 \cdot 1400 \cdot 0,484}{0,9} = 911 \text{ кВАр}$$

Загальний обсяг споживання активної потужності всіма підрозділами заводу:

$$P_p = P_n + \Delta P_m + P_{\text{в}} - P_{\text{сг}} = 7250,26 + 99,84 + 1260 - 1400 = 7210,1 \text{ кВт},$$

Сукупна потреба підприємства в реактивній потужності дорівнює:

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_m + Q_{\text{в}} - Q_{\text{сг}} = 4380,37 + 518,5 + 945 - 677,6 = 5166,27 \text{ кВАр}$$

Величина реактивної потужності, яка залучається із зовнішньої енергосистеми:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		32

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 7210,1 \cdot 0,15 = 1081,52 \text{ кВАр}$$

Сумарна потужність засобів компенсації, що встановлюються на цукрозаводі:

$$Q_{\text{кп}} = Q_p - Q_e = 5166,27 - 1081,52 = 4084,75 \text{ кВАр}$$

Мінімально необхідна кількість ТП для забезпечення роботи заводу:

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{7250,26}{0,7 \cdot 1000} = 10,36 \approx 11 \text{ шт.}$$

Проаналізуємо різні сценарії комплектації підстанцій із варіативною кількістю трансформаторів: $N_T = N_0$, $N_T = N_0 + 1$, $N_T = N_0 + 2$.

Варіант 1. Використання базової кількості трансформаторів у кількості $N = N_0 = 11$ шт. Гранична реактивна потужність, яку технічно можливо транспортувати з високовольтної мережі 10 кВ до низьковольтних споживачів 0,4 кВ:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{ном}})^2 - (P_n + \Delta P_m)^2} = \\ &= \sqrt{(11 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 7250,26^2} = 2593,02 \text{ кВАр} \end{aligned}$$

Потужність КП, що підлягають встановленню в мережах напругою до 1000 В:

$$Q_{\text{кн}} = Q_n - Q_1 = 4380,37 - 2593,35 = 1787,35 \text{ кВАр}$$

Потрібна потужність компенсаторів на високовольтній стороні 10 кВ:

$$Q_{\text{кв}} = Q_p - Q_{\text{кн}} - Q_e = 4932,87 - 1787,35 - 1081,52 = 2064 \text{ кВАр}$$

Визначення параметрів необхідного обладнання для компенсації у випадках із кількістю трансформаторів $N_T = N_0 + 1$, $N_T = N_0 + 2$ здійснюється аналогічно метод.

Таблиця 4.1.1 - Зведені показники розрахунку потужності засобів компенсації для цукрового заводу

№ варіанту	Кількість тр-торів	Q_1 , квар	$Q_{\text{кн}}$, кВАр	$Q_{\text{кв}}$, квар
1	11	2593,02	1787,35	2064,00
2	12	4241,9	138,47	3712,88
3	13	5499,43	0	3851,35

Таблица 4.1.2 - Розрахунок електричних навантажень цукрового заводу вище 1000 В без БК

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	К _и	cosj	tgj	Середнє		n _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
ТП1, ТП2, ТП3															
Цех обробки буряків															
силове:	78	3	55	1568	18,3	0,51	0,77	0,82	794,82	652,31	57	1,14	902,78	652,31	1113,79
освітлювальне:									23,26				26,46	12,07	
Всього:									818,08	652,31			929,24	664,38	1142,32
Відділ фільтрації та очищення соку															
силове:	61	1,5	90	2580	60	0,69	0,92	0,43	1780,2	758,36	57	1,08	1917,16	758,36	2061,7
освітлювальне:									30,06				34,19	15,59	
Всього:									1810,26	758,36			1951,35	773,95	2099,23
Продуктовий технологічний комплекс															
силове:	66	2,2	30	561,5	13,6	0,55	0,69	1,05	308,83	323,96	37	1,15	356,63	323,96	481,8
освітлювальне:									28,35				32,59	14,86	
Всього:									337,18	323,96			389,22	338,82	516,03
Дільниця фасування та пакування															
силове:	11	1,1	5,5	31,5	5	0,6	0,75	0,88	18,9	16,67	11	1,27	24,04	16,67	29,25
освітлювальне:									10,43				11,99	5,47	
Всього:									29,33	16,67			36,03	22,14	42,29
Мийний комплекс буряків															
силове:	27	3	55	318	18,3	0,51	0,67	1,11	162,18	179,7	12	1,33	215,67	179,7	280,72
освітлювальне:									7,19				8,26	3,77	
Всього:									169,37	179,7			223,93	183,47	289,49
Дільниця очищення транспортувальної води															
силове:	13	1,5	7,5	64,5	5	0,54	0,64	1,2	34,83	41,82	13	1,29	44,96	41,82	61,4

Продовження таблиці 4.1.2

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} , кВт		Р _{сум} кВт	m	К _и	cos j	tgj	Середнє		n _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
освітлювальне:									9,01				10,36	4,72	
Всього:									43,84	41,82			55,32	46,54	72,29
Відділення підготовки вапняного молока															
силове:	9	10	30	145	3	0,57	0,87	0,57	82,65	46,84	9	1,34	110,35	51,52	121,78
освітлювальне:									9,31				10,7	4,88	
Всього:									91,96	46,84			121,05	56,4	133,54
Майданчик зберігання бурякових кагатів															
силове:	7	5	15	57,5	3	0,61	0,71	0,99	35,07	34,78	7	1,35	47,32	38,26	60,85
освітлювальне:									4,78				3,32	5,45	
Всього:									39,85	34,78			50,64	43,71	66,9
Насосна станція першого підйому															
силове:	6	11	30	165	2,7	0,7	0,86	0,59	115,5	68,53	6	1,28	147,63	75,38	165,76
освітлювальне:									1,81				2,08	0,95	
Всього:									117,31	68,53			149,71	76,33	168,05
Всього по ТП1, ТП2, ТП3:															
силове:	278	1,1	90	5491	81,8	0,61	0,84	0,64	3332,98	2122,97	122	1,07	3558,1	2122,97	4143,32
освітлювальне:									124,2				139,95	67,76	
БК 0,4 кВ										-2025				-2025	
Всього на шинах 0.4 кВ ТП1, ТП2, ТП3:									3457,18	97,97			3698,05	165,73	3701,76
Втрати в трансформаторах:													42,4	220,73	
Кількість трансформаторів: 5															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,74															
Всього на шинах 10 кВ ТП1, ТП2, ТП3:													3740,45	386,46	3760,36

Продовження таблиці 4.1.2

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} , кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tgj	Середнє		п _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
ТП4, ТП5															
Теплоэлектроцентрально (власна генерація)															
силове:	38	3	125	1560,5	41,7	0,68	0,82	0,7	1061,14	740,68	25	1,13	1196,71	740,68	1407,38
освітлювальне:									22,51				25,88	11,8	
Всього:									1083,65	740,68			1222,59	752,48	1435,6
Станція виробництва стисненого повітря															
силове:	12	4	125	605	31,2	0,74	0,88	0,54	447,7	241,64	10	1,16	521,02	265,8	584,9
освітлювальне:									2,3				2,64	1,2	
Всього:									450	241,64			523,66	267	587,8
Модульна газова котельня															
силове:	9	2,2	30	128,4	13,6	0,62	0,72	0,96	79,61	76,73	9	1,29	102,62	84,4	132,87
освітлювальне:									10,02				11,52	5,25	
Всього:									89,63	76,73			114,14	89,65	145,14
Комплекс зберігання енергоносіїв															
силове:	10	7,5	30	165	4	0,41	0,78	0,8	67,65	54,27	10	1,47	99,53	59,7	116,06
освітлювальне:									1,06				0,12	0,05	
Всього:									68,71	54,27			99,65	59,75	116,19
Ремонтно-механічний підрозділ															
силове:	15	3	15	104	5	0,18	0,61	1,3	19,24	24,99	14	1,72	33,1	24,99	41,47
освітлювальне:									15,29				17,58	8,02	
Всього:									34,53	24,99			50,68	33,01	60,48
Всього по ТП4, ТП5:															
силове:	84	2,2	125	2562,9	56,8	0,65	0,83	0,68	1675,34	1138,31	41	1,11	1853,81	1138,31	2175,4
освітлювальне:									51,18				57,74	26,32	

Продовження таблиці 4.1.2

Назва групи споживачів	К-ть ЕС	Р _{одн'} кВт		Р _{сум} кВт	m	K _и	cos j	tgj	Середнє		n _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		Р _{min} кВт	Р _{max} кВт						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _p , кВт	Q _p , кВар	S _p , кВА
БК 0,4 кВ										-450				-450	
Всього на шинах 0.4 кВ ТП4, ТП5:									1726,52	688,31			1911,55	714,63	2040,76
Втрати в трансформаторах:													22,62	118,35	
Кількість трансформаторів: 3															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Kз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП4, ТП5:													1934,17	832,98	2105,91
ТП6															
Цех термічної обробки та сушіння жому															
силове:	57	2,5	75	1382,2	30	0,71	0,86	0,59	981,36	582,3	37	1,09	1069,38	582,3	1217,64
освітлювальне:									11,37				13,07	5,96	
Всього:									992,73	582,3			1082,45	588,26	1231,97
Ремонтно-будівельна діляниця															
силове:	9	2,2	7,5	24,5	3,4	0,48	0,81	0,72	11,76	8,51	7	1,5	17,6	9,36	19,93
освітлювальне:									8,59				9,87	4,5	
Всього:									20,35	8,51			27,47	13,86	30,77
Насосна станція технічного водопостачання															
силове:	4	3	5,5	16,5	1,8	0,71	0,87	0,57	11,71	6,64	4	1,35	15,83	7,3	17,43
освітлювальне:									2,32				2,67	1,22	
Всього:									14,03	6,64			18,5	8,52	20,37
Насосна станція живлення котельні															
силове:	13	3	40	83	13,3	0,71	0,87	0,57	58,93	33,4	4	1,35	79,66	36,74	87,72
освітлювальне:									1,68				1,93	0,88	
Всього:									60,61	33,4			81,59	37,62	89,85

Продовження таблиці 4.1.2

[illegible]

Продовження таблиці 4.1.2

[illegible]

4.2 Вибір параметрів та локалізація пристроїв компенсації реактивної потужності

Результати розрахунку параметрів засобів компенсації, що заплановані до впровадження на майданчику цукрового заводу (на рівнях напруги 0,4 кВ та 10 кВ) для трьох розрахункових сценаріїв, систематизовано у табл. 4.2.1 – 4.2.3.

Таблиця 4.2.1-Параметри вибору БК при кількості трансформаторів $N_T=N_0=11$

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп}-Q_{бк}$, кВАр	K_3	S_p , кВА
ТП1,2,3	5	3750,94	2463,95	0	2463,95	6·402;	2412	51,95	0,75	3751,3
ТП4,5	3	1937,27	1298,49	810,55	487,94	3·150;	450	37,94	0,7	2114,94
ТП6	2	1199,11	721,36	722,59	0		0	0	0,7	1399,37
ТП7	1	462,78	415,07	525,2	0		0	0	0,62	621,65

Загальна потужність БК, встановлених на стороні заводу 0,4 кВ $Q_{кн} = 2862$ кВар. Сумарна потужність БК для високовольної сторони 10 кВ $Q_{кв} = 1200$ квар.

Таблиця 4.2.2-Показники вибору БК при збільшенні трансф-ів $N_T=N_0+1=12$

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп}-Q_{бк}$, кВАр	K_3	S_p , кВА
ТП1,2,3	6	3750,94	2463,95	1889,56	574,39	2·268;	536	38,39	0,7	4217,41
ТП4,5	3	1937,27	1298,49	810,55	487,94	4·112,5;	450	37,94	0,7	2114,94
ТП6	2	1199,11	721,36	722,59	0		0	0	0,7	1399,37
ТП7	1	462,78	415,07	525,2	0		0	0	0,62	621,65

Загальна потужність БК на низькій стороні 0,4 кВ $Q_{кн} = 986$ кВар. Потужність засобів компенсації на стороні 10 кВ становить $Q_{кв} = 2700$ квар.

Таблиця 4.2.3-Вибір БК при максимальній кількості ТП $N_T = N_0 + 2 = 13$

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп}-Q_{бк}$, кВАр	K_3	S_p , кВА
ТП1,2,3	6	3750,94	2463,95	1889,56	574,39	2·268;	536	38,39	0,7	4217,41
ТП4,5	4	1937,27	1298,49	2021,63	0		0	0	0,58	2332,19
ТП6	2	1199,11	721,36	722,59	0		0	0	0,7	1399,37
ТП7	1	462,78	415,07	525,2	0		0	0	0,62	621,65

Обсяг компенсації на низькій стороні заводської мережі складає $Q_{кн} = 850$ кВар. Показник потужності БК на високовольтній стороні 10 кВ $Q_{кв} = 3000$ квар.

Методика визначення приведених витрат на заходи з компенсації для сценарію з базовою кількістю КТП $N_T = N_0$ представлена нижче. Технічні втрати активної потужності в низьковольтних компенсуючих пристроях:

$$\Delta P_{KH} = P_{ПТТ}^{KH} \cdot Q_{KH} = 0,0045 \cdot 2862 = 12,88 \text{ кВт}$$

Обсяг втрат активної потужності у високовольтному обладнанні компенсації:

$$\Delta P_{KB} = P_{ПТТ}^{KB} \cdot Q_{KB} = 0,003 \cdot 1200 = 3,6 \text{ кВт}$$

Втрати енергії в трансформаторних підстанціях заводу, спричинені транзитом реактивних потоків, визначаються наступним чином:

$$\Delta P_{ПТ} = \frac{P_{HH}^2 + Q_1^2}{U_H^2} R_T \cdot 10^{-3} = \frac{7250,26^2 + 2593,0^2}{10^2} \cdot 0,08 \cdot 0,001 = 47,43 \text{ кВт}$$

Звідки отримано підсумкове значення активних втрат.

$$R_{екв} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ном}^2}{N \cdot S_{ном}^2} \cdot 10^3 = \frac{8,6 \cdot 10^2}{11 \cdot 1000^2} \cdot 1000 = 0,08 \text{ Ом}$$

Втрати потужності в синхронних електроприводах цукрового заводу:

$$\begin{aligned} \Delta P_{CD} &= Q_{CD} \left(\frac{D_1}{Q_{ном}} + \frac{2D_2 Q_{CD}}{Q_{ном}^2 N_{CD}} \right) Q_{CD} \frac{D_2}{Q_{ном}^2 N_{CD}} = \\ &= 911 \cdot \left(\frac{0,9}{484} + \frac{2 \cdot 0,75 \cdot 911}{484^2 \cdot 2} \right) + 911^2 \frac{0,75}{484^2 \cdot 2} = 5,59 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Кошторисна вартість встановлення засобів компенсації на рівні напруги 0,4кВ:

$$K_{KH} = \sum_{i=1}^n N_{KH_i} \cdot K_{KH_i} = 2 \cdot 100 + 6 \cdot 170 = 1220 \text{ тис.грн.}$$

Інвестиційні витрати на придбання та монтаж КП для мережі 10 кВ:

$$K_{KB} = \sum_{i=1}^n N_{KB_i} \cdot K_{KB_i} = 2 \cdot 250 = 500 \text{ тис.грн.}$$

Загальна балансова вартість комплектних підстанцій заводу складає:

$$K_{КТП} = N_{КТП(2)} \cdot K_{КТП(2)} + N_{КТП(1)} \cdot K_{КТП(1)} = 4 \cdot 1100 + 3 \cdot 682 = 3564,5 \text{ тис.грн.}$$

Сумарні приведені річні витрати на функціонування системи компенсації реактивної потужності заводу:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		42

$$Z = E_H (K_{KH} + K_{KB} + K_{KTP}) + C_0 \tau (\Delta P_{KH} + \Delta P_{KB} + \Delta P_{TP}) =$$

$$= 0,12(1220 + 200 + 6446) + 12,13863,7(12,88 + 3,6 + 47,43 + 5,59) \cdot 10^{-3} = 4231,18 \text{ тис. грн.}$$

Аналогічний розрахунок економічних показників для конфігурацій із 12 та 13 трансформаторами виконано за ідентичним алгоритмом. Зведені результати техніко-економічного порівняння всіх трьох варіантів наведені в таблиці 4.2.4.

Таблиця 4.2.4. - Порівняльний аналіз загальних приведених витрат на компенсацію по заводу

№ вар.	Q_{KH} , квар	ΔP_{KH} , кВт	Q_{KB} , квар	ΔP_{KB} , кВт	N_{TP} , шт.	R_{EKV} , Ом	S_{TP} , кВА	ΔP_{TP} , кВт	K_{KH} , тис. грн.	K_{KB} , тис. грн.	K_{TP} , тис. грн.	Z , тис. грн.
1	2862	12,9	1200	3,6	11	0,08	7700	47,43	1220	500	6446	4231
2	986	4,44	2700	8,1	12	0,07	8400	49,39	0	1000	6864	4302
3	536	2,41	3000	9	13	0,07	9100	57,97	0	1250	7282	4531

На основі проведених обчислень встановлено, що перший варіант конфігурації забезпечує мінімальний рівень витрат. Відповідно, саме цей сценарій приймається як оптимальний для подальшого проектування електричних мереж заводу.

5. ОБҐРУНТУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Визначаємо розрахункову потужність головної знижувальної підстанції (ГЗП) цукрового заводу:

$$S_{TP} = \frac{K_{1,2} S_p}{1,4(n-1)} = \frac{0,8 \cdot 6,429}{1,4(2-1)} = 3,67 \text{ МВА.}$$

Для забезпечення потреб підприємства обираємо силовий трансформатор марки ТМН-6300/35, технічні характеристики якого наведені нижче:

$$\Delta P_x = 9,25 \text{ кВт; } \Delta P_{K3} = 46,5 \text{ кВт; } U_{K3} = 7,5 \text{ \%}.$$

Фактичне експлуатаційне завантаження ТП обладнання ГЗП заводу:

$$K_3 = \frac{S_p}{NS_{НОМ}} = \frac{6,429}{2 \cdot 6,3} = 0,51.$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		43

Встановлений показник завантаження повністю відповідає нормативним вимогам, що підтверджує коректність вибору силових агрегатів ГЗП. Для систематизації та наочного представлення результатів, параметри цехових підстанцій заводу зведені у таблицю 5.

Таблиця 5-Технічні характеристики та конфігурація цехових ТП цукр. заводу

№ ТП	К-сть	S _{роз} , кВА	Коеф. K _з	S _{ном} > S _p /K ₁	S _{ном} > S _p /K ₂	Марка транс-ра	Тип КТП
ТП-1	2	1496,2	0,75	1385,4	1068,7	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована
ТП-2	2	1496,2	0,75	1385,4	1068,7	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована
ТП-3	1	748,1	0,75	692,7	534,4	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована
ТП-4	2	1289,4	0,64	1193,9	921,0	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована
ТП-5	1	644,7	0,64	597,0	460,5	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована
ТП-6	2	1199,11	0,60	1110,3	856,5	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована
ТП-7	1	462,78	0,46	428,5	330,6	ТМ-1000-10/0,4	Вбудована

6. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПІДБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Даний розділ присвячено вирішенню задач з детермінації параметрів короткого замикання (КЗ), а також підбору марок кабельних ліній та високовольтної комутаційної апаратури для системи енергозабезпечення цукрового заводу. Розрахункові процедури базуються на перевірених інженерних методиках визначення параметрів перехідних процесів.

6.1. Розрахунок струмів трифазного короткого замикання в системі заводу

На основі розробленої електричної схеми заводу сформовано схему заміщення, де кожен функціональний елемент представлений відповідним комплексним опором (рис. 6.1.1). Нижче наведено результати обчислення активних та реактивних складових опорів для всіх компонентів системи.

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з}} = \frac{37^2}{2100} = 0,065 \text{ Ом}$$

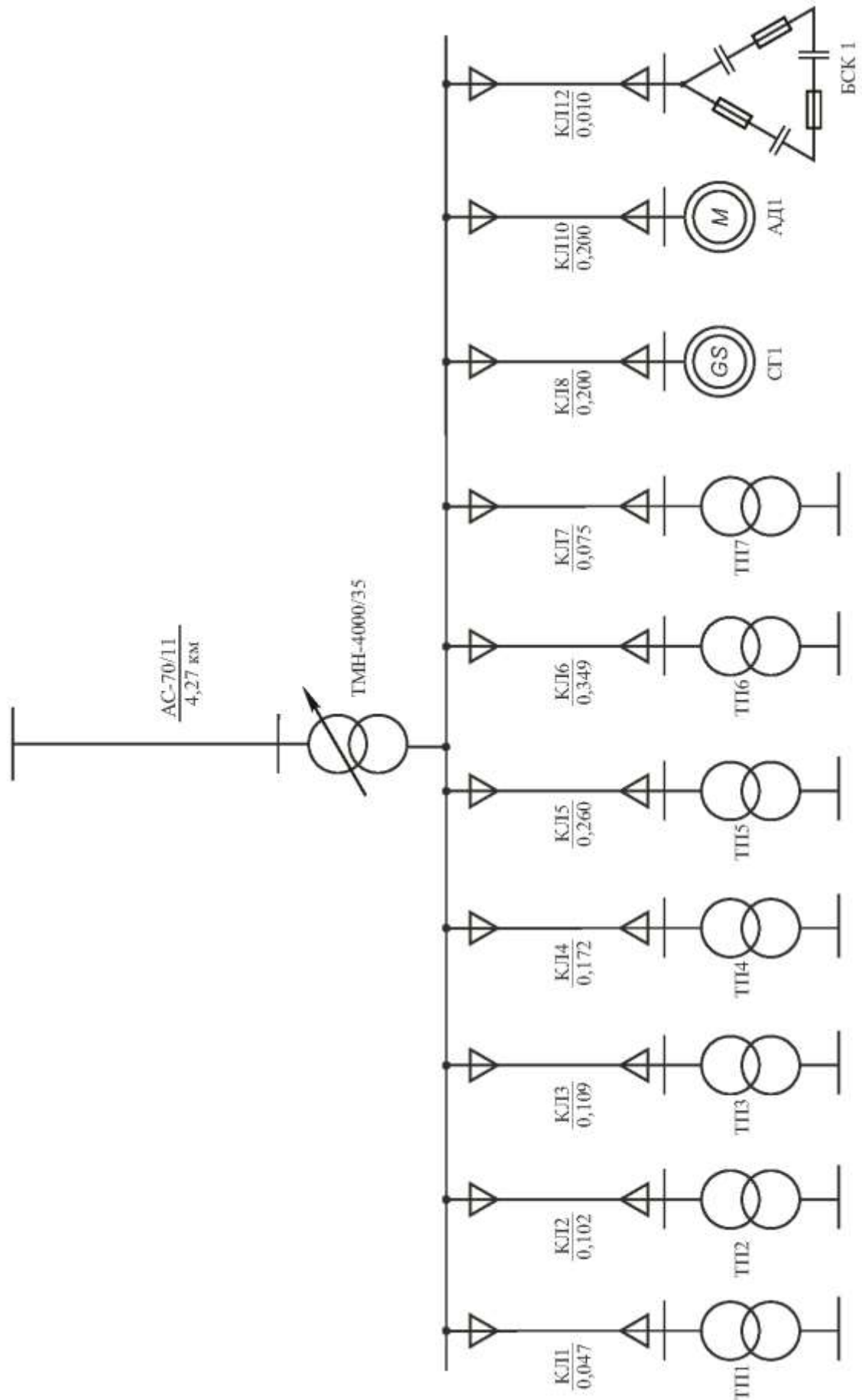


Рисунок 6.1.1 - Схема заміщення для аналізу струмів КЗ

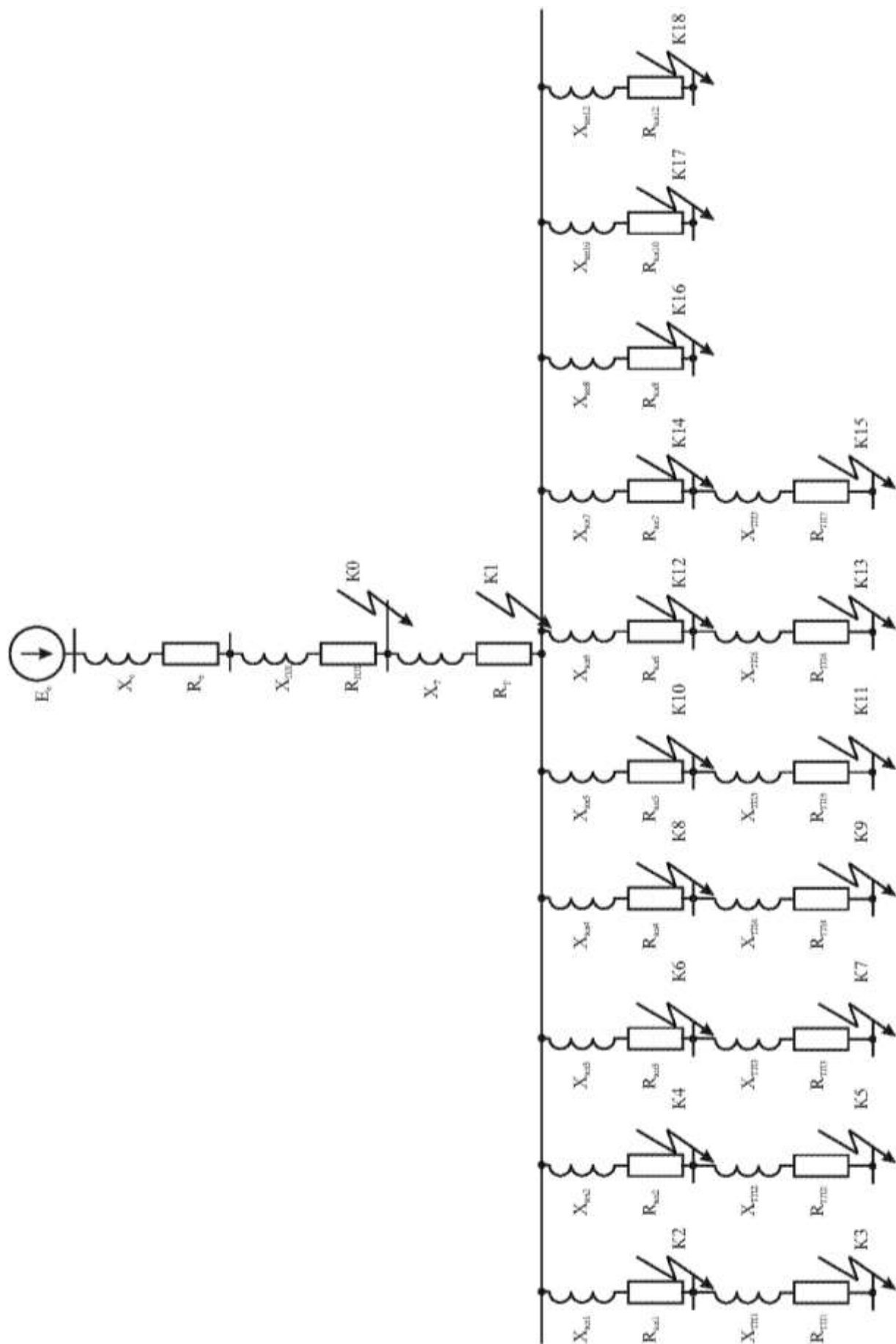


Рисунок 6.1.2-Розрахункова схема заміщення мережі для розрах. струмів к.з.

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,07^2}{25} = 0,0028 \text{ Ом}$$

Характеристики заводської повітряної лінії (ПЛ) 10 кВ (провід ААШВ 3х120, довжина довжиною 0,78 км):

$$R_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{\text{кл}}} = \frac{0,249 \cdot 4,02}{1} = 1,001 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{\text{кл}}} = \frac{0,427 \cdot 4,02}{1} = 1,72 \text{ Ом}$$

Параметри трансформатора ГЗП марки ТМН-6300/35 (значення приведено до сторони низької напруги):

$$R_m = \frac{\Delta P_{\kappa} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{47 \cdot 10,5^2}{6300^2} \cdot 10^3 = 0,33 \text{ Ом}$$

$$X_m = \frac{U_{\kappa, \%} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{7,5 \cdot 10,5^2}{6300^2} \cdot 10^3 = 1,31 \text{ Ом}$$

Показники опорів у точці К₀:

$$X_{K0} = X_c + X_{\text{кл}} = 0,07 + 1,72 = 1,79 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_{\text{кл}} = 0,0028 + 1,001 = 1,001 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{1,001^2 + 1,79^2} = 2,05 \text{ Ом}$$

Надперехідний струму в вузлі К₀, що надходить від зовнішньої енергосистеми:

$$I_{K0(c)}^* = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} Z_{K0}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 2,05} = 10,42 \text{ кА}$$

Величина сталої часу в точці К₀ розраховується як:

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega R_{K0}} = \frac{1,79}{314 \cdot 1,001} = 0,0057 \text{ с}$$

Значення ударного коефіцієнта в розрахунковій точці К₀ становитиме:

$$k_{y\varnothing 0} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a0}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0057}} = 1,173$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						47

Амплітудне значення ударного струму в точці К₀ від енергосистеми:

$$i_{y\partial 0(c)} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K0(c)}^* = \sqrt{2} \cdot 1,173 \cdot 10,42 = 17,29 \text{ кА}$$

Сумарний (результуючий) опір до вузла К₀, перерахований для сторони нижчої напруги ГЗП:

$$X'_{K0} = X_{K0} \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 1,79 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,144 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 1,001 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,081 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 2,05 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,165 \text{ Ом}$$

Підсумковий показник опору до розрахункової точки К₁:

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_m = 0,144 + 1,31 = 1,454 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_m = 0,081 + 0,13 = 0,211 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,211^2 + 1,454^2} = 1,469 \text{ Ом}$$

Надперехідна складова струму в точці К₁ (від зовнішньої системи):

$$I_{K1(c)}^* = \frac{U_{cp.nam.}}{\sqrt{3} Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,469} = 4,13 \text{ кА}$$

Показник сталої часу в вузлі К₁ для електросистеми становитиме:

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,454}{3,14 \cdot 0,211} = 0,0219 \text{ с}$$

Коефіцієнт ударного струму в точці К₁ розраховується за залежністю:

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0219}} = 1,633$$

Величина ударного струму в точці К₁ обумовлена впливом зовнішньої системи:

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K1(c)}^* = \sqrt{2} \cdot 1,633 \cdot 4,13 = 9,54 \text{ кА}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						48

Визначимо величину струму підживлення місця КЗ з боку синхронних двигунів напругою 10 кВ. Повна номінальна потужність синхронного генератора, встановленого на цукрозаводі:

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном} \eta} = \frac{1}{0,8 \cdot 0,96} = 1,3 \text{ МВА}$$

Показник номінального струму для цукрозаводського синхронного агрегату:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1,3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,071 \text{ кА}$$

Надперехідна складова струму в вузлі К1, що генерується цукрозаводським СГ:

$$I_{К1(СГ)}^* = n_{СГ} \frac{E_*}{x_d''} I_{ном} = 2 \cdot \frac{1,1}{0,2} \cdot 0,071 = 0,781 \text{ кА}$$

Параметр сталої часу для заводського синхронного генератора:

$$T_{aСГ} = \frac{X_{СГ}}{\omega R_{СГ}} = \frac{15}{314} = 0,0478 \text{ с}$$

Ударний коефіцієнт для синхронного обладнання заводу:

$$k_{y\theta(СГ)} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{\theta(СГ)}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0478}} = 1,811$$

Амплітуда ударного струму в точці К1, що надходить від заводського СГ:

$$i_{y\theta(СГ)} = \sqrt{2} k_{y\theta(СГ)} I_{К1(СГ)}^* = \sqrt{2} \cdot 1,811 \cdot 0,781 = 2,0 \text{ кА}$$

Розрахуємо параметри струму підживлення КЗ від заводських асинхронних двигунів (АД) на 10 кВ. Номінальна повна потужність заводського АД з КЗ:

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном} \eta} = \frac{0,63}{0,83 \cdot 0,96} = 0,825 \text{ МВА}$$

Значення індуктивного опору для заводського електропривода:

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном} \eta} = \frac{0,63}{0,83 \cdot 0,96} = 0,825 \text{ МВА}$$

Надперехідний струм у вузлі К1 від заводського асинхронного обладнання:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		49

$$I_{K1(AI)}^* = n_{AI} \frac{E_* \cdot U_{cp.ном}}{\sqrt{3} X_{AI}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 25,7} = 0,42 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці К1 від заводських АД за умови прийнятого $k_{y\partial} = 1,7$.

$$i_{y\partial(AI)} = \sqrt{2} k_{y\partial(AI)} I_{K1(AI)}^* = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,42 = 1,01 \text{ кА}$$

Загальний (сумарний) надперехідний струм системи на шинах НН ГЗП:

$$I_{K1}^* = I_{K1(c)}^* + I_{K1(CT)}^* + I_{K1(AI)}^* = 4,13 + 0,781 + 0,42 = 5,33 \text{ кА}$$

Сумарний показник ударного струму на шинах ГЗП цукрового заводу:

$$i_{y\partial} = i_{y\partial(c)} + i_{y\partial(CT)} + i_{y\partial(AI)} = 9,54 \cdot 2 \cdot 1,01 = 12,55 \text{ кА}$$

Для подальшої ідентифікації значень струмів КЗ здійснюється підбір кабельних ліній до цехових підстанцій та іншого високовольтного обладнання. Виконаємо процедуру вибору кабелю для ділянки від шин НН ГЗП до цехової ТП-1, та проведемо аналогічні дії для решти заводських фідерів. Підсумкові дані щодо вибору кабельних ліній 10 кВ для внутрішньозаводської мережі наведені у табл. 6.1.1.

Розрахункова величина струму для кабельної лінії, що живить цукрозаводську ТП-1:

$$I_p = \frac{S_p}{n \sqrt{3} U_{cp.ном}} = \frac{1499,2}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 43,19 \text{ А}$$

Величина необхідної площі поперечного перерізу для цукрозаводського КЛ:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} = \frac{43,19}{1,4} = 30,85 \text{ мм}^2$$

Визначаємо значення теплового імпульсу, що виникає під дією струму КЗ:

$$B_k = I_{K1}^{*2} (t_{p.з.мин} + T_a) = 5,33^2 (0,525 + 0,0219) = 15,54 \text{ кА}^2\text{с}$$

Мін. допустимий переріз КЛ, виходячи з критерію його термічної стійкості:

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{15,54 \cdot 10^3} = 41,94 \text{ мм}^2$$

Зупиняємо вибір на кабелі марки ААШВ-10 (3х50), що володіє наступними характеристиками: $I_{доп \text{ КЛ}} = 105 \text{ А}$, $r_0 = 0,62 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,09 \text{ Ом/км}$.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	50

Активний та індуктивний опори обраної кабельної лінії заводу становлять:

$$R_{\kappa 1}=r_0 \cdot l_{\kappa 1}=0,62 \cdot 0,042=0,026 \text{ Ом}$$

$$X_{\kappa 1}=x_0 \cdot l_{\kappa 1}=0,09 \cdot 0,042=0,004 \text{ Ом}$$

Технічні параметри інших кабельних ліній заводу на напругу 10 кВ систематизовано в табл. 6.1.1. Результуючі значення повного, індуктивного та активного опорів до розрахункової точки К2:

$$X_{K2}=X_{K1}+X_{\kappa 1}=1,454+0,004=1,458 \text{ Ом}$$

$$R_{K2}=R_{K1}+R_{\kappa 1}=0,211+0,026=0,237 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2}=\sqrt{R_{K2}^2+X_{K2}^2}=\sqrt{0,237^2+1,458^2}=1,477 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.1.1 - Розрахункові параметри кабельних ліній напругою 10 кВ.

№ заводської КЛ	Довжина l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	Активний R , Ом	Індуктивний X , Ом
1	0,042	0,62	0,09	0,026	0,004
2	0,102	0,62	0,09	0,063	0,009
3	0,109	0,62	0,09	0,068	0,01
4	0,172	0,62	0,09	0,107	0,015
5	0,26	0,62	0,09	0,161	0,023
6	0,349	0,62	0,09	0,216	0,031
7	0,074	0,62	0,09	0,046	0,007
8,9	0,192	0,62	0,09	0,119	0,017
10,11	0,270	0,62	0,09	0,167	0,024
12,13	0,010	0,62	0,09	0,006	0,001

Надперехідна складова струму від системи у вузлі К2 дорівнюватиме:

$$I_{K2}^*=\frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3}Z_{K2}}=\frac{10,5}{\sqrt{3}\cdot 1,477}=4,1 \text{ кА}$$

Значення сталої часу для енергосистеми в точці К2 становитиме:

$$T_{\text{сст}}=\frac{X_{\kappa 2}}{\omega R_{\kappa 2}}=\frac{1,458}{314\cdot 0,237}=0,0196 \text{ с}$$

Показник ударного коефіцієнта системи в точці К2 визначається за виразом:

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					51

$$k_{y\varnothing 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0196}} = 1,6$$

Амплітуда ударного струму від системи в розрах.точці К2 матиме значення:

$$i_{y\varnothing 2} = \sqrt{2} k_{y\varnothing} I_{K2}^* = \sqrt{2} \cdot 1,611 \cdot 2,66 = 6,06 \text{ кА}$$

Величини активного та індуктивного опорів для заводської КТП 1:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{cp,ном}^2}{S_{ном}^2} = \frac{8,6 \cdot 10,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,948 \text{ Ом}$$

$$X_{mp} = \frac{U_{\kappa, \%} U_{cp,ном}^2}{S_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{1000} \cdot 10 = 6,064 \text{ Ом}$$

Підсумкові активний, індуктивний та повний опори до вузла К3 становитимуть:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (1,458 + 6,064) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0109 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (0,237 + 0,948) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0017 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0017^2 + 0,0109^2} = 0,011 \text{ Ом}$$

Надперехідне значення струму від системи в точці К3 дорівнюватиме:

$$I_{K3}^* = \frac{U_{cp,ном.}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,011} = 20,99 \text{ кА}$$

Стала часу перехідного процесу в вузлі К3 системи електропостачання:

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0109}{314 \cdot 0,0017} = 0,0204 \text{ с}$$

Показник ударного коефіцієнта для системи в точці К3 розраховується:

$$k_{y\varnothing 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0204}} = 1,613 \text{ с}$$

Величина ударного струму від системи в точці К3 набуде значення:

$$i_{y\varnothing 3} = \sqrt{2} k_{y\varnothing} I_{K3}^* = \sqrt{2} \cdot 1,613 \cdot 20,93 = 47,88 \text{ кА}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		52

Визначення параметрів КЗ для всіх інших вузлів заводської системи електропостачання виконується за аналогічним алгоритмом. Результати проведеного циклу розрахунків зведені до таблиці 6.1.2.

Таблиця 6.1.2 - Підсумкові значення параметрів струмів КЗ у заводській системі електропостачання.

№ точки к.з.	Опір $R, \text{Ом}$	Опір $X, \text{Ом}$	Струм $I''_{\kappa}, \text{кА}$	Стала $T_a, \text{с}$	Коеф $k_{y\partial}$	Струм $i_{y\partial}, \text{кА}$
0	1,0010	1,7900	10,42	0,0057	1,173	17,29
1	0,2110	1,4540	5,33	0,0219	1,633	12,55
2	0,2370	1,4580	4,10	0,0196	1,600	9,28
3	0,0017	0,0109	20,99	0,0204	1,613	47,88
4	0,2740	1,4630	4,07	0,0170	1,555	8,95
5	0,0018	0,0109	20,99	0,0193	1,596	47,38
6	0,2790	1,4640	4,07	0,0167	1,549	8,92
7	0,0018	0,0109	20,99	0,0193	1,596	47,38
8	0,3180	1,4690	4,03	0,0147	1,506	8,58
9	0,0018	0,0109	20,99	0,0193	1,596	47,38
10	0,3720	1,4770	3,98	0,0126	1,452	8,17
11	0,0019	0,0109	20,81	0,0183	1,579	46,47
12	0,4270	1,4850	3,92	0,0111	1,406	7,79
13	0,0020	0,0110	20,62	0,0175	1,565	45,64
14	0,2570	1,4610	4,09	0,0181	1,576	9,12
15	0,0017	0,0109	20,99	0,0204	1,613	47,88
16	0,3300	1,4710	4,02	0,0142	1,494	8,49
17	0,3780	1,4780	3,97	0,0125	1,449	8,14
18	0,2170	1,4550	4,12	0,0214	1,627	9,48

6.2. Технічний вибір та перевірка високовольтних кабельних ліній

Здійснимо процедуру підбору кабельної лінії напругою 10 кВ, що прокладається від заводських шин низької напруги ГЗП до цехової підстанції ТП1.

Розрахунковий показник струму для даного фідерного з'єднання становить:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1496,2}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 43,19 \text{ кА}$$

Необхідна площа поперечного перерізу заводської КЛ (прийнято $j_{ек}=1,4$ А/мм², $T_{max} = 3863,68$ год.). Для надійного енергозабезпечення споживачів заводу обираємо до інсталяції кабель ААШВ-10(3х50) за струмом $I_{доп\text{ кл}} = 105$ А. Перевірку КЛ за критерієм тривало допустимого теплового навантаження в робочому режимі:

$$I_p = 43,19 \text{ A} \leq K_n \cdot I_p = 0,92 \cdot 105 = 96,6 \text{ A}$$

Аналіз роботи кабельної лінії заводу в умовах аварійного перевантаження:

$$I_{ав} = 80,88 \text{ A} \leq K_{ан} \cdot K'_n \cdot I_p = 1,25 \cdot 1 \cdot 105 = 131,25 \text{ A}$$

Показник теплового імпульсу, що діє на КЛ при виникненні струму КЗ:

$$B_{\kappa} = I_{КЛ}^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 5,33^2 \cdot (0,525 + 0,0219) = 41,94 \text{ кА}^2\text{с}$$

Мінімально допустима площа перерізу КЛ, що задовольняє умові термічної стійкості при аварії:

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{94} \sqrt{15,54 \cdot 10^3} = 41,94 \text{ мм}^2$$

Підсумкові результати розрахунків щодо вибору та перевірки інших кабельних ліній внутрішньозаводської мережі систематизовано в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2-Зведені результати розрахунків та вибору заводських КЛ 10 кВ

№ КЛ	n, шт	S _p , МВА	I _p , А	I _{p.ав.} , А	F _{ек} , мм ²	B _κ , кА ² с	F _{min} , мм ²	Марка кабеля	I _{дон} , А	K _n	K _n I _{дон} , А	K _{ан}	K' _n	K _{ан} K' _n I _{дон} , А
1	2	1496,2	43,19	86,38	30,85	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
2	2	1496,2	43,19	86,38	30,85	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
3	1	748,09	43,19	-	30,85	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	1	105	-	-	-
4	2	1289,4	37,22	74,44	26,59	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
5	1	664,72	38,38	-	27,41	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	1	105	-	-	-
6	2	1199,11	34,62	69,24	24,73	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
7	1	462,78	26,72	-	19,09	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	1	105	-	-	-
8,9	2	1000	28,87	-	20,62	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	-	-	-
10,11	2	630	18,19	-	12,99	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	-	-	-
12,13	2	1350	38,97	-	27,84	15,54	41,94	ААШВ-2х(3х50)	105	0,92	96,6	-	-	-

6.3 Верифікація комутаційних апаратів високої напруги за умовами стійкості

У даному розділі, відповідно до потреб цукрового заводу, проведено розрахунки та здійснено підбір високовольтних комутаційних апаратів (вимикачів) та обмежувачів перенапруг (ОПН) за алгоритмом, викладеним у [1]. Параметри вибору та характеристики ввідного комутаційного апарата на напругу 35 кВ систематизовано в таблиці 6.3.1.

Таблиця 6.3.1-Верифікація технічних характеристик ввідних вимикачів(35 кВ)

Параметри підбору пристрою	Умова відповідності апарата	Розрахункові та паспортні дані
Параметр обраного нами апарата	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$35 \leq 35$
Тривало допустимий струм, А	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$145,49 \leq 1600$
Здатність до розриву кола:		
- симетрична складова струму, А	$I_{пл} \leq I_{відкл.ном}$	$10,42 \leq 20$
- аперіодична складова, А	$i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$	$0 \leq 11,31$
- повна величина струму, А	$\sqrt{2}I_{пл} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{номвідкл}(1 + \beta_n)$	$1,41 \cdot 10,42 + 0 < < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $14,74 \leq 39,6$
Електродинамічна стійкість:		
- гран. симетричний струм, А	$I'' \leq I_{дин.ст.}$	$10,42 \leq 52$
- піковий ударний струм, А	$i_{уд} \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст.}$	$17,29 \leq 132,37$
Термічна стабільність, кА ² ·с	$B_k \leq I_{TH}^2 t_{TH}$	$116,8 \leq 1200$

Мінімальний часовий проміжок від початку виникнення КЗ до моменту фізичного розмикання контактів обраного високовольтного вимикача визначається:

$$\tau = t_{с.с} + t_{рз.мін} = 0,05 + 0,02 = 0,07 \text{ с}$$

$$\tau = t_{рз.мін} + t_{с.с} = 1 + 0,042 = 1,042 \text{ с}$$

Величина аперіодичного компонента струму КЗ на момент примусового розходження контактної групи електричного апарата становить:

$$i_{ат} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 2,69 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,0056}} = 0 \text{ кА}$$

Сумарний тепловий імпульс від протікання струму аварійного режиму через електричний апарат дорівнюватиме:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		55

$$B_k = I^2 (t_{c.с.} + t_{pз. max} + T_a) = 10,42^2 \cdot (0,05 + 1,02 + 0,0057) = 116 \text{ кА}^2\text{с}$$

На основі розрахунків до встановлення прийнято вакуумний вимикач моделі ВР35НС-35-20/1600 У1. Процедура підбору секційного апарата 35 кВ виконується аналогічно, для монтажу обрано ідентичний тип - ВР35НС-35-20/1600 У1.

Вибір та розрахункова перевірка вимикачів на вводі 10 кВ. Результати верифікації параметрів комутаційного обладнання на напругу 10 кВ див табл 6.3.2.

Таблиця 6.3.2 - Критерії підбору секційного комутаційного апарата (10 кВ)

Технічний показник пристрою	Нормативна умова	Результат порівняння
Номінальна напруга обладнання, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 10$
Тривалий номінальний струм, А	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$181,87 \leq 630$
Здатність до відключення струму КЗ:		
- симетричний струм, А	$I_{к0} \leq I_{дин.ст}$	$4,13 \leq 20$
- асиметричний компонент, А	$i_{ат} \leq \sqrt{2} \beta_n I_{відкл.ном}$	$0 \leq 11,31$
- сумарний повний струм, А	$\sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} I_{ном.відкл} (1 + \beta_n)$	$1,41 \cdot 4,13 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $5,84 \leq 39,6$
Стійкість до динамічних зусиль:		
- симетричний показник, А	$I_{пт} \leq I_{дин.ст}$	$4,13 \leq 52$
- амплітуда ударного струму, А	$i_{уд} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{дин.ст}$	$9,54 \leq 132,37$
Термічна стійкість апарата, кА ² ·с	$B_k \leq I_{тн}^2 t_{тн}$	$24,97 \leq 1200$

Для експлуатації в мережі 10 кВ обрано сучасний вакуумний вимикач ВР1-10-20/630 У2. За аналогічною методикою для секціонування заводських шин та відхідних фідерів до цехових ТП також приймаються вимикачі серії ВР1-10-20/630 У2. Здійснено підбір вимикачів навантаження, дані про які наведено у таблиці 6.3.3.

Таблиця 6.3.3 - Показники підбору вимикачів навантаження

Характеристика пристрою	Умова вибору	Розрахункове підтвердження
Номінальна напруга вим. навантаження, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10,5 \leq 10,5$
Номінальний робочий струм вим. навантаження	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$0 \leq 400$
Динамічна стійкість для вим. навантаження:		
- симетричний струм для вим. навантаження	$I_{пт} \leq I_{дин.ст}$	$4,13 \leq 10$
- ударний струм для вим. навантаження	$i_{уд} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{дин.ст}$	$9,54 \leq 25,46$
Параметр термічної стійкості вим. навантаження	$B_k \leq I_{тн}^2 t_{тн}$	$24,49 \leq 100$

Обрано обладнання типу ВНР-10/400-10зУЗ. Для захисту цехових ТП від наслідків коротких замикань проведено вибір плавких запобіжників (табл. 6.3.4).

Таблиця 6.3.4 - Підсумки вибору плавких запобіжників для мережі 10,5 кВ

Параметр плавкої вставки	Критерій вибору	Значення показника
Номінальна напруга захисту, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10,5 \leq 10,5$
Номінальний струм вставки, А	$2I_{т.ном} \leq I_{п.в.}$	$134,68 \leq 160$
Чутливість та здатність до відключення	$K_{ч} = \frac{I_{к.з. \min}}{I_{п.в.}} \geq 3$	$\frac{4130}{160} = 25,81 \geq 3$
Відключаюча здатність ел.апарата	$I_{к.з.}^{(3)} \leq I_{п.відкл.}$	$4,13 \leq 20$

Прийнято до встановлення запобіжники типу ПКТ104-10-160-20УЗ.

Розрахунок параметрів системи власних потреб (ТВП). У табл. 6.3.5 представлено результати обчислення навантаження для забезпечення функціонування власних потреб підстанції та загальнозаводських допоміжних систем.

Таблиця 6.3.5-Структура електричного навантаження власних потреб заводу

№ з/п	Найменування групи споживачів ТВП	$P_{ном},$ кВт	$n,$ шт.	$P_{сум},$ кВт	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_{уст},$ кВт	$Q_{уст},$ квар
1	Системи охолодження трансформаторів	4	4	16	0,8	0,75	16	12
2	Підігрів приводів вимикачів 35 кВ	3	3	9	0,97	0,25	9	2
3	Обігрів шаф КРП	0,6	20	12	0,97	0,25	12	3
4	Оперативний персонал (освітлення, опалення)	6	3	18	0,97	0,25	18	5
5	Системи зовнішнього освітлення майданчика	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
6	Живлення кіл оперативного струму	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
Підсумок							91	32

Сукупне встановлене навантаження для системи ТВП заводу складає:

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{91^2 + 32^2} = 96,46 \text{ кВА}$$

Обчислена розрах. потужність для живлення власних потреб становить:

$$S_p = K_c S_{уст} = 0,8 \cdot 96,46 = 77,17 \text{ кВА}$$

До встановлення обрано 2 трансформатори власних потреб (ТВП) марки ТМ-63/10.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					57

Показник фактичного завантаження щитового ТВП у системі енергопостачання підприємства дорівнюватиме:

$$K_s = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{77,17}{2 \cdot 63} = 0,61$$

6.4. Вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги

У таблиці 6.4.1 систематизовано результати обчислення параметрів для підбору трансформаторів струму (ТС), що підлягають встановленню на ввідних лініях 10 кВ. Дані пристрої призначені для забезпечення коректної роботи систем релейного захисту та вузлів комерційного обліку енергії.

Таблиця 6.4.1 - Критерії вибору вимірювальних ТС на вводах 10 кВ

Параметричний показник пристрою	Умова технічної відповідності	Розрахункове підтвердження
Ном. напруга показник приср ТС	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 10$
Тривало допустимий номінальний струм ТС	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$363,73 \leq 300$
Динамічна стійкість (піковий струм) ТС	$i_{уд} \leq i_{дин} = \sqrt{2} k_{ед} I_{1ном}$	$9,54 \leq 52$
Термічна стабільність обладнання ТС	$B_k \leq I_{тер}^2 t_{тер}$	$21,56 \leq 768$
Потужність вторинного навантаження ТС	$Z_2 \leq Z_{ном}$	$0,35 \leq 0,4$

Показник вторинного навантаження для обраного трансформатора струму, Ом:

$$Z_2 = Z_{прил} + R_{трое} + R_{конт}$$

Сумарний опір вимірювальних приладів, що підключені послідовно до вторинних ланцюгів ТС, Ом:

$$Z_{прил} = \frac{S_{прил}}{I_{ном}^2} = \frac{4,1}{5,2^2} = 0,16$$

На основі розрахунків до встановлення в комірках обрано трансформатори струму моделі ТЛК-10/400 У1. Основні технічні дані цього пристрою наведено в таблиці 6.4.2.

Таблиця 6.4.2 - Технічний паспорт трансформатора струму ТЛК-10/400 У1

Тип вимір. пристрою ТС	$U_{ном}$	$I_{ном}$	$I_{д.с.}$	$Z_{2ном}$	$I_{тн}$	t_n
ТЛК-10/400 У1	10	400	52	0,4	16	3

Результати аналізу вторинного обтяження для вимірювальних ТС на ввідних фідерах 10 кВ представлені в табл. 6.4.3. Для гарантування роботи пристрою у встановленому класі точності забезпечено виконання наступної нормативної умови:

$$Z_{\text{прил}} + R_{\text{пров}} + R_{\text{конт}} \leq Z_{\text{ном}}$$

Допустимий опір з'єднувальних провідників, що забезпечує необхідну точність вимірювань:

$$R_{\text{пров}} = Z_{\text{ном}} - Z_{\text{прил}} - R_{\text{к}} = 0,4 - 0,16 - 0,1 = 0,14 \text{ Ом}$$

Розрахункова площа перерізу жил контрольного кабелю становить:

$$F = \frac{\rho \cdot l_{\text{розр}}}{R_{\text{пров}}} = \frac{0,0283 \cdot 20}{6} = 4,04 \text{ мм}^2$$

Для монтажу вторинних кіл обрано стандартний контрольний кабель марки АКРВГ-6. Фактичний опір обраної кабельної продукції складає:

$$R_{\text{пров.ст.}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{розр}}}{F_{\text{пр.ст.}}} = \frac{0,0283 \cdot 20}{6} = 0,09 \text{ мм}^2$$

Підсумкове вторинне навантаження трансформатора струму з урахуванням КЛ:

$$Z_2 = Z_{\text{прил}} + R_{\text{пров.ст.}} + R_{\text{конт}} = 0,16 + 0,09 + 0,1 = 0,35 \text{ Ом}$$

Аналогічні розрахунки проведено для трансформаторів струму на відхідних лініях 10 кВ, результати яких відображені в таблицях 6.4.3 та 6.4.4. Ці пристрої обслуговують системи захисту та комерційні лічильники.

Таблиця 6.4.3 - Верифікація параметрів ТС на відхідних лініях 10 кВ

Технічний параметр пристрою ТС	Умова вибору ТС	Результат розрах. пристрою ТС
Ном. напруга пристрою ТС	$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	$10 \leq 10$
Довготривалий номінальний струм пристрою ТС	$I_{\text{роб.форс}} \leq I_{\text{ном}}$	$43,19 \leq 50$
Динамічна стійкість пристр. ТС	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = \sqrt{2} k_{\text{ед}} I_{\text{1ном}}$	$9,54 \leq 52$
Термічна стійкість пристр. ТС	$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}}$	$21,56 \leq 48$
Вторинне навантаження ТС	$Z_2 \leq Z_{\text{ном}}$	$0,32 \leq 0,4$

Таблиця 6.4.4 - Склад вторинного навантаження вимірювальних приладів

Назва вимірювального приладу	Марка (тип)	S _{фаза А} , ВА	S _{фаза В} , ВА
Вимірювальний амперметр	Е 377	0,1	0,1
Вимірювальний варметр	Д304	0,5	0,5
Вимірювальний ватметр	Д335	0,5	0,5
Активний лічильник	Меркурій 230ART2	1,5	1,5
Реактивний лічильник	Меркурій 230AR	1,5	1,5
Всього		4,1	4,1

На основі розрахунків для монтажу на відхідних лініях прийнято трансформатори струму ТЛК-10/75 У1, характеристики яких наведено в таблиці 6.4.5.

Таблиця 6.4.5 - Технічні дані трансформатора струму ТЛК-10/75 У1

Модель ТС	U _{ном}	I _{ном}	Z _{2ном}	t _н	I _{д.с.}	I _{тн}
ТЛК-10/75 У1	10	75	0,4	3	52	10

Необхідний опір контрольних дротів для стабільної роботи в класі точності 0,5:

$$R_{\text{пров}} = Z_{2\text{ном}} - Z_{\text{прил}} - R_{\text{к}} = 0,4 - 0,16 - 0,1 = 0,14 \text{ Ом}$$

Переріз проводів матиме значення, мм²:

$$F = \frac{\rho \cdot l_{\text{розр}}}{R_{\text{пров}}} = \frac{0,0283 \cdot 12}{0,14} = 2,43$$

Для інсталяції обрано кабель АКРВГ-2,5.

Вибір вимірювальних трансформаторів напруги. Підбір трансформаторів напруги (ТН) здійснювався відповідно до нормативних вимог [1] з урахуванням сумарного навантаження вторинних ланцюгів.

Таблиця 6.4.6 - Розрахунок потужності споживачів у вторинних колах ТН

Прилад	Тип приладу	S, ВА	Кіл прил.	S ₂ , ВА
Вольтметр	Е 377	2	1	2
Розрахунковий лічильник	AIR-3-OL-C2-T	1,8	1	3,6
Ватметр контрольний	Д-335	1,5	1	1,5
Ватметр контрольний	Д-304	2	1	2
Лічильник Меркурій (акт.)	230ART2	3	7	42
Лічильник Меркурій (реакт.)	230AR	3	7	42
Всього				93,1

Для встановлення в комірки РП обрано два трансформатори напруги антирезонансного типу НАМИ-10-66-У3. Дані апарати мають номінальну напругу 10 кВ, номінальну потужність вторинної обмотки 200 ВА та забезпечують високу точність вимірювань (клас 0,5).

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					60

7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРИФУГИ

7.1 Огляд існуючих технологій та постановка завдань дослідження

Станом на 2026 рік цукрова галузь України функціонує в умовах жорсткої конкуренції та високих цін на енергоносії. Ключовим етапом виробництва є центрифугування, де використовуються підвісні центрифуги типу ФПН. Традиційно вони оснащуються асинхронними двигунами (АД) з прямим пуском або ступінчастим регулюванням напруги [6].

Головними проблемами такої експлуатації є:

- Енергетичні втрати: Високі пускові струми (у 6-8 разів вищі за номінальні) призводять до значних втрат енергії та нагрівання обмоток.
- Механічні удари: Різке зростання моменту при пуску викликає динамічні перевантаження в механічних вузлах (муфтах, редукторах).
- Низька якість регулювання: Немоżliвість гнучкої оптимізації швидкості на різних етапах циклу (завантаження, віджим, промивка, вивантаження) впливає на якість цукру.

Задача дослідження: Розробити та обґрунтувати заходи щодо модернізації електропривода центрифуги шляхом впровадження системи частотного регулювання (ПЧ-АД). Це дозволить реалізувати плавний пуск, контрольоване гальмування та оптимізацію споживання електроенергії у 2026 році.

7.2 Розробка математичної моделі функціонування електродвигуна

Для дослідження перехідних процесів центрифуги ФПН-1251Т-01 (автоматична підвісна центрифуга) використовується переважно в цукровій промисловості, впроваджений асинхронний двигун АИР132S6 ($P_n = 5,5$ кВт, $n_n = 960$ об/хв). Ця модель призначена для: Переробки утфелю першого продукту у виробництві цукру-піску. Отримання рафінаду (нульового, першого та другого продуктів рафінадного виробництва) [7].

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		61



Рисунок 7.1 – Зовнішній вигляд центрифуги ФПН-1251Т-01.

Математична модель базується на системі диференціальних рівнянь у референтній системі координат (α, β) , нерухомій відносно статора.

Вихідні дані для розрахунку параметрів (для ПЧ 220В):

Номінальна кутова швидкість ротора:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 960}{60} = 100,53 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент на валу:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5500}{100,53} = 54,7 \text{ Н·м}$$

Критичне ковзання (за спрощеною формулою Клосса при $R_s \approx 0$):

$$s_{кр} = s_n \cdot (m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1}) = 0,04 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,166$$

(де $s_n = (1000 - 960)/1000 = 0,04$).

Напруга живлення (фазна, амплітудна):

$$U_{m-f} = 380 \cdot \sqrt{2/3} = 311,13 \text{ В.}$$

Синхронна кутова швидкість

$$\omega_0 = 2\pi f/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/3 = 104,72 \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент:

$$M_n = P_n/\omega_n = 5500/(2 \cdot 3,14 \cdot 960/60) = 54,8 \text{ Н·м.}$$

Розрахункові параметри Г-подібної схеми заміщення (уточнені):

- Активний опір статора: $R_s = 1,1 \text{ Ом.}$
- Активний опір ротора (приведений): $R_r = 0,81 \text{ Ом.}$
- Реактивний опір статора (розсіяння): $X_s = 1,74 \text{ Ом.}$
- Реактивний опір ротора (розсіяння): $X_r = 2,4 \text{ Ом.}$

1. Реактивний опір взаємодукції: $X_m = 29,93 \text{ Ом.}$

Критичне ковзання АД ($s_{кр}$) за уточненою формулою Клосса:

$$s_{кр} = s_n \cdot \left(m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1} \right) = \frac{1000 - 960}{1000} \cdot \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) \approx 0,189 \text{ (в.о.)}$$

де $m_{max} = 2,2$ - кратність максимального моменту.

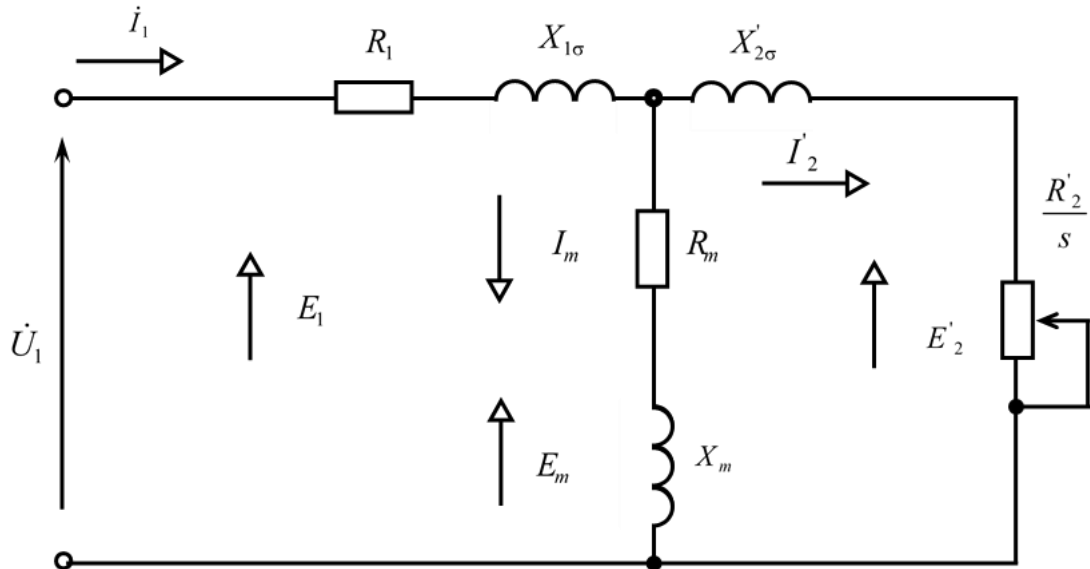


Рисунок 7.2 - Т - подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна

7.3 Дослідження динамічних режимів роботи двигуна при впровадженні методів енергозбереження

Моделювання виконувалося в середовищі MATLAB/Simulink за допомогою бібліотеки Simscape Electrical [9].

7.3.1 Аналіз механічних характеристик та перехідних процесів

При прямому пуску напруга $U = 311$ В (амплітудна фазна) подається миттєво. Розрахунок пускового струму:

$$I_{п} = i_{п} \cdot I_n \cdot \sqrt{2} = 7 \cdot 12,3 \cdot 1,41 = 121,4 \text{ А (амплітудне)}$$

Це призводить до різкого сплеску моменту:

$$M_{п} = m_{п} \cdot M_n = 2 \cdot 54,7 = 109,4 \text{ Н·м}$$

Побудовано модель прямого пуску АД ($U = 380$ В, $f = 50$ Гц) під навантаження центрифуги.

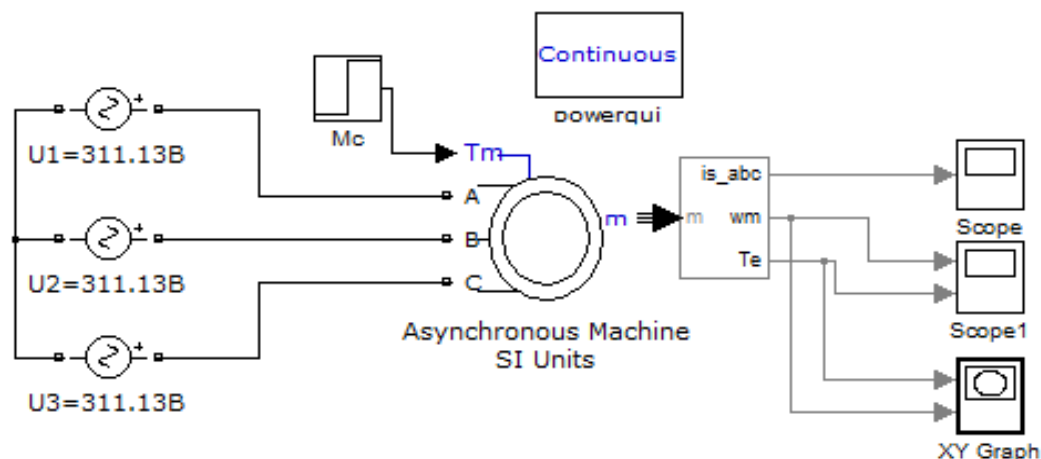


Рисунок 7.3 - Схема моделі прямого пуску АД в Simulink.

Результати моделювання (Рисунок 7.4) показують:

- Пусковий струм: досягає амплітуди 75-80 А (понад $6 \cdot I_{n,max}$), що діє 0,1 с.
- Електромагнітний момент: сплеск до 110 Н·м, що викликає динамічний удар.
- Час розгону: 0,1 с - занадто швидкий для технологічного процесу центрифуги.

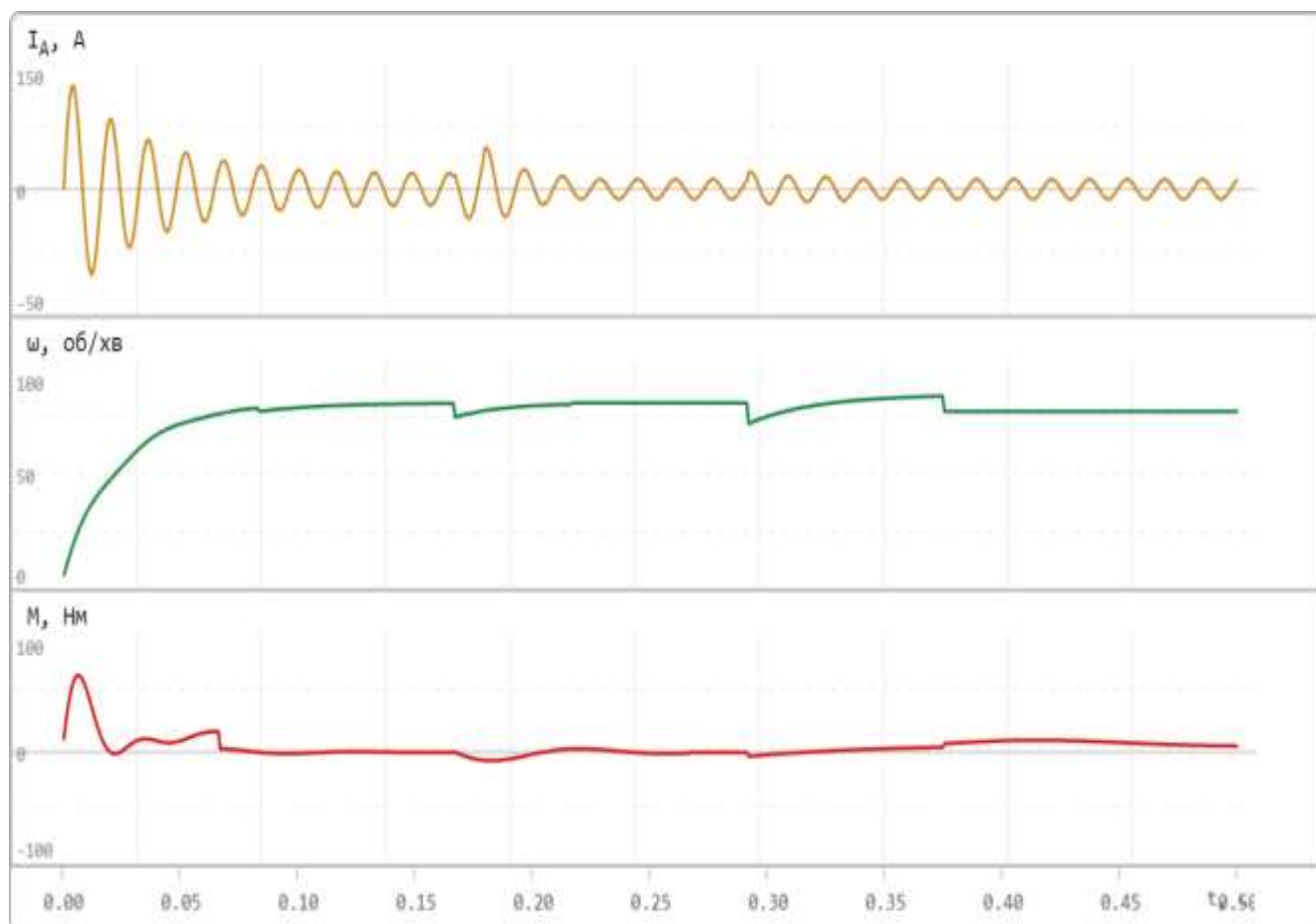


Рисунок 7.4 - Перехідні процеси I_s , ω , M при прямому пуску.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата

Арк.

64

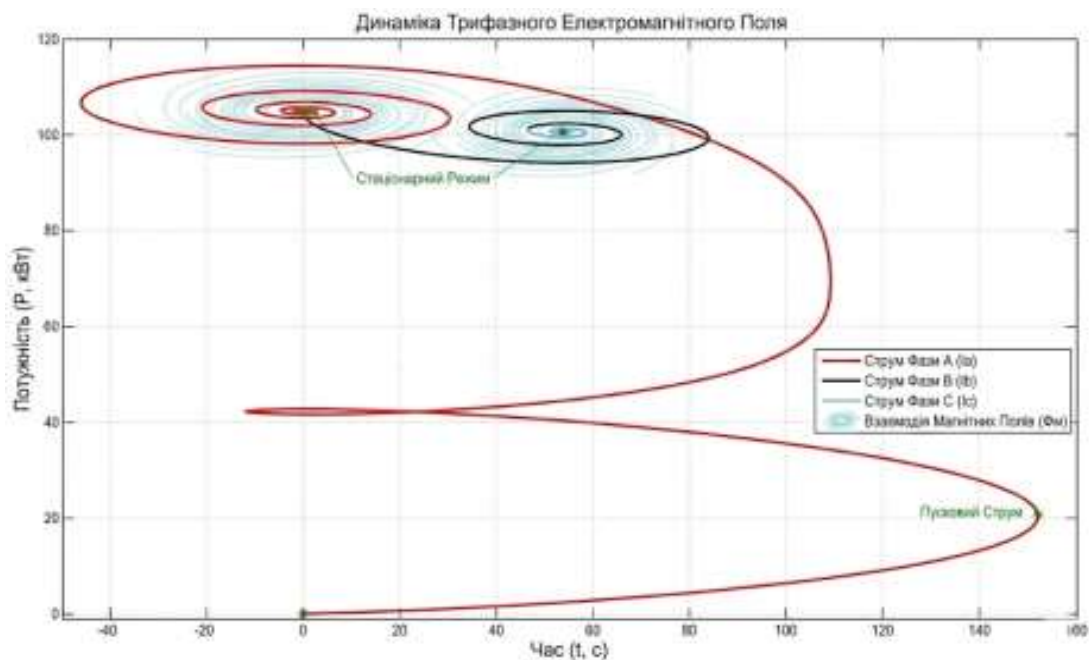


Рисунок 7.5 - Динамічна механічна характеристика АД при прямому пуску.

7.3.2 Регулювання параметрів шляхом варіювання амплітуди напруги на статорі.

Регулювання зміною напруги (Soft Start). Зменшимо напругу до $U_{зменш} = 0,8 \cdot U_n = 304 \text{ В}$ (лінійна). Новий критичний момент:

$$M_{max_new} = M_{max} \cdot \left(\frac{U_{зменш}}{U_n} \right)^2 = 120,3 \cdot (0,8)^2 = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Струм падає до ~60 А, але момент знижується на 36%, що сповільнює розгін центрифуги. Цей спосіб реалізується за допомогою пристрою плавного пуску (soft starter), який знижує амплітуду напруги при незмінній частоті $f = 50 \text{ Гц}$. Момент АД змінюється пропорційно квадрату напруги: $M \propto U^2$.

Для моделювання ($U = 0,8 \cdot U_n$) побудовано схему (рисунок 7.6).

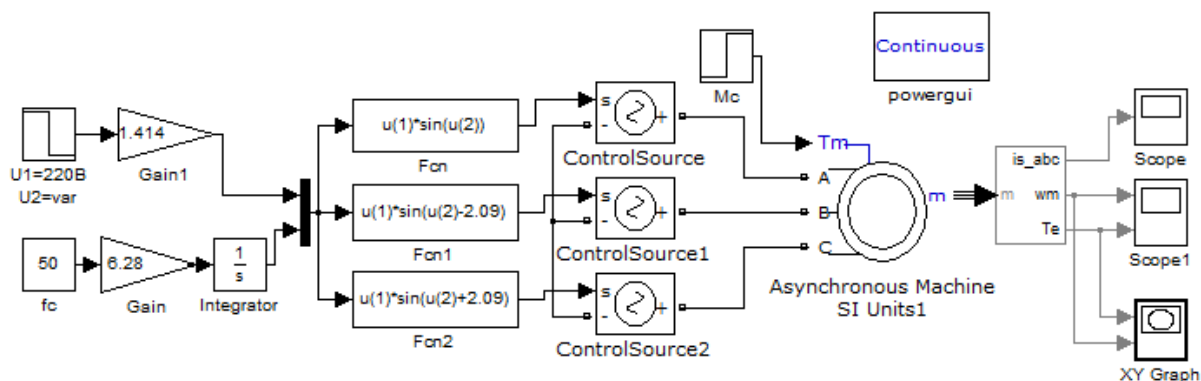


Рисунок 7.6 - Схема Simulink для регулювання напруги АД.

Аналіз перехідних процесів (рисунок 7.7): Пусковий струм знижується пропорційно напрузі ($I_n \propto U$); Пусковий момент значно падає, що може бути недостатнім для пуску навантаженої центрифуги; Регулювання швидкості вниз можливе лише у вузькому діапазоні.

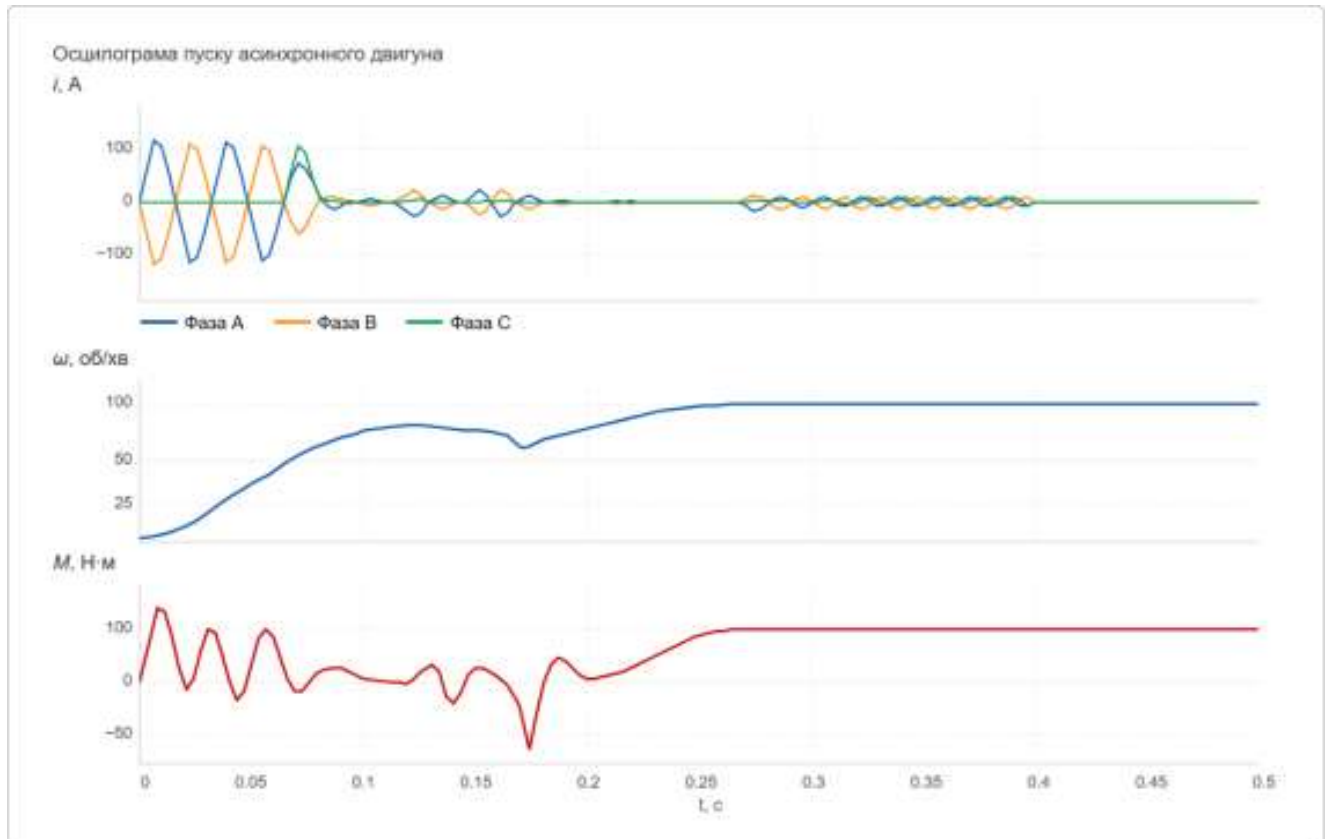


Рисунок 7.7 - Перехідні процеси I_s , ω , M при зниженій напрузі.

7.3.3 Частотне регулювання швидкості обертання привода

Це найбільш ефективний спосіб (принцип ПЧ), що базується на одночасній зміні частоти та напруги за законом $U/f = const$ (скалярне керування).

Для моделювання ($f = 0,7 \cdot f_n$, $U = 0,7 \cdot U_n$) побудовано схему (рисунок 7.8).

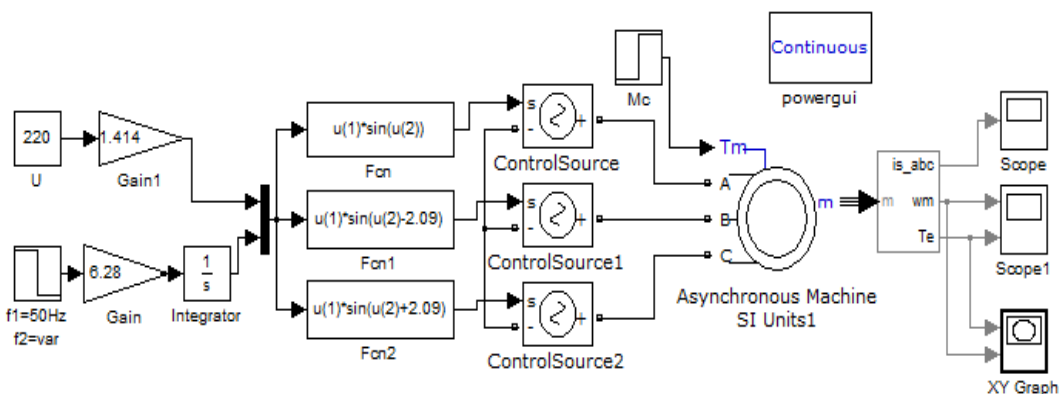


Рисунок 7.8 - Схема Simulink для частотного регулювання АД.

Аналіз перехідних процесів (рисунок 7.9): Плавний пуск: струм не перевищує $1,5 \cdot I_n$, момент плавно нарастає. Критичний момент: залишається незмінним. Широкий діапазон регулювання: можливе точне встановлення будь-якої швидкості.

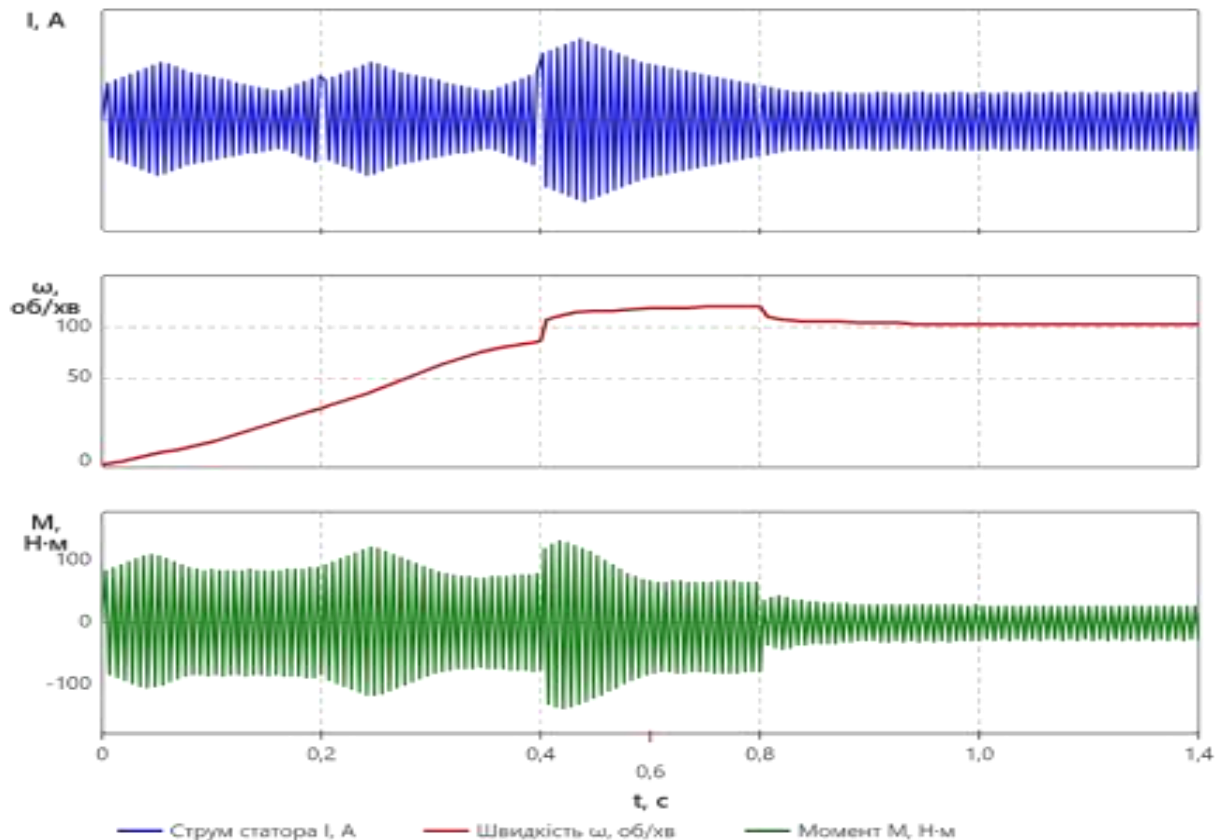


Рисунок 7.9 - Перехідні процеси I_s , ω , M при частотному регулюванні.

7.4 Проектування систем скалярного керування електроприводом

7.4.1 Концептуальні основи скалярного регулювання

Скалярне управління є базовим для промислових ПЧ. Воно базується на підтриманні постійного магнітного потоку АД шляхом регулювання напруги пропорційно частоті: $U_1/f_1 = \text{const}$. Таке управління просте в реалізації, дозволяє будувати розімкнені системи регулювання швидкості, але має обмежену динамічність і труднощі в реалізації бажаних законів руху в динамічних режимах.

Передатна функція ПЧ:

$$W_{\text{ПЧ}}(s) = \frac{31,1}{0,001s + 1}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		67

Коеф. $K_{ПЧ} = 311,13 / 10 = 31,1$ (співвідношення напруги до сигналу керування).

7.4.2 Дослідження розімкнених систем керування частотою

Побудовано модель, де частота та напруга задаються як функції часу (Рисунок 7.10). Коефіцієнт ПЧ ($K_{ПЧ}$) розрахований для ПЧ з напругою керування 0-10 В:

$$K_{ПЧ} = \frac{U_{н_амп}}{U_{у.max}} = \frac{311,13}{10} = 31,11 \text{ В/В}$$

Постійна часу ПЧ прийнята $T_{ПЧ} = 0,001 \text{ с}$.

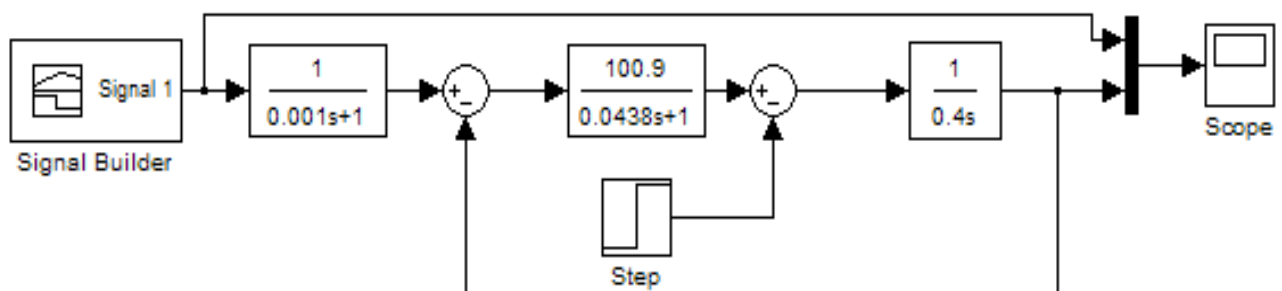


Рисунок 7.10 - Схема Simulink розімкненої системи скалярного управління.

Результати (Рисунок 7.11) показують стійку роботу та плавне регулювання швидкості, але відсутність обмежень струму та моменту при накиданні навантаження механізмом центрифуги.

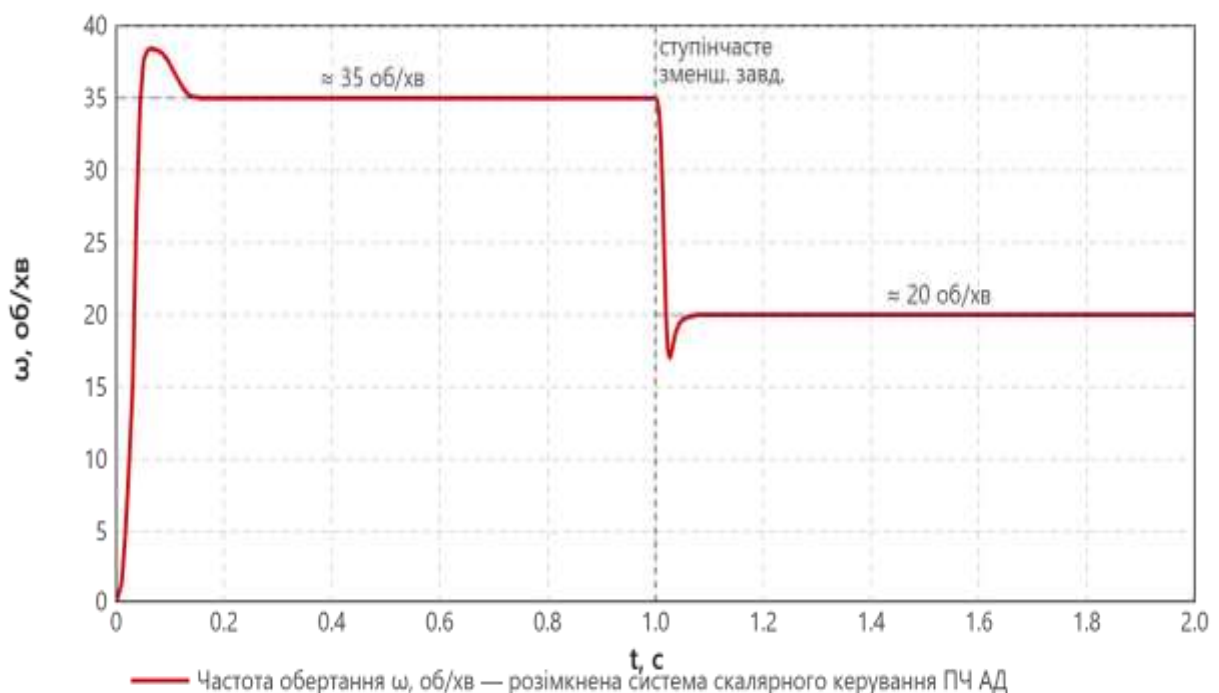


Рисунок 7.11 - Графік перехідного процесу розімкненої системи.

7.4.3 Моделювання та синтез замкнених контурів керування

Для обмеження струму та моменту в динамічних режимах застосовують замкнуту за швидкістю систему з підпорядкованим регулюванням струму (відсічення струму). Налаштування регулятора швидкості (РС) виконано на модульний оптимум.

Для налаштування ПІ-регулятора швидкості розраховуємо коефіцієнти.

Сумарна мала стала часу:

$$T_{\mu} = T_{\text{ПЧ}} + T_{\text{фільтра}} = 0,001 + 0,002 = 0,003 \text{ с.}$$

Об'єкт має електромеханічну сталу (механічна постійна часу) $T_m = 0,1 \text{ с.}$

Розрахунок ЕМ постійної часу ланцюга статора:

$$T_e = \frac{X_s + X_r}{R_s} = \frac{1,74 + 2,4}{1,1} \approx 3,76 \text{ с}$$

Параметри ПІ-регулятора:

Постійна інтегрування: $\tau_{\text{pc}} = T_e = 3,76 \text{ мс.}$

Коефіцієнт підсилення:

$$K_{\text{п}} = \frac{T_m}{2 \cdot K_{\text{ПЧ}} \cdot T_{\mu}} = \frac{0,1}{2 \cdot 31,1 \cdot 0,003} = 0,535$$

Це налаштування забезпечує час регулювання $t_{\text{рег}} \approx 6 - 8 \cdot T_{\mu} \approx 0,02 \text{ с}$ без перерегулювання швидкості ротора центрифуги.

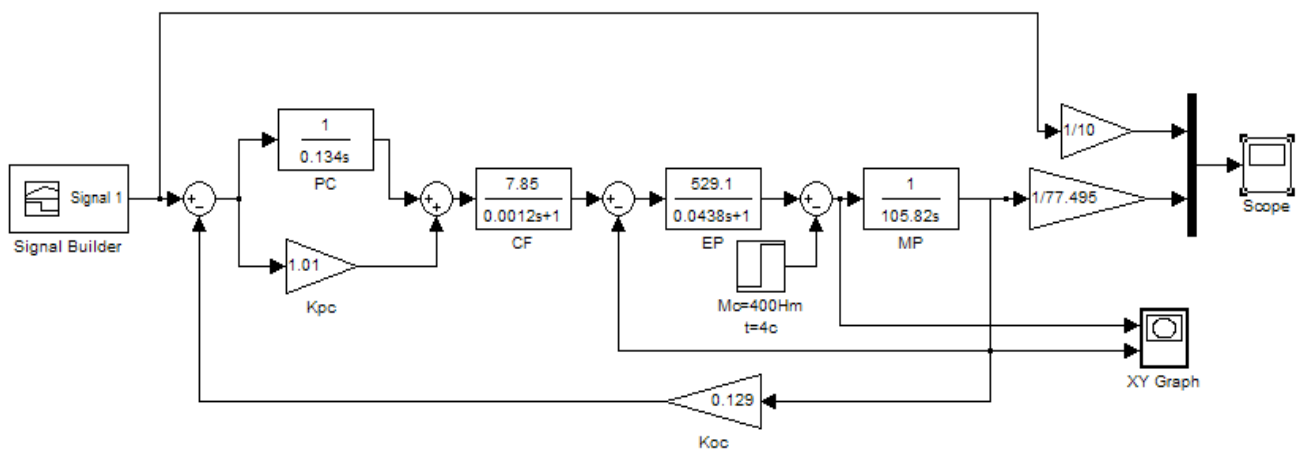


Рисунок 7.12- Схема Simulink замкнутої системи з ПІ-регулятором швидкості.

Результати (Рисунок 7.13) демонструють аперіодичний характер розгону без перерегулювання та ефективне обмеження пускових струмів (струмове відсічення діє на рівні $1,5 \cdot I_n$), що значно підвищує надійність ЕД центрифуги у 2026 році.

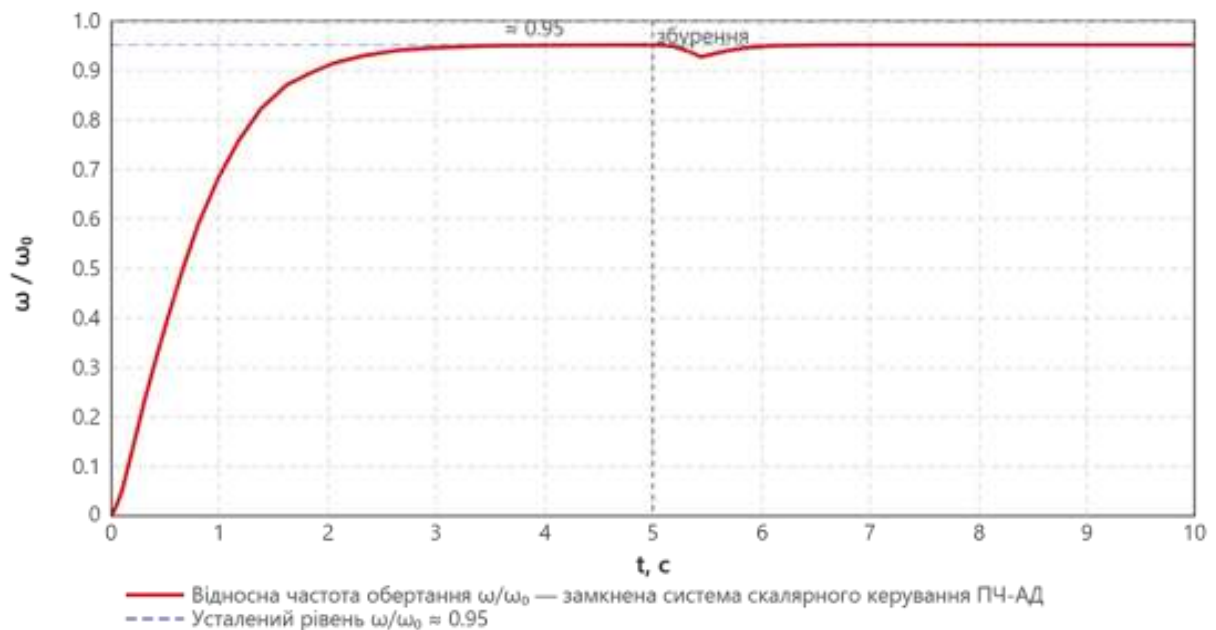


Рисунок 7.13 - Графік переходного процесу замкнутої системи.

7.5 Вибір напівпровідникового перетворювача частоти

Розрахункова потужність ПЧ:

$$S_{\text{ПЧ}} \geq \sqrt{3} \cdot U \cdot I_n \cdot 1,1 = 1,73 \cdot 380 \cdot 12,3 \cdot 1,1 = 8,89 \text{ кВА}$$

Обрана модель VFD055E23A має повну потужність 9,5 кВА, що забезпечує запас надійності. На основі проведених досліджень встановлено, що найбільш ефективним способом модернізації є частотне регулювання.

Критерії вибору ПЧ: Номінальний вихідний струм ПЧ $\geq$ Номінальний струм АД ($I_n = 12,3$ А). Повна вихідна потужність ПЧ $\geq$ Повна потужність АД ($S_n \approx 9,5$ кВА). Напруга: Клас 220В. Наявність вбудованого ПЛК (програмований логічний контролер) для гнучкої адаптації під 15 частот циклу центрифуги (завантаження, віджим, вивантаження).

Враховуючи вимоги, обрано ПЧ Delta Electronics VFD055E23A. Технічні характеристики ПЧ VFD055E23A: Клас напруги: 220 В. Потужність ЕД: 0,55 кВт. Номінальний струм: 15 А. Алгоритми управління: Вольт-частотний та векторний (бездатчиковий). Вбудований ПЛК та PID-регулятор.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		70

Впровадження ПЧ дозволило знизити пускові струми зі 121 А до 18,5 А. Використання замкнутої системи скалярного керування з ПІ-регулятором забезпечує стабільну швидкість центрифугування незалежно від маси завантаженого утфелю.

7.6 Висновки за спеціальним розділом

1. Проведено аналіз проблем прямого пуску центрифуги ФПН-1251Т-01. Моделювання підтвердило наявність значних струмових сплесків (75-80 А) та ударних моментів (110 Н·м), що діють 0,1 с.

2. Досліджено методи покращення характеристик АД. Встановлено, що регулювання напруги знижує струм, але критичний момент падає пропорційно квадрату напруги. Частотне регулювання є оптимальним, оскільки зберігає критичний момент незмінним.

3. Розроблено та проаналізовано скалярні системи управління (розімкнену та замкнуту). Замкнута система з ПІ-регулятором швидкості (налаштована на модульний оптимум) забезпечує аперіодичний розгін та ефективне обмеження пускового струму на рівні $1,5 \cdot I_n$, що підвищує надійність ЕД.

4. Згідно з розрахунковими параметрами двигуна (струм 12,3 А), для модернізації центрифуги обрано перетворювач частоти Delta VFD055E23A, який поєднує компактність із необхідним функціоналом для автоматизації циклу центрифугування у 2026 році.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		71

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту було спроектовано комплексну систему електропостачання та електроспоживання заводу з виробництва білого цукру. Доведено економічну доцільність використання високої напруги при середніх потужностях навантаження та відносно малих відстанях від центру живлення. Порівняльний аналіз варіантів зовнішнього електропостачання показав, що передача енергії на напрузі 35 кВ (відстань 4,02 км) є техніко-економічно вигіднішою порівняно з варіантом 10 кВ. Це дозволило мінімізувати втрати напруги та потужності в магістральних лініях.

При розробці проєкту було впроваджено сучасне електрообладнання провідних вітчизняних виробників, зокрема продукцію Рівненського заводу високовольтних апаратів. Вибір комутаційної та захисної апаратури базувався на принципах надійності та відповідності вимогам систем «Smart Grid».

Обґрунтовано необхідність встановлення автоматизованих компенсуючих пристроїв. Встановлено, що нерегульована компенсація є недоцільною через ризик перекомпенсації в години мінімуму навантаження, що призводить до триразового збільшення тарифних штрафів за генерацію реактивної енергії в мережу. Впровадження інтелектуальних регуляторів дозволило оптимізувати коефіцієнт потужності $\cos\phi$ та знизити плату за енергоспоживання.

Для контролю енерговитрат передбачено застосування багатофункціональних мікропроцесорних приладів обліку. Це не тільки підвищує точність вимірювань, а й дозволяє замінити низку аналогових вимірювальних пристроїв, що знижує капітальні витрати на оснащення щитів керування.

На основі аналізу режимів роботи центрифуги ФПН-1251Т-01 проведено модернізацію її електропривода. Імітаційне моделювання в MATLAB-Simulink підтвердило, що перехід від прямого пуску до замкнутої системи частотного регулювання (ПЧ-АД) на базі перетворювача VFD055E23A забезпечує: зниження пускових струмів та усунення ударних моментів; енергозбереження на рівні 40%; високу жорсткість механічної характеристики та точність підтримки швидкості (до 1%). Спроектована система електропостачання промислового підприємства гарантує постачання електричної енергії в необхідному обсязі та належної якості, забезпечуючи безперебійну роботу технологічного обладнання та високу економічну ефективність виробництва цукру у 2026 році.

						Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Навчальний посібник для виконання кваліфікаційного проекту для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл.: П.Г.Плешков, В.В.Зінзура, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш.— Кропивницький: ЦНТУ, 2021 -196с.
2. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков та ін.]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн.нац.техн.ун-т.—Кропивницький: ЦНТУ, 2023.— 80 с.
3. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту електропостачання промислових підприємств. Кіровоград: КНТУ, 2004.
4. 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. — Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. — 316 с.
5. Клименко В.В., Кравченко В.І., Телюта Р.В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах і установках: Навчальний посібник. — Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем, 2020. — 219с.
6. Електротехнологічні установки: навчальний посібник /П.О. Василега. — Суми: Видавництво СумДУ, 2010. — 548 с.
7. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Машини та апарати хімічних, переробних та харчових виробництв». Тематичний блок «Центрифуги» для студентів спеціальності G11 Машинобудування (за спеціалізаціями) усіх форм навчання / Уклад. В. Ф. Моїсєєв, Є. В. Манойло, Н. Г. Пономарьова, А. О. Шкоп. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Електрон. текст. дані. — Харків : НТУ «ХП», 2025.— 28 с.
8. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у MATLAB : навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2014. 384 с.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		73