

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 електропостачання
молокопереробного підприємства

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

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

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь перший (бакалаврський)

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

Алпайдзе Олексій Миколайович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи

Розроблення системи електропостачання молокопереробного підприємства

Development of a power supply system for a dairy processing enterprise machinery

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 електропостачання молокопереробного підприємства. Завдання: дати коротку характеристику електротехнологічного процесу на молокопереробному підприємстві. Розрахунок силових електричних навантажень. Побудова графіків електричних навантажень молокопереробного підприємства. Побудова картограм електричних навантажень. Вибір напруги і електричних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання. Режими реактивної потужності системи електропостачання молокопереробного підприємства. 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

_____ Олексій АЛПАІДЗЕ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 71 с.; 18 рис.; 26 табл.; 7 джерел

Алпайдзе О. М. Розроблення системи електропостачання молокопереробного підприємства. – Рукопис.

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

Пояснювальну записку випускної кваліфікаційної роботи присвячено створенню надійної, безпечної та енергоефективної системи розподілу енергії для умов молокопереробного підприємства. У межах проєкту реалізовано розрахунок силових та освітлювальних електричних навантажень об'єктів за допомогою методу впорядкованих діаграм. Визначено просторові координати центра електричних навантажень заводу та проведено детальний аналіз балансу реактивної потужності.

Шляхом техніко-економічного порівняння конкурентних інженерних рішень обґрунтовано доцільність схеми зовнішнього живлення на напрузі 10 кВ кабельними лініями та радіальну структуру розподілу енергії всередині підприємства. На основі обчислення струмів короткого замикання підібрано силові трансформатори головної та цехових підстанцій, марки кабельних провідників, комутаційну й захисну апаратуру. Усе обладнання перевірено за критеріями тривалого теплового нагріву, динамічної та термічної стійкості.

Особливу увагу приділено спеціальному розділу, де досліджено закономірності термічної деградації паперово-масляної ізоляції обмоток за кінетичними законами хімічних реакцій Вант-Гоффа – Арреніуса. Обґрунтовано створення структури інформаційно-вимірювального комплексу та розроблено алгоритм програмного забезпечення для мікропроцесорної системи безперервного теплового моніторингу, що дозволяє перейти до обслуговування трансформаторного парку за фактичним станом.

Ключові слова: електричні навантаження, картограма навантажень, компенсація реактивної потужності, струми короткого замикання, вакуумний вимикач, тепловий баланс, знос ізоляції, мікропроцесорний моніторинг.

ABSTRACT

Qualification work: 71 p.; 18 Fig.; 26 tables; 7 sources

Barkar A.O. Development of a power supply system for a dairy processing enterprise. – Manuscript.

Bachelor's thesis in specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", Educational and Professional Program "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The explanatory note of the final qualification work is dedicated to the creation of a reliable, safe and energy-efficient energy distribution system for the conditions of a dairy processing enterprise. Within the framework of the project, the calculation of power and lighting electrical loads of objects was implemented using the method of ordered diagrams. The spatial coordinates of the center of the plant's electrical loads were determined and a detailed analysis of the reactive power balance was conducted.

By means of a technical and economic comparison of competitive engineering solutions, the feasibility of an external power supply scheme at a voltage of 10 kV by cable lines and a radial structure of energy distribution within the enterprise were substantiated. Based on the calculation of short-circuit currents, power transformers of the main and shop substations, brands of cable conductors, switching and protective equipment were selected. All equipment was tested according to the criteria of long-term thermal heating, dynamic and thermal stability.

Particular attention is paid to a special section, where the regularities of thermal degradation of paper-oil insulation of windings are investigated according to the kinetic laws of chemical reactions of Van't Hoff - Arrhenius. The structure of the information and measuring complex is substantiated and a software algorithm for a microprocessor system of continuous thermal monitoring is developed, which allows to proceed to the maintenance of the transformer park according to the actual state.

Keywords: electrical loads, load map, reactive power compensation, short-circuit currents, vacuum circuit breaker, thermal balance, insulation wear, microprocessor monitoring.

Зміст

Вступ.....	7
1. Електричні навантаження молокопереробного підприємства	8
1.1 Визначення електронавантажень молокопереробного підприємства в електромережах до 1000 В	8
1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень молокопереробного підприємства.....	11
1.3 Розрахунок електронавантажень молокопереробного підприємства в електромережах вище 1000 В	11
1.4 Графіки електричних навантажень молокопереробного підприємства.....	17
2. Побудова картограми електричних навантажень молокопереробного підприємства.....	22
3. Техніко-економічне обґрунтування схем електропостачання молокопереробного підприємства.....	24
3.1. Вибір схеми зовнішнього електропостачання молокопереробного підприємства	24
3.2. Вибір напруги та схеми внутрішнього молокопереробного підприємства.....	28
4. Режим реактивної потужності системи молокопереробного підприємства.....	29
4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності молокопереробного підприємства.....	29
4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв молокопереробного підприємства	31
5. Вибір кількості трансформаторів їх потужності та місця розташування молокопереробного підприємства	38
6. Розрахунок струмів короткого замикання. Вибір електрообладнання молокопереробного підприємства та силових електромереж системи постачання	40
6.1. Розрахунок струмів коротких замикань в системі живлення молокопереробного підприємства	40

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розробив		Алпайдзе О.М.			Розроблення системи електропостачання молокопереробного підприємства	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів		Телюта Р.В.					5	71
						ЦНТУ гр. ЕЕ22		
Н. Контр.								
Затвердив		Плешков П.Г.						

6.2. Вибір високовольтних кабелів для молокопереробного підприємства	45
6.3. Вибір високовольтного електрообладнання молокопереробного підприємства.....	47
6.4. Вибір трансформаторів струму та напруги для молокопереробного підприємства.....	47
7. Спеціальний розділ. Аналіз експлуатаційної надійності силового трансформаторного обладнання.	50
7.1 Аналіз проблематики забезпечення експлуатаційної надійності силового трансформаторного обладнання.....	50
7.1.1. Базові показники безвідмовності трансформаторів	50
7.1.2 Експлуатаційна стійкість енергетичного обладнання	51
7.1.3 Специфіка робочих режимів трансформаторних установок	52
7.1.4 Алгоритм деградації діелектричних систем.....	52
7.2 Дослідження зношення ізоляції силових трансформаторів в експлуатаційних умовах	53
7.2.1 Особливості електропровідності твердих діелектриків.....	53
7.2.2 Закономірності процесу термічної деградації трансформаторної ізоляції.....	55
7.2.3 Вплив вологості та хімічно агресивних речовин на деградацію діелектрика	57
7.2.4 Дослідження теплових перехідних процесів у силовому трансформаторі (модель трьох тіл)	58
7.3 Аналітичне дослідження експлуатаційних режимів силових трансформаторів.....	60
7.3.1 Фізична сутність електромагнітних та теплових процесів.....	60
7.3.2 Аналітичне дослідження температурних режимів силового трансформатора як еквівалентного однорідного тіла в умовах симетричних перевантажень.....	61
7.3.3 Аналітичне моделювання перевантажувальної здатності трансформатора на основі теплових обмежень ізоляції	63
7.3.4 Оцінка впливу конфігурації добового графіка навантажень на інтенсивність деградації ізоляції.....	65
7.4 Висновки	69
Висновки	70
Список використаних джерел	71

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		6

Вступ

Заводи з переробки молока функціонують майже в кожному регіоні України, що безпосередньо пов'язано з наявністю розгалуженої сировинної бази. Протягом багатьох років рівень споживання молочної продукції серед населення залишався традиційно високим. Специфічні характеристики цих товарів вимагають постійного розвитку обсягів їхнього випуску, налагодженого збуту, а також безперервної роботи підприємств відповідної харчової галузі.

Нинішня концепція економічного та соціального поступу держави орієнтована на зміцнення вітчизняного агропромислового сектору. Молочний сектор, який об'єднує підприємства з випуску масла, сиру, консервованої продукції та виробів із незбираної сировини, на сьогодні займає провідні позиції в загальній структурі харчової індустрії країни.

Специфіка молокозаводів полягає в сумісному використанні великої кількості теплових та електричних ресурсів. При цьому постачання електрики відбувається із зовнішніх загальних мереж, тоді як тепло зазвичай генерується локальними автономними котельними комплексами. Слабкий рівень конкурентної боротьби між операторами ринку та енергорозподільними компаніями мінімізує їхнє прагнення знижувати витрати на виробіток, розподіл і транспортування кіловат-годин до безпосередніх споживачів.

Зокрема, у 2020-22 роках загальний обсяг спожитої електрики в країні досяг 153000 млн. кВт·год, де частка підприємств харчового сектору становила близько 4800 млн. кВт·год.

Обсяги енергоспоживання суттєво варіюються залежно від конкретного об'єкта, номенклатури товарів, рівня завантаження потужностей та ступеня модернізації технологічних ліній. На сьогодні у структурі собівартості українських молокозаводів паливно-енергетичні витрати сягають у середньому 10,1%, тоді як на європейських підприємствах цей показник становить лише 2,1–3,1%.

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

1. Електричні навантаження молокопереробного підприємства

1.1. Визначення електронавантажень молокопереробного підприємства в електромережах до 1000 В

Для демонстрації алгоритму знаходження величин струмоприймачів виробничого комплексу на рівні до одного кіловольта проведемо відповідні калькуляції для відділення обробки сировини.

Базуючись на вихідній інформації, визначаємо значення коефіцієнта m :

$$m = \frac{P_{н.мин}}{P_{н.мах}} = \frac{12}{40} = 0,3$$

Середньозмінні показники та встановлена потужність масиву струмоприймачів із подібним графіком функціонування:

$$P_{см} = P_{сум} \cdot K_{и} = 308 \cdot 0,693 = 213,44 \text{ кВт}$$

$$Q_{см} = P_{см} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 213,44 \cdot 0,55 = 117,39 \text{ кВар}$$

Ефективна кількість діючих апаратів розрахункового вузла:

$$n_e = \frac{2 \cdot P_{сум}}{P_{н.мах}} = \frac{2 \cdot 308}{12} = 51$$

Величину показника K_M обираємо згідно з довідниками [1, 2], враховуючи параметри сумарного коефіцієнта використання, а також число діючих механізмів даної лінії: $K_M = 1,08$.

Очікувані активні та реактивні складові потужності досліджуваного комплексу обладнання:

$$P_p = P_{см} \cdot K_M = 213,44 \cdot 1,08 = 230,52 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{см} = 117,39 \text{ кВар}$$

Результати обчислень параметрів електроживлення ліній до 1 кВ для відділення обробки сировини зведено у таблицю 2.1.

Підсумкові показники споживання струмоприймачів інших структурних підрозділів індустріального об'єкта представлені в таблиці 2.2.

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

Таблиця 1.1.1 - Розрахунок силових навантажень відділення обробки сировини (мережа до 1 кВ)

№	Назва групи споживачів	P _{мін} , кВт	P _{макс} , кВт	K-ть	P _{сум} , кВт	K _н	cosφ	tgφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , кВар	п _е	K _м	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА
1	Насос	0,6	10	10	129,03	0,6	0,8	0,75	77,42	58,06	26	1,2	90,1	58,06	107,2
2	Охолоджувач	1,5	1,5	4	6,07	0,6	0,7	1,02	3,64	3,71	4	1,5	5,57	4,09	6,9
3	Сепаратор	4,5	7,5	5	25,81	0,6	0,8	0,75	15,48	11,62	5	1,5	22,5	12,78	25,83
4	Перемішувач	0,6	1,5	17	17,71	0,6	0,7	1,02	10,63	10,84	17	1,2	12,9	10,84	16,81
5	Повітряна завіса	2,2	2,2	4	8,91	0,8	0,8	0,75	7,12	5,34	4	1	7,12	5,88	9,24
6	Рециркуляційний агрегат	0,4	0,4	2	0,81	0,8	0,8	0,75	0,65	0,49	2	1	0,65	0,54	0,84
7	Привод воріт	0,4	0,4	2	0,81	0,1	0,5	1,73	0,08	0,14	2	5,4	0,44	0,15	0,47
8	Витяжна шафа	2,4	2,4	1	2,43	0,8	0,8	0,75	1,94	1,46	1	1	1,94	1,6	2,52
9	Холодильник	0,6	0,6	4	2,43	0,6	0,8	0,75	1,46	1,09	4	1,5	2,23	1,2	2,53
10	Центрифуга	0,6	0,6	4	2,43	0,6	0,8	0,75	1,46	1,09	4	1,5	2,23	1,2	2,53
11	Автоклав	12	12	1	12,14	0,9	1	0	10,93	0	1	1	10,9	0	10,93
12	Термостат	0,75	0,75	2	1,52	0,9	1	0	1,37	0	2	1	1,37	0	1,37
13	Нагрівач	0,75	12	9	56,01	0,9	1	0	50,42	0	9	1	50,4	0	50,42
14	Формувальний апарат	1	1	2	2,02	0,1	0,5	1,73	0,2	0,35	2	5,4	1,09	0,39	1,16
15	Вентилятор	1,1	4	19	36,84	0,8	0,8	0,75	29,47	22,1	18	1	29,5	22,1	36,84
16	Парафінер	0,3	0,3	1	0,3	0,9	1	0	0,27	0	1	1	0,27	0	0,27
17	Таль	1,25	1,25	2	1,27	0,1	0,5	1,73	0,12	0,21	2	5,4	0,66	0,23	0,7
18	Мийка	1,1	1,1	2	1,11	0,6	0,8	0,75	0,67	0,5	2	2	1,32	0,55	1,43
Σ	Всього	0,3	12	117	308	0,693	0,877	0,55	213,44	117,39	51	1,1	231	117,4	258,5

Таблиця 1.1.2 - Розрахунок електричних навантажень до 1 кВ заводу молокопродуктів

№	Назва групи споживачів	P _{min} , кВт	P _{max} , кВт	К-ть	P _{сум} , кВт	K _н	cosφ	tgφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , кВар	п _е	K _м	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА
1	Дільниця виробництва вершкового масла	0,3	16	167	657	0,69	0,827	0,68	453,33	308,17	81	1,1	482	308,2	572,1
2	Відділення обробки сировини	0,3	12	117	308	0,693	0,877	0,55	213,44	117,39	51	1,1	231	117,4	258,5
3	Лінія виготовлення кисломолочної продукції	1,1	7,5	113	691,4	0,618	0,75	0,88	427,29	376,83	113	1,1	456	376,8	591,9
4	Сироробний комплекс	0,3	16	146	585,34	0,681	0,91	0,46	398,62	181,61	72	1,1	427	181,6	463,6
5	Ремонтно-механічний блок	3	7,5	19	113,34	0,34	0,55	1,52	38,54	58,51	19	1,4	53,3	58,51	79,18
6	Відділення сухих компонентів	1	25	104	511,46	0,75	0,684	1,07	383,6	409,1	40	1,1	410	409,1	579,1
7	Транспортний бокс	1,5	10	25	146,74	0,35	0,687	1,06	51,36	54,25	25	1,3	67,7	54,25	86,77
8	Сховище готової продукції	0,5	10	10	24,79	0,1	0,8	0,75	2,48	1,86	5	3	7,54	2,04	7,81
9	Теплогенераторна станція	2,2	250	25	1312,56	0,78	0,73	0,94	1023,8	958,52	10	1,1	1147	1054	1558
10	Зона технічного обслуговування	0,3	100	51	464,81	0,24	0,667	1,12	111,55	124,61	9	1,8	199	137,1	241,7
11	Ділянка термооброблених сирів	1,1	7,5	113	691,4	0,618	0,75	0,88	427,29	376,83	113	1,1	456	376,8	591,9
12	Гідротехнічний вузол	10	100	9	477,66	0,8	0,8	0,75	382,13	286,6	9	1	382	315,3	495,4
Σ	Всього	0,3	250	899	5984,5	0,653	0,769	0,83	3913,29	3253,77	47	1,1	4299	3254	5391

1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень молокопереробного підприємства

Обчислення споживання електроенергії світильниками для даного молокозаводу здійснюється на базі затвердженого алгоритму [1]. Підсумкові цифри визначення потужності освітлювальних систем індустріального об'єкта відображено у таблиці 1.2. Для наочної демонстрації процедури знаходження параметрів живлення світильників індустріального об'єкта, виконаємо відповідні калькуляції щодо відділення обробки сировини.

$$P_y = F \cdot p_0 = 3690 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 59,04 \text{ кВт};$$

тоді

$$P_p = P_y \cdot K_c \cdot K_1 = 59,04 \cdot 0,95 \cdot 1,2 = 67,31 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 67,31 \cdot 0,484 = 32,58 \text{ кВар}$$

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi} = \frac{67,31}{0,9} = 74,78 \text{ кВА}$$

Знаходження показників для інших технологічних зон реалізується за ідентичним алгоритмом. Зведені результати обчислень відображено у таблиці 1.2.

1.3. Розрахунок електронавантажень молокопереробного підприємства в електромережах вище 1000 В

Визначення енергетичних потреб підприємства молочної промисловості для розподільних мереж із класом напруги понад один кіловольт потребує ретельного підходу. З цією метою застосовується спеціальний алгоритм, наведений у фаховому джерелі [1], який ґрунтується на застосуванні показника розрахункового навантаження.

Слід відзначити, що ця концепція вважається загальноприйнятою в сучасній інженерній практиці, а її дієвість доведена багатьма експлуатаційними випробуваннями. Використання зазначеного методу дає змогу коректно обчислити

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		11

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

Таблиця 1.3 - Розрахунок електричних навантажень вище 1000 В молокопереробного підприємства (без БК)

Назва групи споживачів	P _{min} , кВт	P _{max} , кВт	К- ть	P _{сум} , кВт	K _и	cosφ	tgφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , кВар	η _е	K _м	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА
ТП 1														
Дільниця виробництва вершкового масла														
силове	167	0,3	16	657	0,69	0,8	0,68	453	308,17	81	1,06	482	308,17	572,08
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	26,6	-	-	-	30,8	14,92	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	480	308,17	-	-	513	323,09	606,11
Відділення обробки сировини														
силове	117	0,3	12	308	0,69	0,9	0,55	213	117,39	51	1,08	231	117,39	258,54
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	59,1	-	-	-	67,4	32,61	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	272	116,88	-	-	298	149,48	333,31
Лінія виготовлення кисломолочної продукції														
силове	113	1,1	7,5	691,4	0,62	0,8	0,88	427	376,83	113	1,07	456	376,83	591,86
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	109	-	-	-	124	60,04	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	536	376,83	-	-	580	436,86	726,46
Всього по ТП 1:														
силове	397	0,3	16	1656,4	0,66	0,8	0,73	1094	801,88	205	1	1094	801,88	1356,35
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	195	-	-	-	222	107,56	-
На шинах 0.4 кВ ТП 1:	-	-	-	-	-	-	-	1288	801,88	-	-	1316	909,43	1599,81
Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,9	97,88	-
К-ть трансф: 2, 1000 кВА, Kз=0,80														
Всього на шинах 10 кВ ТП 1:	-	-	-	-	-	-	-	1335	1007,31	-	-	-	-	1672,43
ТП 3														
Сироробний комплекс														
силове	146	0,3	16	585,34	0,68	0,9	0,46	399	181,61	72	1,07	427	181,61	463,6
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	74	-	-	-	84,4	40,83	-

продовження табл. 1.3

Всього:	-	-	-	-	-	-	-	473	181,61	-	-	511	222,45	557,24
Ремонтно-механічний блок														
силове	19	3	7,5	113,34	0,34	0,6	1,52	38,5	58,51	19	1,38	53,3	58,51	79,18
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	9,87	-	-	-	11,3	5,45	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	48,4	58,51	-	-	64,5	63,96	90,86
Зовнішня територія підприємства														
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	4,93	-	-	-	3,31	5,73	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	4,93	-	-	-	3,31	5,73	6,62
Всього по ТП 3:														
силове	165	0,3	16	698,68	0,63	0,9	0,55	437	240,13	86	1,08	471	240,13	528,66
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	88,8	-	-	-	98,9	52,01	-
На шинах 0.4 кВ ТП 3:	-	-	-	-	-	-	-	526	240,13	-	-	570	292,13	640,4
Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,93	36,45	-
К-ть трансф: 1, 1000 кВА, Кз=0,64														
Всього на шинах 10 кВ ТП 3:	-	-	-	-	-	-	-	577	328,59	-	-	-	-	663,85
ТП 2														
Теплогенераторна станція														
силове	25	2,2	250	1312,6	0,78	0,7	0,94	1024	958,52	10	1,12	1147	1054,36	1558,14
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	18,7	-	-	-	21,3	10,32	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	1043	958,52	-	-	1169	1064,68	1580,84
Всього по ТП 2:														
силове	25	2,2	250	1312,6	0,78	0,7	0,94	1024	958,52	10	1,12	1147	1054,36	1558,14
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	18,7	-	-	-	21,3	10,32	-
На шинах 0.4 кВ ТП 2:	-	-	-	-	-	-	-	1043	958,52	-	-	1169	1064,68	1580,84
Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,5	96,24	-
К-ть трансф: 2, 1000 кВА, Кз=0,79														
Всього на шинах 10 кВ ТП 2:	-	-	-	-	-	-	-	1187	1160,93	-	-	-	-	1660,4

продовження табл. 1.3

ТП 4															
Адміністративно-побутовий корпус															
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	17,1	-	-	-	16,4	7,96	-	
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	17,1	-	-	-	16,4	7,95	18,26	
Відділення сухих компонентів															
силове	104	1	25	511,46	0,75	0,7	1,07	384	409,1	40	1,07	410	409,1	579,14	
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	65,4	-	-	-	74,6	36,1	-	
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	449	264,76	-	-	485	300,86	570,3	
Транспортний бокс															
силове	25	1,5	10	146,74	0,35	0,7	1,06	51,4	54,25	25	1,32	67,7	54,25	86,77	
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	9,49	-	-	-	10,8	5,24	-	
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	60,9	54,25	-	-	78,5	59,49	98,52	
Сховище готової продукції															
силове	10	0,5	10	24,79	0,1	0,8	0,75	2,48	1,86	5	3,04	7,54	2,04	7,81	
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	16,5	-	-	-	11,9	5,75	-	
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	19	1,86	-	-	19,4	7,8	20,94	
Всього по ТП 4:															
силове	139	0,5	25	683	0,64	0,8	0,73	437	320,87	54	1,1	479	320,87	576,74	
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	109	-	-	-	114	55,04	-	
На шинах 0.4 кВ ТП 4:	-	-	-	-	-	-	-	546	320,87	-	-	593	375,92	702,08	
Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,83	40,96	-	
К-ть трансф: 1, 1000 кВА, Кз=0,70															
Всього на шинах 10 кВ ТП 4:	-	-	-	-	-	-	-	601	416,87	-	-	-	-	731,25	
ТП 5															
Зона технічного обслуговування															
силове	51	0,3	100	464,81	0,24	0,7	1,12	112	124,61	9	1,78	199	137,07	241,73	
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	17,6	-	-	-	20,1	9,72	-	
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	129	124,67	-	-	174	134,38	219,87	
Ділянка термооброблених сирів															
силове	113	1,1	7,5	691,4	0,62	0,8	0,88	427	376,83	113	1,07	456	376,83	591,86	

			продовження табл. 1.3																
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	110	-	-	-	126	60,84	-
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	629	277,2	-	-	664	338,04	745,25
					Гідротехнічний вузол														
					силове	9	10	100	477,66	0,8	0,8	0,75	382	286,6	9	1	382	315,26	495,39
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	2,36	-	-	-	2,69	1,3	-
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	385	286,6	-	-	385	316,56	498,31
					Всього по ТП 5:														
					силове	173	0,6	100	1633,9	0,62	0,8	0,68	1012	688,46	32	1,14	1151	688,46	1341,53
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	130	-	-	-	148	71,86	-
					На шинях 0.4 кВ ТП 5:	-	-	-	-	-	-	-	1143	688,46	-	-	1300	760,33	1505,91
					Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,3	89,96	-
					К-ть трансф: 2, 1000 кВА, Кз=0,75														
					Всього на шинях 10 кВ ТП 5:	-	-	-	-	-	-	-	1317	850,28	-	-	-	-	1567,77
					Підсумок по підприємству														
					силове	899	0,3	250	5984,5	0,67	0,8	0,75	4005	3009,86	47	1,09	4378	3009,86	5312,63
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	541	-	-	-	605	296,79	-
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	4545	3009,86	-	-	4982	3306,65	5979,86
					Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69,5	361,51	-
					Всього по об'єкту 10 кВ:	-	-	-	-	-	-	-	5052	3668,16	-	-	5051,5	3668,16	6243,17
					tgφ=0,73														
					Попереднє значення Qкп	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2910,41	-
					Всього з урах. поперед. комп.:	-	-	-	-	-	-	-	5052	757,79	-	-	-	-	5108,42

1.4 Графіки електричних навантажень молокопереробного підприємства

У цьому розділі визначено характеристики добового споживання електроенергії об'єктом молочної промисловості. Відповідні обчислення здійснювалися з урахуванням алгоритмів, наведених у фаховому джерелі [1]. Підсумкові цифрові показники відображено у таблицях 1.4.1 та 1.4.2, а їх візуалізація представлена на рисунках 1.4.1 – 1.4.5.

Таблиця 1.4.1 - Вихідні дані до графіка електричних навантажень молокозаводу (Добовий графік у %)

№	Робочі дні Р, %	Робочі дні Q, %	Вихідні дні Р, %	Вихідні дні Q, %
1	45,5	42,5	38,5	60,7
2	45,5	42,5	38,5	60,7
3	45,5	42,5	38,5	60,7
4	45,5	42,5	38,5	60,7
5	50,6	45,5	38,5	60,7
6	50,6	45,5	38,5	60,7
7	81	65,8	38,5	60,7
8	91,1	75,9	38,5	60,7
9	100	100	27,3	50,6
10	100	100	27,3	50,6
11	91,1	75,9	27,3	50,6
12	81	65,8	27,3	50,6
13	91,1	75,9	27,3	50,6
14	91,1	75,9	27,3	50,6
15	101,2	81	27,3	50,6
16	101,2	81	27,3	50,6
17	91,1	75,9	27,3	50,6
18	81	65,8	38,5	60,7
19	60,7	50,6	38,5	60,7
20	60,7	50,6	38,5	60,7
21	50,6	45,5	38,5	60,7
22	50,6	45,5	38,5	60,7
23	50,6	45,5	38,5	60,7
24	45,5	42,5	38,5	60,7

Таблиця 1.4.2 - Добовий графік навантажень Р, Q, S в абсолютних одиницях

№	Зимові робочі Р, кВт	Зимові робочі Q, кВар	Зимові робочі S, кВА	Зимові вихідні Р, кВт	Зимові вихідні Q, кВар	Зимові вихідні S, кВА	Літні робочі Р, кВт	Літні робочі Q, кВар	Літні робочі S, кВА	Літні вихідні Р, кВт	Літні вихідні Q, кВар	Літні вихідні S, кВА
1	2273	318	2295	1920	454	1972	1932	270	1951	1631	387	1677
2	2273	318	2295	1920	454	1972	1932	270	1951	1631	387	1677
3	2273	318	2295	1920	454	1972	1932	270	1951	1631	387	1677
4	2273	318	2295	1920	454	1972	1932	270	1951	1631	387	1677
5	2526	341	2549	1920	454	1972	2147	289	2167	1631	387	1677
6	2526	341	2549	1920	454	1972	2147	289	2167	1631	387	1677
7	4042	493	4072	1920	454	1972	3436	419	3461	1631	387	1677
8	4547	569	4582	1920	454	1972	3865	483	3895	1631	387	1677
9	5052	758	5109	1364	378	1416	4294	644	4341	1160	322	1203
10	5052	758	5109	1364	378	1416	4294	644	4341	1160	322	1203
11	4547	569	4582	1364	378	1416	3865	483	3895	1160	322	1203
12	4042	493	4072	1364	378	1416	3436	419	3461	1160	322	1203
13	4547	569	4582	1364	378	1416	3865	483	3895	1160	322	1203
14	4547	569	4582	1364	378	1416	3865	483	3895	1160	322	1203
15	5052	606	5088	1364	378	1416	4294	515	4324	1160	322	1203
16	5052	606	5088	1364	378	1416	4294	515	4324	1160	322	1203
17	4547	569	4582	1364	378	1416	3865	483	3895	1160	322	1203
18	4042	493	4072	1920	454	1972	3436	419	3461	1631	387	1677
19	3031	378	3054	1920	454	1972	2577	322	2597	1631	387	1677
20	3031	378	3054	1920	454	1972	2577	322	2597	1631	387	1677
21	2526	341	2549	1920	454	1972	2147	289	2167	1631	387	1677
22	2526	341	2549	1920	454	1972	2147	289	2167	1631	387	1677
23	2526	341	2549	1920	454	1972	2147	289	2167	1631	387	1677
24	2273	318	2295	1920	454	1972	1932	270	1951	1631	387	1677

						Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

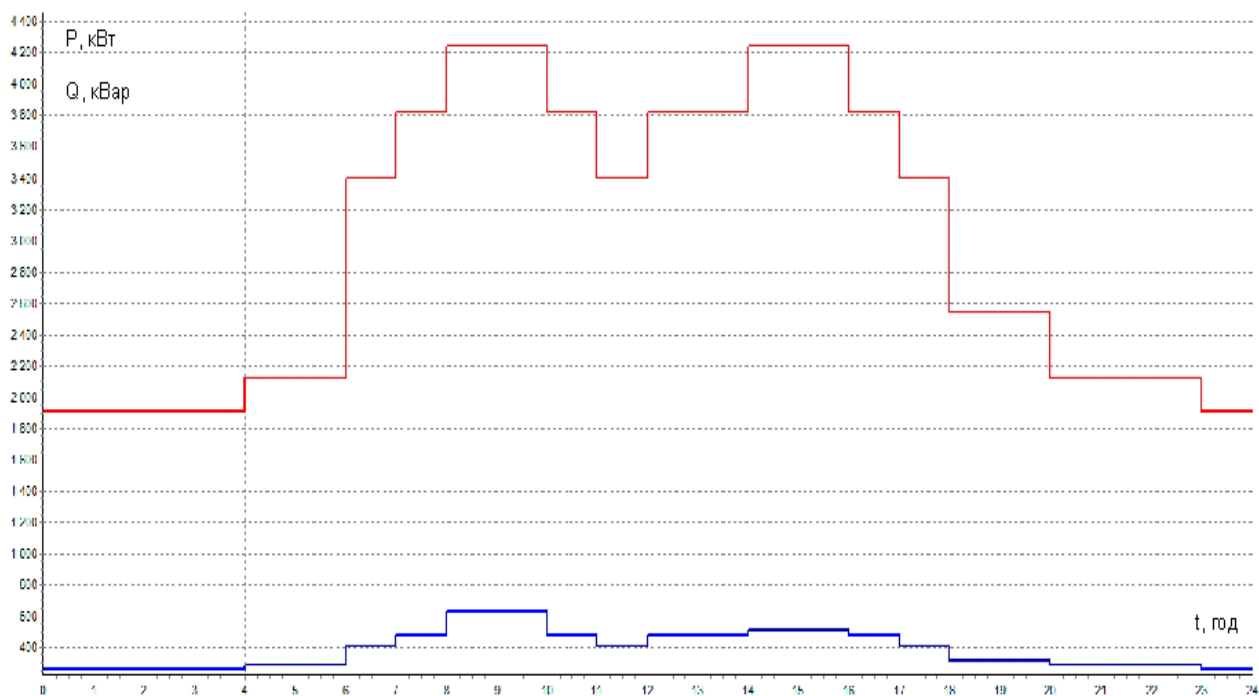


Рисунок 1.4.1. - Добовий графік навантаження для молокопереробного підприємства (літні робочі дні)

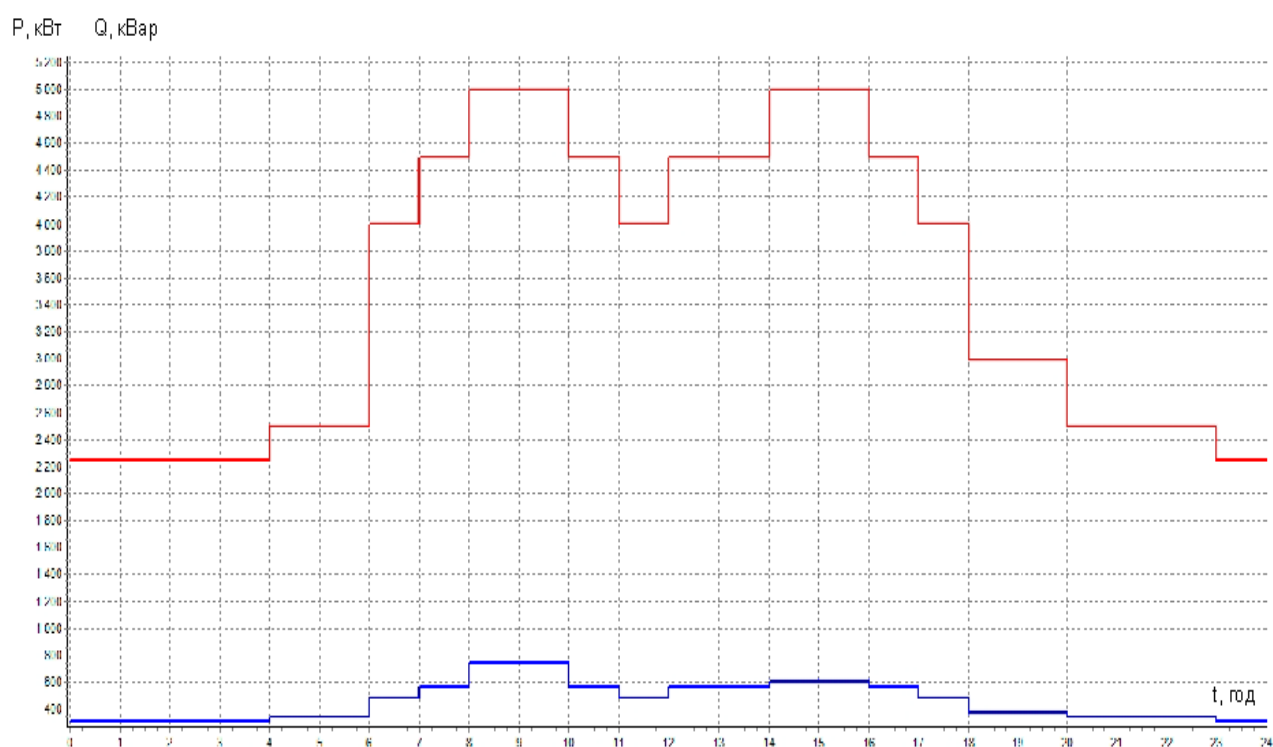


Рисунок 1.4.2. - Добовий графік навантаження для молокопереробного підприємства (зимові робочі дні)

P, кВт Q, кВар

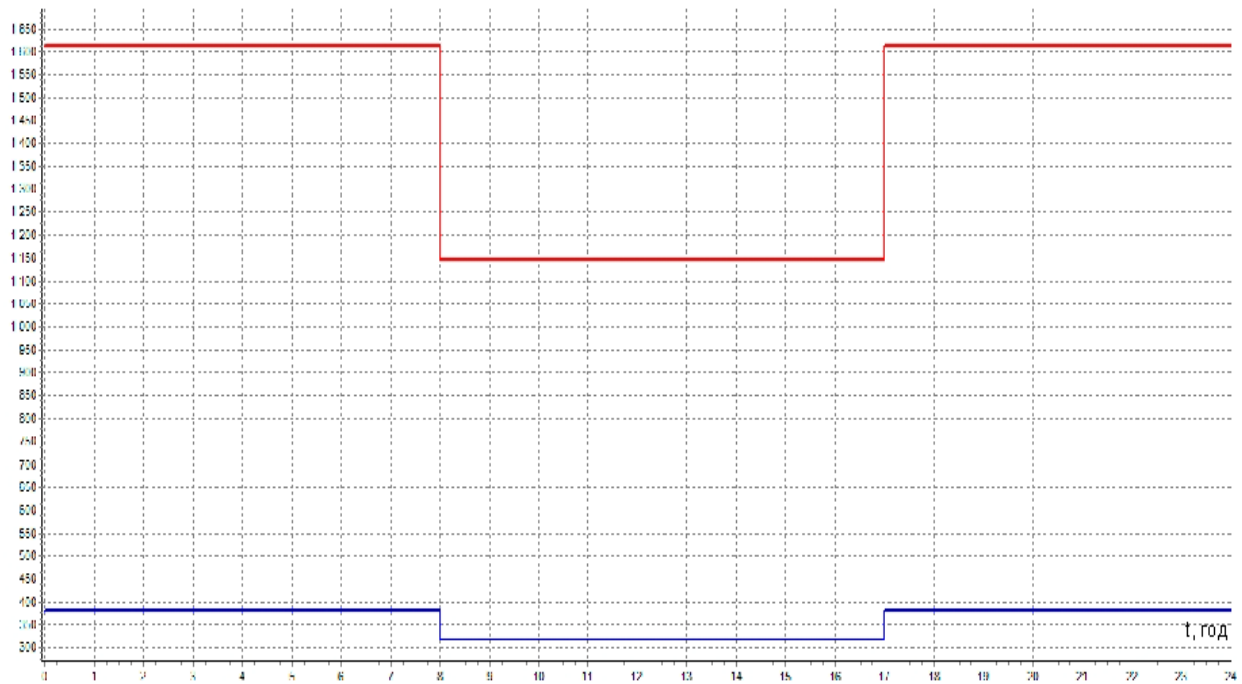


Рисунок 1.4.3. - Добовий графік навантаження для молокопереробного підприємства (літні вихідні дні)

P, кВт Q, кВар

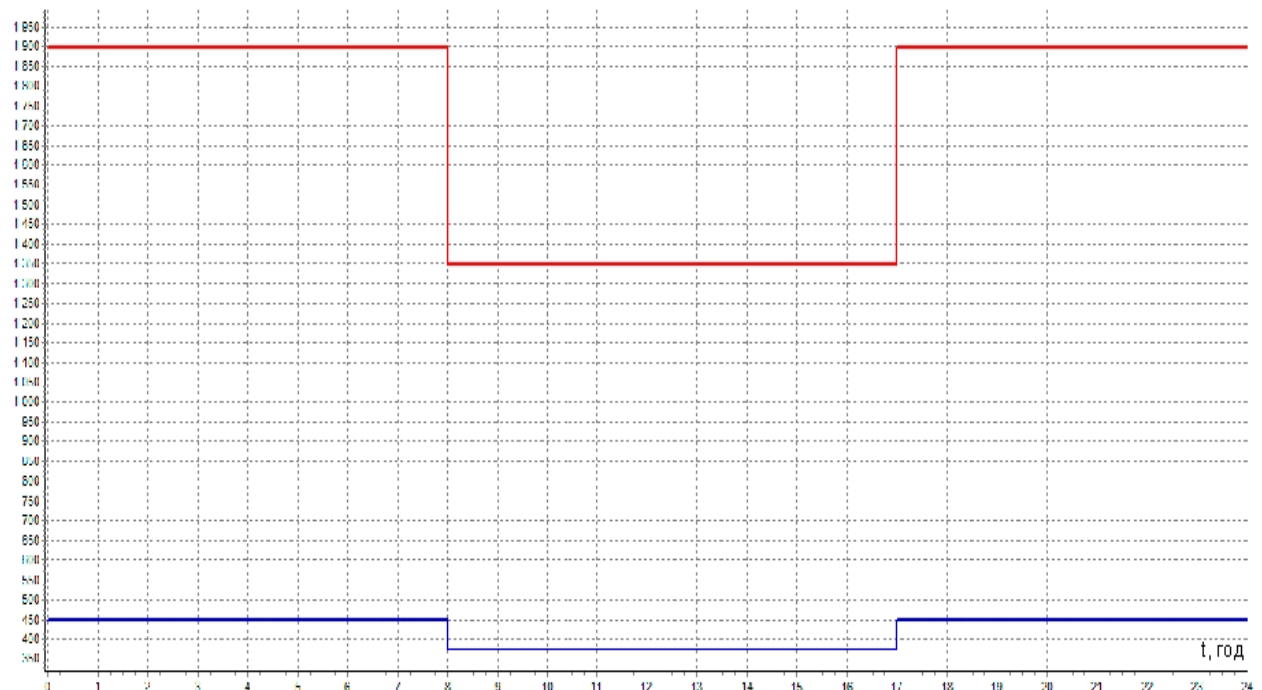


Рисунок 1.4.4. - Добовий графік навантаження для молокопереробного підприємства (зимові вихідні дні)

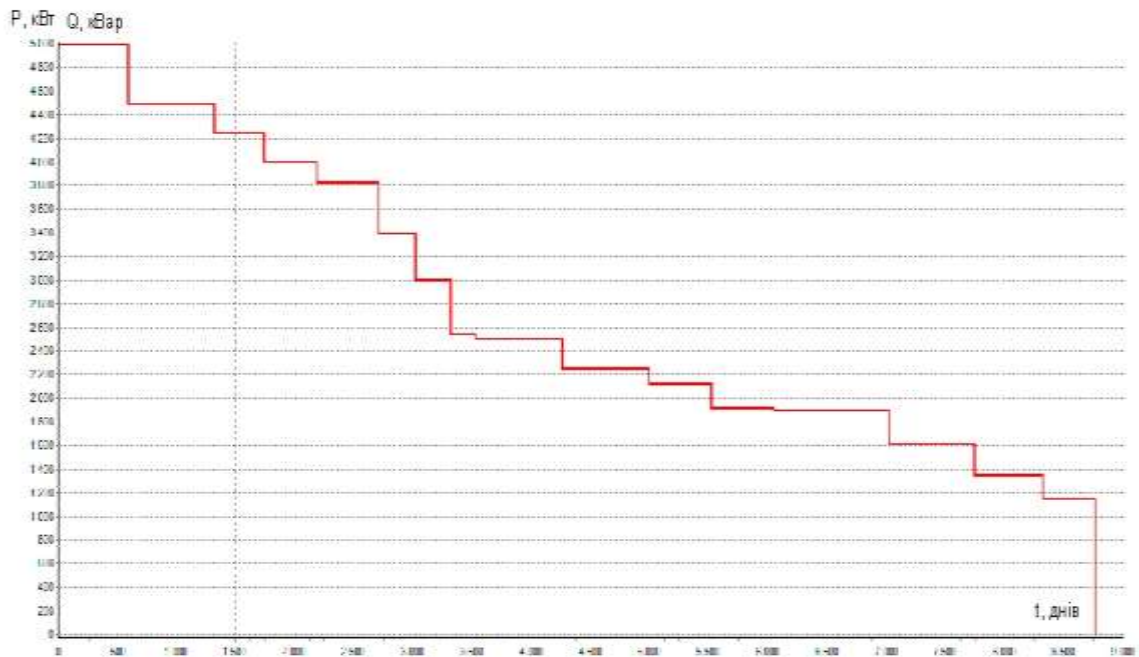


Рисунок 1.4.5. - Річний графік активного Р (по молокопереробному підприємству)

Розрахункові величини графіків електричного навантаження (по молокопереробному підприємстві):

$$W_{з.р.} = 12513284 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$V_{з.р.} = 1631941 \text{ кВар} \cdot \text{год.}$$

$$W_{з.в.} = 2669813 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$V_{з.в.} = 664444 \text{ кВар} \cdot \text{год.}$$

$$W_{л.р.} = 7597484 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$V_{л.р.} = 990131 \text{ кВар} \cdot \text{год.}$$

$$W_{л.в.} = 1675581 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$V_{л.в.} = 417365 \text{ кВар} \cdot \text{год.}$$

$$W_p = 24456161 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$V_p = 3703881 \text{ кВар} \cdot \text{год.}$$

$$T_{\max} = 4900,11 \text{ год.}$$

$$\tau = 3279,29 \text{ год.}$$

$$S_p = 5108,42 \text{ кВА}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		21

2. Побудова картограми електричних навантажень молокопереробного підприємства

Для коректного просторового розміщення ГЗП (ЦРП), а також трансформаторних підстанцій на генеральний план виробничого об'єкта наноситься картограма електричних навантажень. Цей графічний документ відображає на генплані площі у вигляді кіл, розмір яких (в обраному масштабі) пропорційний розрахунковим потужностям відповідних структурних підрозділів.

Для прикладу наведемо розрахунок елементів картограми для відділення обробки сировини (колишнього цеху молока).

Згідно з вашим правилом, я привів числові значення у формулах у повну відповідність до нашої попередньої зведеної таблиці 4.1 (де $P_{р.сил} = 230,52$ кВт, а $P_{р.осв} = 67,37$ кВт), а також залишив формули йти одна за одною без зайвих текстових пояснень, як в оригіналі:

$$m = 0,1 \text{ кВт/мм}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{P}{\pi m}} = \sqrt{\frac{P_{р.осв} + P_{р.сил}}{\pi m}} = \sqrt{\frac{67,37 + 230,52}{3,14 \cdot 0,1}} = 30,80 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{осв} \cdot 360^\circ}{P} = \frac{67,37 \cdot 360^\circ}{297,89} = 81,42^\circ$$

За результатами розрахунку центру електричних навантажень було визначено його координати: $X = 300,10$ м, $Y = 207,98$ м. Під час накладання цієї точки на генеральний план підприємства виявлено колізію щодо розміщення головної знижувальної підстанції (центрального розподільного пункту). Знайдена локація сприятиме виникненню небажаних перетоків електроенергії. З огляду на це, розташування ГЗП (ЦРП) необхідно скоригувати відповідно до нормативних рекомендацій — змістити у напрямку джерела живлення. Оновлене розміщення ГЗП (ЦРП) зафіксовано на генеральному плані.

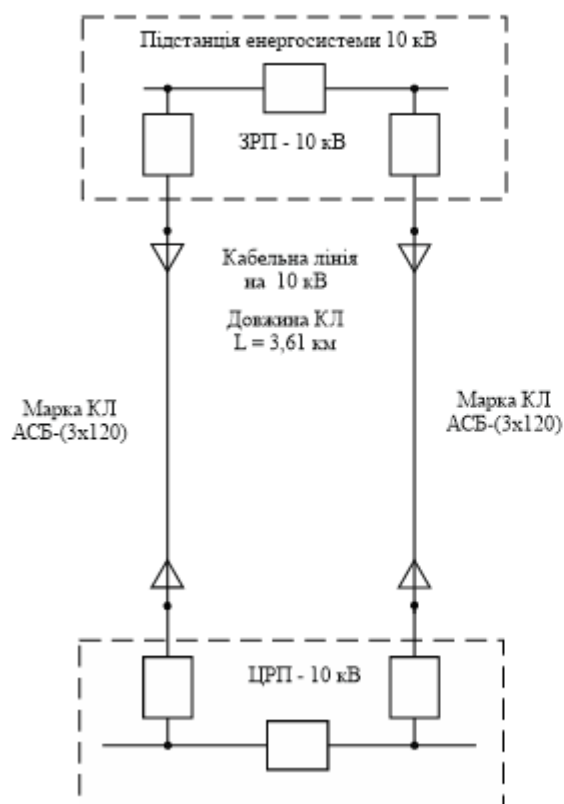
						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		22

3. Техніко-економічне обґрунтування схем електропостачання молокопереробного підприємства

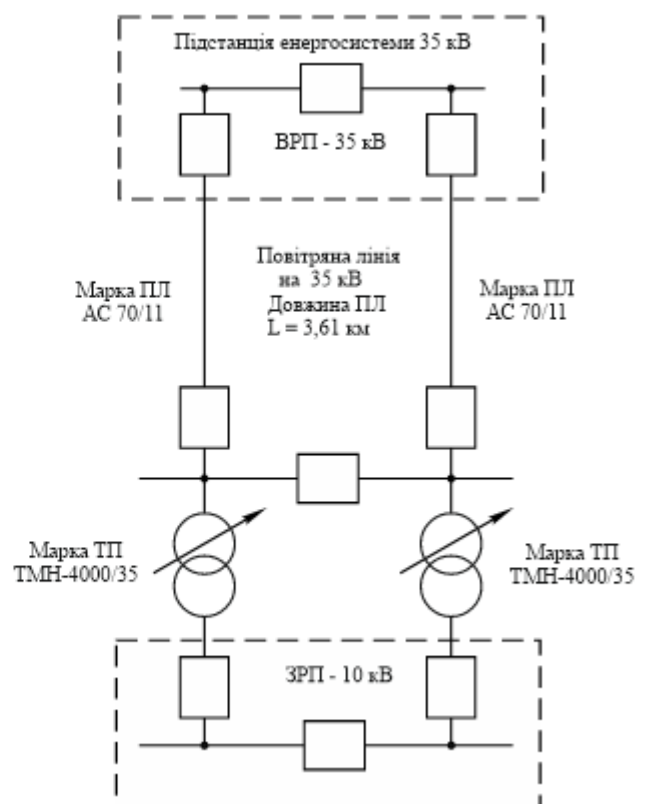
Основне завдання цього етапу розробки полягає у визначенні та підтвердженні найбільш доцільних варіантів конфігурації мереж електропостачання молокозаводу. Вибір базується на зіставленні їхніх експлуатаційних особливостей, а також фінансово-технічних критеріїв.

3.1. Вибір схеми зовнішнього електропостачання молокопереробного підприємства

Керуючись положеннями інструктивних матеріалів [1], виконано зіставлення двох можливих технічних рішень щодо підключення об'єкта до джерела живлення. Розрахунки проводилися відносно базової розподільної підстанції (РП 35/10 кВ), віддаленої від майданчика підприємства на 3,61 км (рис. 3.1).



Побудова кабельної лінії (КЛ) напругою 10 кВ (а)



Побудова повітряної лінії (ПЛ) напругою 35 кВ (б)

Рисунок 3.1 - Схема зовнішнього електропостачання молокопереробного підприємства.

Перша варіант, (транспортування енергії на напругу 10 кВ) передбачає підключення від опорного пункту за допомогою двох паралельно прокладених кабельних ліній. Це гарантує необхідну категорійність надійності для споживачів першої та другої груп молокозаводу (рис. 3.1 а). Очікувана величина струму в нормальних умовах роботи I_p :

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{6263}{\sqrt{3} \cdot 10} = 360,45 \text{ А}$$

Для реалізації проекту обрано провідник марки АСБ-10 (3х150). Перевірка кабелю за умов довготривалого термічного впливу в штатному режимі здійснюється шляхом зіставлення фактичного струмового навантаження ділянки із граничним паспортним значенням. Подальші обчислення за параметрами теплового тривалого режиму для стандартного середовища:

$$I_p = 223,22 \text{ А} \leq K_n I_{дон} = 0,92 \cdot 340 = 312,8 \text{ А}$$

Тестування можливостей кабельної лінії АСБ-10 (3х150) функціонувати під час ліквідації аварійних ситуацій за критерієм стійкості до нагріву:

$$I_{p.ав} = 2I_p = 2 \cdot 63,71 = 360,46 \text{ А} \leq K_{ан} K_n I_{дон} = 1,25 \cdot 1 \cdot 340 = 425 \text{ А}$$

Обрана марка кабелю повністю задовольняє всім нормативним обмеженням. Ступінь його завантаження під час звичайної експлуатації визначається так:

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{дон}} = \frac{180,2}{340} = 0,53$$

Рівень втрат активної потужності ΔP у провіднику АСБ-10 (3х150):

$$\Delta P_{кл} = \Delta P_{1кл} l_{\Sigma} K_3^2 = 56 \cdot 7,22 \cdot 0,281 = 113,57 \text{ кВт}$$

Сумарний обсяг технологічного збитку електричної енергії ΔW протягом року для лінії АСБ-10 (3х150):

$$\Delta W_{л} = \Delta P_{л} \tau = 113,57 \cdot 3302,6 = 375076,28 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Загальні грошові витрати $C_{втр}$ на покриття енергетичних втрат у лінії:

$$C_{втр} = \Delta W_{\Sigma} C_o = 375076,28 \cdot 12,1078 \cdot 0,001 = 4541,35 \text{ тис.грн}$$

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

Обсяг початкових капіталовкладень, необхідних для реалізації першого варіанта зовнішньої мережі 10 кВ молокозаводу, представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Кошторисна вартість зовнішнього енергопостачання (Варіант №1, 10 кВ)

№	Назва заводського елемента схеми	Од. виміру	Кількість	Вартість вкладень	Всього
1	КЛ 10 кВ	км	7,22	2250	16245
2	Підготовка траншеї	км	3,61	350	1263,5
3	Комплектні розподільні шафи серії КУ-10	шт.	2	220	440
Всього					17948,5

Узагальнені результати розрахунку поточних експлуатаційних витрат наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Річні експлуатаційні витрати (Варіант №1, 10 кВ)

№ 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	16245	5	812,25	5	812,25	1624,5
2	Підготовка траншеї	1263,5	5	63,175	5	63,175	126,35
3	КР шафи серії КУ-10	440	15	66	5	22	88
Всього для варіанту схеми 1							1838,85

Під час оцінювання показників безперебійності роботи комутаційного пункту переробного підприємства використовувалися такі базові параметри обладнання (тривалість ремонту T_{ϵ} , частота виникнення пошкоджень λ_a , показник планового сервісу K_n). Загальний параметр інтенсивності відмов для першої лінії λ (за умови послідовного включення апарата захисту та кабелю):

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,004 + 0,2888 = 0,2928 \text{ 1/рік}$$

Середній час ліквідації аварії на першій лінії T_{ϵ} :

$$T_{\epsilon} = \frac{\sum \lambda_i T_{\epsilon i}}{\lambda} = \frac{(0,004 \cdot 0,00045 + 0,2888 \cdot 0,0002527)}{0,2448} = 0,0002554 \text{ рік}$$

Показник планових простоїв для першого кола K_n :

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

Показник вимушених аварійних зупинок для першого кола K_a :

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					26

$$K_a = \lambda T_g = 0,2928 \cdot 0,0002554 = 0,00007478$$

Ймовірність збігу за часом планового обслуговування першого ланцюга та раптового виходу з ладу другого K_{an} :

$$K_{an} = 0.5\lambda K_n^2 = 0,5 \cdot 0,2928 \cdot 0,00000576 = 0,000000843264$$

Загальний показник аварійного простою для структури із двома паралельними лініями $K_a^{(2)}$ (випадок одночасної відмови обох каналів):

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2K_{an} = 0,00000000559201 + 2 \cdot 0,000000843264 = 0,0000016921$$

Сумарний річний час вимушеного перебування комплексу в неробочому стані T_a :

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,0000016921 \cdot 8760 = 0,01482$$

Очікувані фінансові втрати через недовідпущення споживачам енергії:

$$U = U_0 P_{cp} T_a = 378 \cdot 2,83 \cdot 0,01482 = 15,85 \text{ тис.грн.}$$

Загальні зведені витрати для першої моделі мережі:

$$Z_i = E_n K_i + C_i + C_{exp.i} + U_i = 0.12 \cdot 17948,5 + 1838,85 + 4541,35 + 15,85 = 8549,87 \text{ тис.грн./рік}$$

За аналогічною послідовністю дій проведено розрахунки параметрів для другої альтернативи (схема напругою 35 кВ). Підсумкові результати техніко-економічного порівняння обох варіантів інфраструктури зовнішнього живлення молокозаводу згруповано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Зведені техніко-економічні показники варіантів живлення.

Техніко-економічні показники	Варіанти живлення молокопереробного підприємств	
	1-й на 10 кВ	2-й на 35 кВ
Капітальні вкладення	17948,5	15255,66
Поточні витрати	1838,85	2975,57
Вартість втрат ел.енергії	4541,35	2956,77
Збиток	15,85	1,13
Зведені витрати	8549,87	7764,15

Оцінка даних, наведених у таблиці 3.3, демонструє, що найменший рівень зведених витрат забезпечує саме перша схема. З огляду на це, для подальшої деталізації проекту зовнішнього енергозабезпечення підприємства обирається рішення з лінією напругою 10 кВ.

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

3.2. Вибір напруги та схеми внутрішнього електропостачання молокопереробного підприємства

Зіставлення різних варіантів конфігурації мереж розподілу енергії продемонструвало, що магістральний варіант потребує менших початкових фінансових вкладень. Водночас, зважаючи на особливості технологічного циклу молокозаводу та жорсткі критерії безперервності виробництва, радіальний принцип побудови є більш виправданим через вищі показники безперебійності. Оскільки безвідмовне живлення критично важливих приймачів є першочерговим завданням, для подальшого проєкту переробного підприємства затверджено радіальну схему. Її принципову графічну схему зображено на рисунку 3.2.

Для побудови системи внутрішнього розподілу енергії застосовується клас напруги 10 кВ. У межах окремих цехів для забезпечення роботи технологічного обладнання та пристроїв освітлення впроваджується трифазна мережа 380/220 В. Локальні трансформаторні пункти розміщуються по периферії відносно центрального розподільного пункту (РП). Задля транспортування електричної енергії впроваджується радіальна схема з'єднань.

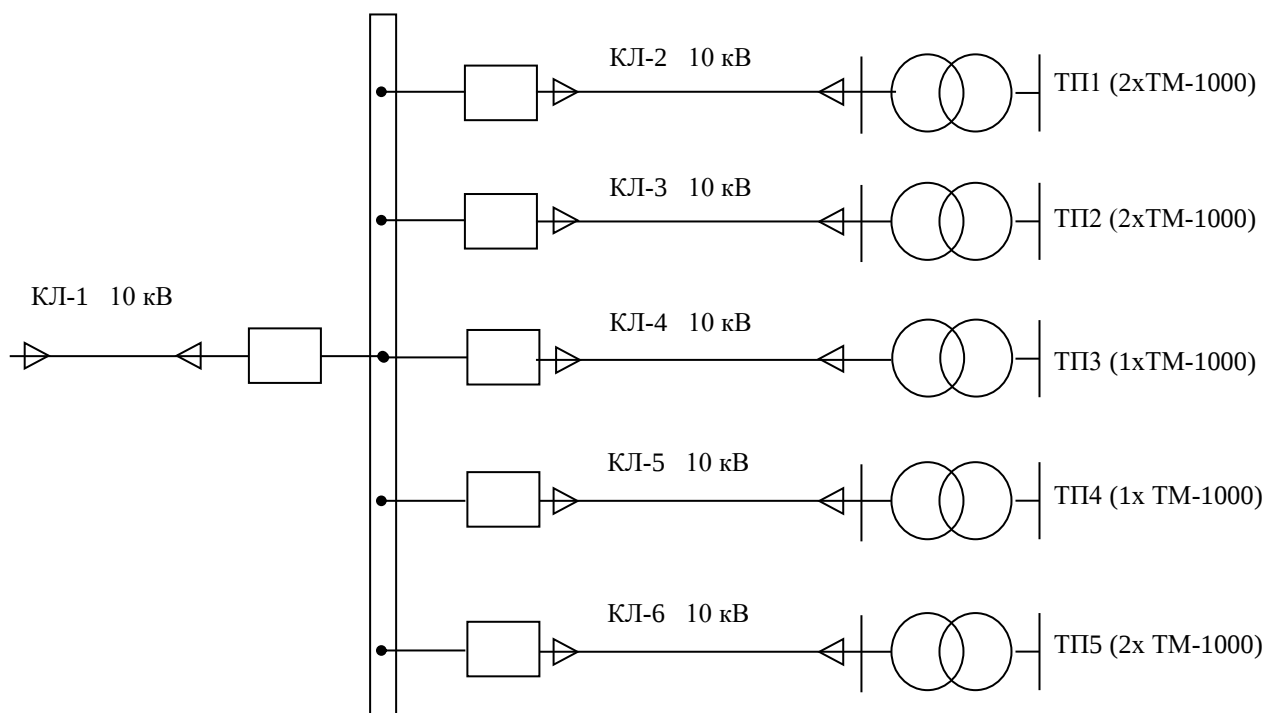


Рисунок 3.2 - Прийнята схема внутрішнього енергозабезпечення молокопереробного підприємства.

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

4. Режими реактивної потужності системи електропостачання молокопереробного підприємства

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності молокопереробного підприємства.

Вихідні розрахункові дані, що слугують основою для подальшого оцінювання та обчислення балансу реактивної складової потужності в системі електропостачання підприємства, наведено нижче. Сукупна величина навантаження, що формується електроприймачами з робочою напругою до 1000 В:

$$P_n = \sum P_{ТП} = 4948 \text{ кВт} ; Q_n = \sum Q_{ТП} = 3402,49 \text{ кВАр}$$

Загальні характеристики електроспоживання обладнання високої напруги (більше 1 кВ):

$$\Delta P_m = \sum \Delta P_{ТП} = 69,46 \text{ кВт} ; \Delta Q_m = \sum \Delta Q_{ТП} = 361,49 \text{ кВАр}$$

Сумарний обсяг активного потужнісного навантаження, необхідний для забезпечення роботи технологічних ліній молокопереробного заводу:

$$\Delta P_{\epsilon} = \sum \Delta P_{ВН} = 0 \text{ кВт} ; \Delta Q_{\epsilon} = \sum \Delta Q_{ВН} = 0 \text{ кВАр}$$

Повні інтегровані показники активного та реактивного споживання, що припадають на виробничі потужності підприємства:

$$P_p = P_n + \Delta P_m + P_{\epsilon} - P_{сг} = 4948 + 69,46 + 0 - 0 = 5017,46 \text{ кВт},$$

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_m + Q_{\epsilon} - Q_{сд} = 3402,49 + 361,49 + 0 - 0 = 3763,98 \text{ кВАр}$$

Економічно доцільна величина реактивної потужності, яку згідно з технічними умовами енергопостачальної компанії дозволено отримувати із зовнішніх електромереж:

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 5017,46 \cdot 0,15 = 752,62 \text{ кВАр}$$

Загальна розрахункова потужність компенсувального устаткування, запланованого до розгортання на промисловому об'єкті:

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

$$Q_{КП} = Q_p - Q_e = 3763,98 - 752,62 = 3011,36 \text{ кВАр}$$

Мінімально допустима кількість силових трансформаторних одиниць, що гарантує безперебійне функціонування виробничого процесу:

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{ном}} = \frac{4948}{0,7 \cdot 1000} = 7,07 \approx 8 \text{ шт.}$$

Для базового варіанта розрахунку, де загальна чисельність КТП відповідає початковому значенню $N = N_0 = 8$ шт., обсяг реактивної потужності, що трансформується через підстанції в електромережу низької напруги, становить:

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{ном})^2 - (P_n + \Delta P_m)^2} = \sqrt{(8 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 5017,46^2} = 2486,99 \text{ кВАр}$$

Необхідна сумарна потужність низьковольтних конденсаторних установок, призначених для підключення на шини напругою 0,4 кВ:

$$Q_{KH} = (Q_n + \Delta Q_m) - Q_1 = 3763,98 - 2486,99 = 1276,99 \text{ кВАр}$$

Проектна ємність компенсувальних пристроїв високої напруги, що інтегруються в розподільну мережу 10 кВ:

$$Q_{KB} = Q_{КП} - Q_{KH} = 3011,36 - 1276,99 = 1734,37 \text{ кВАр}$$

Обчислення оптимальних параметрів компенсації для альтернативних варіантів, які передбачають розширення парку силових трансформаторів до $N_{т2} = 9$ шт, $N_{т3} = 10$ шт, виконується за аналогічним алгоритмом.

Таблиця 4.1 - Зведені результати обчислення параметрів засобів компенсації

№ вар.	Кількість тр-торів заводу	Потужність Q_1 , квар	Потужність Q_{KH} , кВАр	Потужність Q_{KB} , квар
1	8	2486,99	1276,99	1734,37
2	9	3809,87	0	3011,36
3	10	4881,1	0	3011,36

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв молокопереробного підприємства

Параметри компенсувальних вузлів низької (0,4 кВ) та високої (10 кВ) напруги, які пропонуються до впровадження на промисловому об'єкті для трьох розгалужених варіантів, зведені у табл. 4.2.1 – 4.2.4.

Таблиця 4.2.1 - Параметри конденсаторних батарей для варіанта з кількістю КТП $N_T = N_0 = 8$.

№ КТП заводу	К-сть	Потужн P_p , кВт	Потужн Q_p , кВАр	Потужн Q_{np} , кВАр	Потужн $Q_{кп}$, кВАр	Кільк.та потужн.БК, шт.·кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп}-Q_{БК}$, кВАр	Коеф K_z	Потужн S_p , кВА
ТП 1	2	1316	909,43	477,64	431,79	2·225;	450	-18,21	0,7	1393,89
ТП 2	2	1169	1064,68	770,35	294,33	2·150;	300	-5,67	0,7	1396,89
ТП 3	1	570	292,13	406,32	0		0	0	0,64	640,5
ТП 4	1	593	375,92	371,96	3,96		0	3,96	0,7	702,115
ТП 5	2	1300	760,33	519,62	240,71	2·112,5;	225	15,71	0,7	1405,91

Сумарна ємність засобів компенсації, що монтуються на шинах низької напруги 0,4 кВ, становить $Q_{кн} = 975$. Для розподільних пристроїв 10 кВ цей параметр становить $Q_{кв} = 1800$ квар (передбачено 4 блоки по 450 квар).

Таблиця 4.2.2 - Параметри конденсаторних батарей для варіанта з кількістю КТП $N_T = 9$.

№ КТП заводу	К-сть	Потужн P_p , кВт	Потужн Q_p , кВАр	Потужн Q_{np} , кВАр	Потужн $Q_{кп}$, кВАр	Кільк.та потужн.БК, шт.·кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп}-Q_{БК}$, кВАр	Коеф K_z	Потужн S_p , кВА
ТП 1	3	1316	909,43	1636,5	0		0	0	0,53	1599,66
ТП 2	2	1169	1064,68	770,35	294,33	2·150;	300	-5,67	0,7	1396,89
ТП 3	1	570	292,13	406,32	0		0	0	0,64	640,5
ТП 4	1	593	375,92	371,96	3,96		0	3,96	0,7	702,115
ТП 5	2	1300	760,33	519,62	240,71	2·112,5;	225	15,71	0,7	1405,91

Загальна потужність батарей конденсаторів, призначених для підключення до низьковольтних ліній 0,4 кВ, дорівнює $Q_{кн} = 5250$ кВАр. На рівні вищої напруги 10 кВ величина потужності компенсації фіксується на позначці $Q_{кв} = 2400$ квар (застосовано 4 блоки по 600 квар).

Таблиця 4.2.3 - Параметри конденсаторних батарей для варіанта з кількістю КТП $N_T = 10$.

№ КТП заводу	К-сть	Потужн P_p , кВт	Потужн Q_p , кВАр	Потужн Q_{np} , кВАр	Потужн $Q_{кт}$, кВАр	Кільк.та потужн.БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп}-Q_{БК}$, кВАр	Коеф K_3	Потужн S_p , кВА
ТП 1	3	1316	909,43	1636,5	0		0	0	0,53	1599,66
ТП 2	2	1169	1064,68	770,35	294,33	2·166;	332	-37,67	0,69	1379,63
ТП 3	1	570	292,13	406,32	0		0	0	0,64	640,5
ТП 4	1	593	375,92	371,96	3,96		0	3,96	0,7	702,115
ТП 5	3	1300	760,33	1649,24	0		0	0	0,5	1506,02

Сукупна потужність конденсаторних батарей низької напруги дорівнює $Q_{кн} = 332$ кВАр, тоді як для розподільного пристрою 10 кВ даний показник досягає $Q_{кв} = 2700$ квар (формується за рахунок 6 установок по 450 квар).

Нижче наведено алгоритм розрахунку інтегральних зведених витрат на побудову системи компенсації для базового варіанта із залученням силових трансформаторів у кількості $N_T = N_0 = 8$. Технологічне розсіювання активної потужності в низьковольтних КУ промислового об'єкта:

$$\Delta P_{KH} = P_{ПИТ}^{KH} \cdot Q_{KH} = 0,0045 \cdot 975 = 4,39 \text{ кВт}$$

Втрати активної потужності у високовольтних батареях конденсаторів:

$$\Delta P_{KB} = P_{ПИТ}^{KB} \cdot Q_{KB} = 0,003 \cdot 1800 = 5,4 \text{ кВт}$$

Додаткові втрати активної потужності в силових трансформаторних агрегатах, викликані проходженням реактивних струмів:

$$\Delta P_{ТП} = \frac{P_{HH}^2 + Q_1^2}{U_H^2} R_T \cdot 10^{-3} = \frac{4948^2 + 2486,99^2}{10^2} \cdot 0,11 \cdot 0,001 = 33,73 \text{ кВт}$$

при цьому значення еквівалентного активного опору трансформаторного парку:

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

Капітальні вкладення в закупівлю та проведення монтажу низьковольтних КУ:

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

$$K_{KH} = \sum_{i=1}^n N_{KH i} \cdot K_{KH i} = 2 \cdot 108,2 + 2 \cdot 110,2 + 2 \cdot 147,5 = 731,8 \text{ тис.грн.}$$

Загальна кошторисна вартість комплектних трансформаторних підстанцій:

$$K_{KB} = \sum_{i=1}^n N_{KB i} \cdot K_{KB i} = 3 \cdot 1300 + 2 \cdot 705 = 5340 \text{ тис.грн.}$$

Капітальні витрати на високовольтні КУ на стороні 10 кВ:

$$K_{КТП} = N_{КТП(2)} \cdot K_{КТП(2)} + N_{КТП(1)} \cdot K_{КТП(1)} = 3 \cdot 1310 + 2 \cdot 705 = 5340 \text{ тис.грн.}$$

Сумарні зведені витрати на розгортання комплексу компенсації реактивної складової потужності:

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

$$= 0,12 \cdot (731,8 + 1992 + 5340) + 12,1078 \cdot 3240 \cdot (4,39 + 5,4 + 33,73) \cdot 10^{-3} = 2675,12 \text{ тис.грн.}$$

Розрахунок техніко-економічних показників для альтернативних варіантів, де передбачено збільшення кількості силових трансформаторів до $N_T = 9$ шт., $N_T = 10$ шт виконується за ідентичною методикою.

Таблиця 4.2.4 - Зведені техніко-економічні показники варіантів компенсації

№ вар	Потуж Q_{KH} , квар	Потуж ΔP_{KH} , кВт	Потуж Q_{KB} , квар	Потуж ΔP_{KB} , кВт	Потуж N_{TP} , шт.	Потуж R_{KB} , Ом	Потуж S_{TP} , кВА	Потуж ΔP_{TP} , кВт	Потуж K_{KH} , тис. грн	Потуж K_{KB} , тис. грн	Потуж $K_{ТП}$, тис. грн	Загальн Z , тис. грн.
1	1	975	4,39	1800	5,4	8	0,11	5537,9	33,73	1992	5340	2675
2	2	525	2,36	2400	7,2	9	0,1	6244,8	39	2460	6045	2978
3	3	332	1,49	2700	8,1	10	0,09	6950,4	43,48	2988	6750	3251

Оцінювання виконаних розрахунків демонструє, що найменші фінансові видатки забезпечуються за умови впровадження першої альтернативи. З огляду на це, зазначене проєктне рішення приймається для практичної реалізації.

Таблиця 4.2.5 - Розрахунок електричних навантажень вище 1000 В молокопереробного підприємства (з БК)

Назва групи споживачів	P _{min} , кВт	P _{max} , кВт	К- ть	P _{сум} , кВт	K _и	cosφ	tgφ	P _{см} , кВт	Q _{см} , кВар	η _е	K _м	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА
ТП 1														
Дільниця виробництва вершкового м														
силове	167	0,3	16	657	0,69	0,8	0,68	453,3	308,17	81	1,06	481,99	308,17	572,08
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	26,58	-	-	-	30,83	14,92	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	479,9	308,17	-	-	512,82	323,09	606,11
Відділення обробки сировини														
силове	117	0,3	12	308	0,69	0,9	0,55	213,4	117,39	51	1,08	230,52	117,39	258,54
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	59,1	-	-	-	67,37	32,61	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	272,4	116,88	-	-	297,89	150	333,31
Лінія виготовлення кисломолочної продукції														
силове	113	1,1	7,5	691,4	0,62	0,8	0,88	427,3	376,83	113	1,07	456,39	376,83	591,86
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	108,8	-	-	-	124,05	60,04	-
Всього:	-	-	-	-	-	-	-	536,1	376,83	-	-	580,44	436,87	726,46
Всього по ТП 1:														
силове	397	0,3	16	1656,4	0,66	0,8	0,73	1094	801,88	205	1	1093,9	801,88	1356,35
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	194,5	-	-	-	222,25	107,57	-
БК 0,4 кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-450	-	-	-	-450	-
На шинах 0.4 кВ ТП 1:	-	-	-	-	-	-	-	1288	345,45	-	-	1316,2	453	1391,95
Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,11	79,07	-
К-ть трансф: 2, 1000 кВА, Kз=0,71														
Всього на шинах 10 кВ ТП 1:	-	-	-	-	-	-	-	1331	532,07	-	-	-	-	1433,48
ТП 3														
Сироробний комплекс														
силове	146	0,3	16	585,34	0,68	0,9	0,46	398,6	181,61	72	1,07	426,55	181,61	463,6
освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	74	-	-	-	84,36	40,83	-

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	продовження таблиці 4.2.5														
35	Арк.				Всього:	-	-	-	-	-	-	-	472,6	181,61	-	-	510,91	222,45	557,24
					Ремонтно-механічний блок														
					силове	19	3	7,5	113,34	0,34	0,6	1,52	38,54	58,51	19	1,38	53,28	58,51	79,18
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	9,87	-	-	-	11,25	5,45	-
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	48,4	58,51	-	-	64,53	63,96	90,86
					Зовнішня територія підприємства														
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	4,93	-	-	-	3,31	5,73	-
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	4,93	-	-	-	3,31	5,73	6,62
					Всього по ТП 3:														
					силове	165	0,3	16	698,68	0,63	0,9	0,55	437,2	240,13	86	1,08	470,97	240,13	528,66
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	88,79	-	-	-	98,91	52,01	-
					БК 0,4 кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0	-
					На шинах 0.4 кВ ТП 3:	-	-	-	-	-	-	-	526	240,13	-	-	569,89	292,13	640,4
					Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,93	36,45	-
					К-ть трансф: 1, 1000 кВА, Кз=0,66														
					Всього на шинах 10 кВ ТП 3:	-	-	-	-	-	-	-	576,8	328,59	-	-	-	-	663,85
					ТП 2														
					Теплогенераторна станція														
					силове	25	2,2	250	1312,6	0,78	0,7	0,94	1024	958,52	10	1,12	1147,2	1054,4	1558,14
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	18,7	-	-	-	21,32	10,32	-
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	1043	958,52	-	-	1168,5	1064,7	1580,84
					Всього по ТП 2:														
					силове	25	2,2	250	1312,6	0,78	0,7	0,94	1024	958,52	10	1,12	1147,2	1054,4	1558,14
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	18,7	-	-	-	21,32	10,32	-
					БК 0,4 кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-300	-	-	-	-300	-
					На шинах 0.4 кВ ТП 2:	-	-	-	-	-	-	-	1043	653,72	-	-	1168,5	759,88	1394,15
					Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,74	77,28	-
					К-ть трансф: 2, 1000 кВА, Кз=0,71														
					Всього на шинах 10 кВ ТП 2:	-	-	-	-	-	-	-	1183	837,16	-	-	-	-	1449,63

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	продовження таблиці 4.2.5											
					ТП 4											
					Адміністративно-побутовий корпус											
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	16,44	7,96	-	
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	16,43	7,95	18,26	
					Відділення сухих компонентів											
					силове	104	1	25	511,46	0,75	0,7	1,07	383,6	409,1	579,14	
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	74,58	36,1	-	
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	484,5	300,86	570,3	
					Транспортний бокс											
					силове	25	1,5	10	146,74	0,35	0,7	1,06	51,36	54,25	86,77	
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	10,82	5,24	-	
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	78,53	59,49	98,52	
					Сховище готової продукції											
					силове	10	0,5	10	24,79	0,1	0,8	0,75	2,48	1,86	7,81	
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	11,89	5,75	-	
					Всього:	-	-	-	-	-	-	-	19,43	7,8	20,94	
					Всього по ТП 4:											
					силове	139	0,5	25	683	0,64	0,8	0,73	437,4	320,87	576,74	
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	113,72	55,04	-	
					БК 0,4 кВ	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	
					На шинах 0.4 кВ ТП 4:	-	-	-	-	-	-	-	592,95	375,92	702,08	
					Втрати в трансформаторах	-	-	-	-	-	-	-	7,45	39,03	-	
					К-ть трансф: 1, 1000 кВА, Кз=0,72											
					Всього на шинах 10 кВ ТП 4:	-	-	-	-	-	-	-	-	-	731,25	
						ТП 5										
						Зона технічного обслуговування										
					силове	51	0,3	100	464,81	0,24	0,7	1,12	111,6	124,61	241,73	
					освітлювальне	-	-	-	-	-	-	-	20,08	9,72	-	
36	Арк.															

5. Вибір кількості трансформаторів їх потужності та місця розташування на молокопереробного підприємства

Новітня інженерна практика в галузі розроблення, монтажу й обслуговування головних знижувальних підстанцій (ГПП) підтверджує раціональність розгортання двох силових трансформаторних одиниць ідентичної потужності, які працюють паралельно.

Ступінь завантаження згаданого силового електрообладнання характеризується відповідним коефіцієнтом, регламентовані межі якого становлять:

$$K_3 = \frac{S_{max}}{n \cdot S_{ном}} \leq 0,6 - 0,7$$

Приблизна номінальна потужність однієї трансформаторної одиниці розраховується таким чином:

$$S_T = \frac{S_{max} K_{1,2}}{K_{ав}(n-1)} = \frac{0,8 \cdot 5098,13}{1,4(2-1)} = 2913,2 \text{ кВА}$$

Згідно з обчислювальними вимогами, для монтажу на ГПП обираються два силові трансформатори модифікації ТДН-4000/110. Розрахункове значення їхнього завантаження за умов стандартного режиму роботи дорівнює:

$$K_3 = \frac{S_{max}}{n \cdot S_{ном}} = \frac{19726,76}{2 \cdot 4000} = 0,64$$

З метою модернізації внутрішньомайданчикових електричних мереж провадиться техніко-економічне обґрунтування одиничної потужності, сумарної кількості та територіального розташування цехових підстанцій на промисловому об'єкті. Фактичний рівень завантаженості силових машин визначається за залежністю:

$$K_3 = \frac{S_p}{N \cdot S_{ном}} = \frac{1433,48}{2 \cdot 1000} = 0,71.$$

Зразок підбору силового трансформаторного агрегату для підстанції типу ТП-1:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						38

$$S_{\text{ном.тр}} = 2 \cdot 1000 = 2000 \geq \frac{S_p}{K_1} = \frac{1433,48}{1,08} = 1327,30 \text{ кВА}.$$

$$S_{\text{ном.тр}} = 1000 \geq \frac{S_p}{K_2} = \frac{1433,48}{1,4} = 1023,91 \text{ кВА}.$$

На основі виконаної перевірки для подальшої експлуатації затверджується силовий трансформатор моделі ТМ-1000/10/0,4, характеристики якого цілковито відповідають вихідним вимогам проекту.

Для комплексного упорядкування обчислювальних показників стосовно інших виробничих ділянок заводу, подальший підбір цехового устаткування систематизовано у вигляді таблиці.

Таблиця 5 - Підсумкові результати підбору силових трансформаторів для цехових ТП.

№ ТП	К-сть ТП	$S_{\text{роз}}$, кВА	Марка	K_3	$S_{\text{ном}} > S_p/K_1$	$S_{\text{ном}} > S_p/K_2$	Тип ТП
ТП-1	2	1433,48	ТМ-1000-10/0,4	0,71	1327,30	1023,91	Вбудована
ТП-2	2	1449,63	ТМ-1000-10/0,5	0,71	1342,25	1035,45	Вбудована
ТП-3	1	663,85	ТМ-1000-10/0,6	0,66	614,68	474,18	Вбудована
ТП-4	1	731,25	ТМ-1000-10/0,7	0,72	677,08	522,32	Вбудована
ТП-5	2	1449,71	ТМ-1000-10/0,8	0,71	1342,32	1035,51	Вбудована

6. Розрахунок струмів короткого замикання. Вибір електрообладнання молокопереробного підприємства та силових електромереж системи постачання

Ця частина кваліфікаційної роботи присвячена визначенню параметрів коротких замикань, а також вибору марок кабельних ліній та апаратів захисту для розподільної мережі високої напруги. Усі розрахункові процедури виконано на основі положень інструктивних матеріалів [1].

6.1. Розрахунок струмів коротких замикань в системі живлення молокопереробного підприємства

Задля дослідження перехідних процесів на базі вихідної структури мережі формується розрахункова еквівалентна модель. У ній усі складники ланцюга відображаються за допомогою відповідних параметрів опору (рис. 6.1.1). Проведемо визначення активних та реактивних складників опору для кожного елемента розроблюваного комплексу.

Показники активного та реактивного опорів зовнішньої енергосистеми:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з}} = \frac{10,5^2}{48,74} = 2,262 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{2,262}{25} = 0,09 \text{ Ом}$$

Опір підвідної лінії електропостачання (обчислений для двох паралельно прокладених кабелів АСБ 3х150 довжиною 3,61 км):

$$R_{кл} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,206 \cdot 3,61}{1} = 0,7437 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,079 \cdot 3,61}{1} = 0,29 \text{ Ом}$$

Сумарний опір петлі замикання у досліджуваному вузлі K_1 :

$$X_{K1} = X_c + X_{кл} = 2,262 + 0,29 = 2,552 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{кл} = 0,09 + 0,7437 = 0,834 \text{ Ом}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		40

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,834^2 + 2,552^2} = 2,685 \text{ Ом}$$

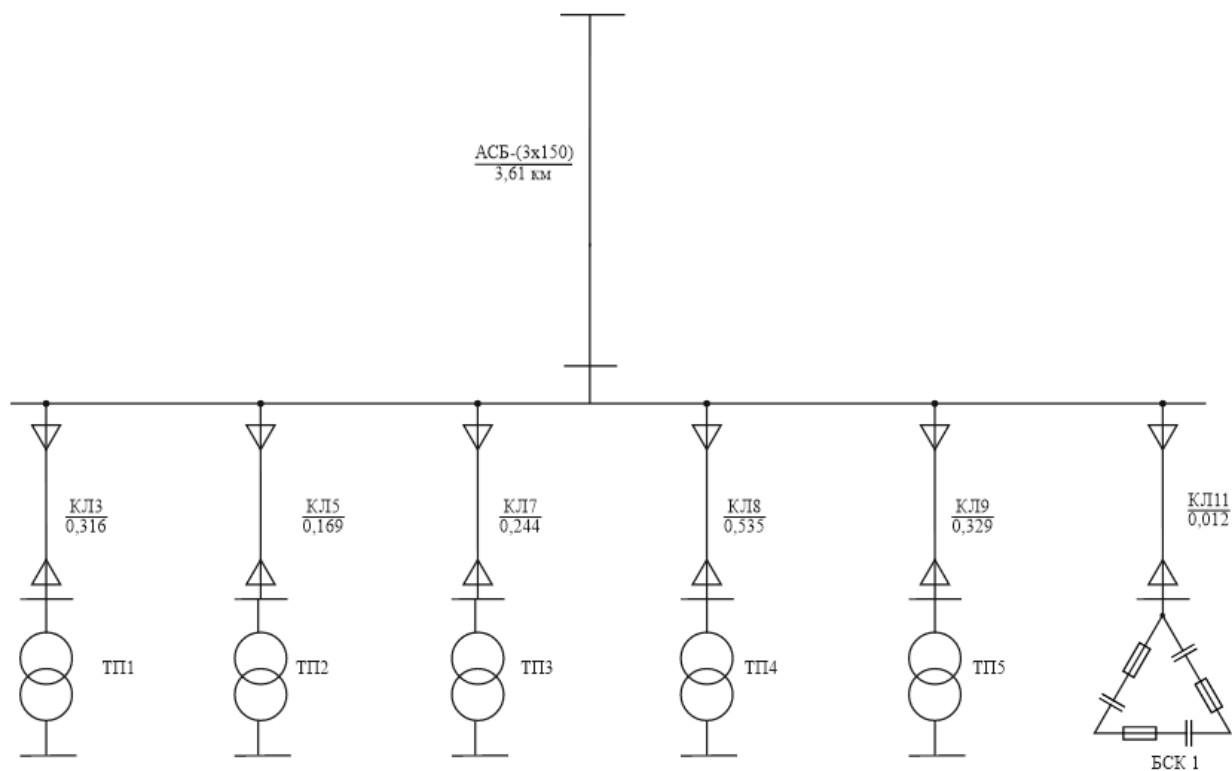


Рисунок 6.1.1- Розрахункова схема ел. мережі для визначення струмів к.з.

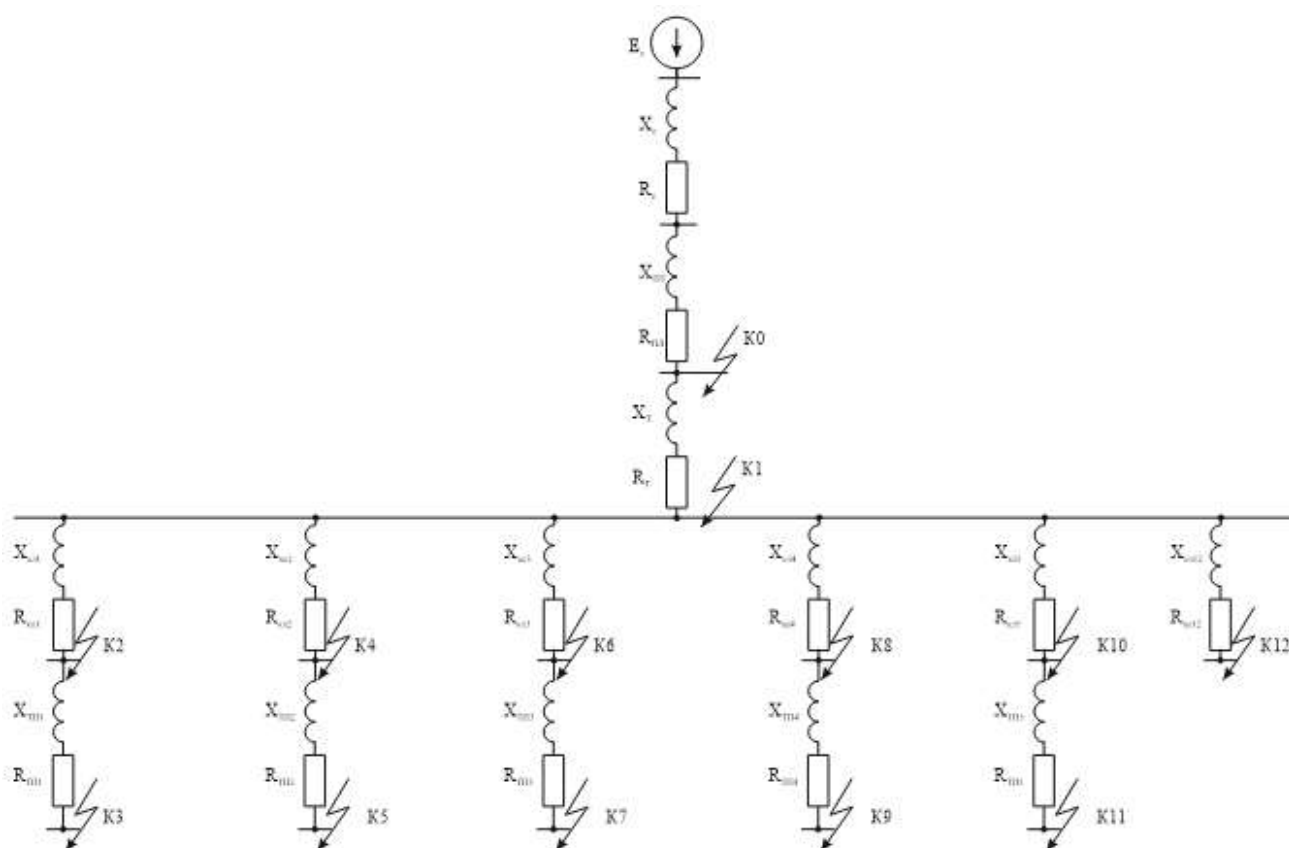


Рисунок 6.1.2 - Схема заміщення для визначення струмів к.з.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	41

Значення початкового періодичного струму трифазного КЗ у точці К₁ від зовнішнього джерела:

$$I_{K1(c)}'' = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,685} = 2,26 \text{ кА}$$

Часова стала загасання аперіодичного складника струму для вузла К₁:

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{2,552}{314 \cdot 0,834} = 0,0097 \text{ с}$$

Обчислений показник ударного коефіцієнта для вузла К₁:

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0097}} = 1,357$$

Пікове значення ударного струму трифазного замикання у точці К₁:

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2}k_{y\partial} I_{K1(c)}'' = \sqrt{2} \cdot 1,357 \cdot 2,26 = 4,34 \text{ кА}$$

Задля подальшого аналізу аварійних процесів в інших точках схеми необхідно попередньо визначити площу перерізу жил кабелів внутрішньої мережі 10 кВ. Для прикладу наведемо алгоритм вибору провідника, що з'єднує шини головного розподільного пункту (ГРП) та трансформаторну підстанцію ТП-1. Обчислення для інших ліній зв'язку виконуються ідентично, а їхні кінцеві параметри згруповано в таблиці 6.1.1.

Максимальний тривалий струм навантаження лінії:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном.}} = \frac{1433,48}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 39,41 \text{ А}$$

Оптимальна площа перерізу жили за критерієм економічно доцільної щільності струму:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} = \frac{39,41}{1,4} = 28,15 \text{ мм}^2$$

Обсяг теплового імпульсу, що виділяється під час протікання струму замикання:

$$B_k = I_{K1}''^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 2,26^2 (1,365 + 0,0097) = 7,02 \text{ кА}^2\text{с}$$

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

Мінімально допустима товщина жили провідника за умовою збереження термічної стійкості:

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{94} \sqrt{7,02 \cdot 10^3} = 28,19 \text{ мм}^2$$

Таблиця 6.1.1- Технічні параметри КЛ ел.мережі 10 кВ

№ КЛ	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом
1,2	3,610	0,206	0,079	0,744	0,285
3,4	0,316	0,890	0,095	0,281	0,030
5,6	0,169	0,890	0,095	0,150	0,016
7	0,244	0,890	0,095	0,217	0,023
8	0,535	0,890	0,095	0,476	0,051
9,10	0,329	0,890	0,095	0,293	0,031
11,12	0,012	0,620	0,090	0,007	0,001

Опираючись на знайдені величини, для прокладання обирається трижильний кабель марки ААШв-10 (3х35). Загальні параметри повного, активного та реактивного опорів до розрахункового вузла K_2 :

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 2,552 + 0,03 = 2,582 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,834 + 0,281 = 1,115 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{1,115^2 + 2,582^2} = 2,812 \text{ Ом}$$

Початковий періодичний струм трифазного замикання у точці K_2 :

$$I_{K2}'' = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,812} = 2,16 \text{ кА}$$

Часова стала для аперіодичної складової аварійного процесу в точці K_2 :

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{2,582}{314 \cdot 1,115} = 0,0074 \text{ с}$$

Розрахунковий коефіцієнт ударного струму для точки K_2 :

$$k_{y02} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0074}} = 1,259$$

Найбільший ударний струм трифазного замикання у вузлі K_2 :

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

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K2}'' = \sqrt{2} \cdot 1,259 \cdot 2,16 = 3,85 \text{ кА}$$

Параметри активного та реактивного опорів цехового силового трансформатора ТП1 (ТМ-1000/10):

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{8,6 \cdot 10,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,948 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{1000} \cdot 10 = 6,064 \text{ Ом}$$

Сумарний активний, реактивний та повний опір до точки К₃:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{\text{тр}}) \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{вн}}} \right)^2 = (2,582 + 6,064) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0125 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{\text{тр}}) \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{вн}}} \right)^2 = (1,115 + 0,948) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,003 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,003^2 + 0,0125^2} = 0,0129 \text{ Ом}$$

Надперехідний струм у вузлі К₃:

$$I_{K3}'' = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0129} = 17,9 \text{ кА}$$

Стала часу для вузла К₃:

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0125}{314 \cdot 0,003} = 0,0133 \text{ с}$$

Ударний коефіцієнт для вузла К₃:

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0133}} = 1,471$$

Ударний струм у вузлі К₃:

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,471 \cdot 17,9 = 37,24 \text{ кА}$$

Показники перехідних процесів для інших характерних точок внутрішньозаводської системи розподілу енергії визначаються аналогічно. Результати цих інженерних розрахунків наведено нижче (табл. 6.1.2).

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		44

Таблиця 6.1.2 - Результати обчислення струмів к.з.

№ т. к.з.	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	$I_k'', \text{ кА}$	$T_a, \text{ с}$	k_{y0}	$i_{y0}, \text{ кА}$
1	0,8340	2,5520	2,26	0,0097	1,357	4,34
2	1,1150	2,5820	2,16	0,0074	1,259	3,85
3	0,0030	0,0125	17,90	0,0133	1,471	37,24
4	0,9840	2,5680	2,20	0,0083	1,300	4,04
5	0,0028	0,0125	18,04	0,0142	1,494	38,12
6	1,0510	0,8570	4,47	0,0026	1,021	6,45
7	0,0029	0,0100	22,21	0,0110	1,403	44,07
8	1,5270	0,9080	3,41	0,0019	1,005	4,85
9	0,0036	0,0101	21,58	0,0089	1,325	40,44
10	1,1270	2,5830	2,15	0,0073	1,254	3,81
11	0,0030	0,0125	17,90	0,0133	1,471	37,24
12	0,8410	2,5530	2,26	0,0097	1,357	4,34

6.2. Вибір високовольтних кабелів для молокопереробного підприємства

Проведемо перевірку та підтвердження характеристик лінії електропередачі 10 кВ, яка прокладається від шин нижчої напруги ГПП до розподільного пункту ТП-1. Значення максимального тривалого струму для цієї ділянки дорівнює:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1433,48}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 39,41 \text{ кА}$$

Для монтажу обрано трижильний кабель типу ААШв-10 (3х35). Оцінювання відповідності параметрів цього провідника вимогам граничного струмового навантаження за умов звичайної експлуатації об'єкта здійснюється так:

$$I_p = 38,09 \text{ А} \leq K_n \cdot I_p = 0,9 \cdot 115 = 103,5 \text{ А}$$

Аналіз спроможності провідника витримувати робочі навантаження в період усунення наслідків аварій:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		45

$$I_{ав} = 78,82 \text{ А} \leq K_{ан} \cdot K'_n \cdot I_p = 1,34 \cdot 1 \cdot 115 = 155,3 \text{ А}$$

Значення теплового інваріанта, що впливає на струмопровідні елементи та діелектрик під час короткого замикання:

$$B_k = I_{K1}^2 (t_{p.з. \min} + T_a) = 2,26^2 \cdot (1,36 + 0,0097) = 7,02 \text{ кА}^2\text{с}$$

Гранично мала величина площі поперечного перерізу кабелю, яка гарантує необхідну стійкість до температурних перевантажень при пошкодженнях:

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{7,02} \cdot 10^3 = 28,19 \text{ кА}^2\text{с}$$

Зведені результати розрахунків та підбору інших кабельних ліній середнього класу напруги для цього об'єкта представлено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Результати параметрів розподільних кабельних ліній 10 кВ

№ КЛ	Кіл п, шт	Потуж S _р , МВА	струм I _р , А	струм I _{р.ав.} , А	Полщ F _{ек} , мм ²	B _к , кА ² с	Полщ F _{мін} , мм ²	Марка прийнятого кабеля	стру м I _{доп} , А	K _п	K _п I _{доп} , А	K _{ап}	K' _п	K _{ап} K' _п I _д оп, А
1,2	2	5098,1	140,1 6	280,3 2	100,1 1	7,02	28,19	2 х АСБ- 10(3х150)	275	0,9	247,5	1,35	1	371,25
3,4	2	1433,48	39,41	78,82	28,15	7,02	28,19	2 х ААШВ- 10(3х35)	115	0,9	103,5	1,35	1	155,25
5,6	2	1449,63	39,85	79,7	28,46	7,02	28,19	2 х ААШВ- 10(3х35)	115	0,9	103,5	1,35	1	155,25
7	1	663,85	36,5	-	26,07	7,02	28,19	1 х ААШВ- 10(3х35)	115	1	115	-	-	-
8	1	731,25	40,21	-	28,72	7,02	28,19	1 х ААШВ- 10(3х35)	115	1	115	-	-	-
9,10	2	1449,71	39,86	79,72	28,47	7,02	28,19	2 х ААШВ- 10(3х35)	115	0,9	103,5	1,35	1	155,25
11,1 2	2	750	20,62	-	14,73	7,02	28,19	2 х ААШВ- 10(3х50)	140	0,9	126	-	-	-

6.3 Вибір високовольтного електрообладнання для молокопереробного підприємства

Гранично малий інтервал часу від старту процесу замикання до безпосереднього розмикання дугогасних елементів (t_p або τ , c) є ключовою характеристикою під час оцінювання вимикальної спроможності комутаційного апарата у перехідних умовах. Ця величина фіксує часову точку, відносно якої розраховуються дійсні параметри періодичного й аперіодичного складників аварійного струму, що підлягають деіонізації в камері гасіння.

Цей показник розраховується за формулою:

$$\tau = t_{p3.min} + t_{c.6} = 1,0 + 0,042 = 1,042 \text{ c}$$

Аперіодичний складник струму КЗ для моменту розходження контактів вимикача $i_{та}$ характеризує обсяг постійного струму, який продовжує циркулювати в колі на момент розмикання дугогасних елементів:

$$i_{ат} = \sqrt{2} I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 2,26 \cdot e^{\frac{-1,042}{0,0097}} = 0 \text{ kA}^2 \text{ c}$$

Таблиця 6.3.1 - Параметри ввідного вимикача напругою 10 кВ

Параметр вимикача	Розрахунок	Умови вибору
Номінальна напруга	$10 \leq 10$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
Довготривалий номін. струм	$294,34 \leq 630$	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$
Відключаюча здатність: - симетричний струм	$2,26 \leq 20$	$I_{K1}'' \leq I_{дин.ст}$
- асиметрична складова	$0 \leq 11,31$	$i_{ат} \leq \sqrt{2} \beta_n I_{відкл.ном}$
- повний струм	$1,41 \cdot 2,26 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $3,2 \leq 39,6$	$\sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} I_{ном.відкл} (1 + \beta_n)$
Динамічна стійкість: - симетричний струм	$2,26 \leq 52$	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$
- ударний струм	$4,34 \leq 132,37$	$i_{уд} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{дин.ст.}$
Термічна стійкість	$5,37 \leq 1200$	$B_k \leq I_{тн}^2 t_{тн}$

Значення теплового імпульсу струму короткого замикання B_k відображає інтегральну температурну дію, яку здійснює струм пошкодження на провідні частини та високовольні пристрої від початку аварійної ситуації до її остаточного знеструмлення захистом:

$$B_k = I^2 (t_{c.в.} + t_{пз.мах} + T_a) = 2,26^2 \cdot (0,042 + 1,0 + 0,0097) = 5,37 \text{ кА}^2\text{с}$$

Для монтажу узгоджено вакуумний комутаційний апарат типу ВР1-10-20/1000 У1. Аналогічну марку затверджуємо для секційних та лінійних захисних вузлів. Додатково визначено параметри вимикача навантаження ВНР-10/400-10зУЗ, а також схвалено до використання запобіжники серії ПКТ104-10-160-20УЗ. Задля забезпечення внутрішніх потреб підстанції обрано два силові трансформатори ТВП марки ТМ-40/10.

6.4. Вибір трансформаторів струму та напруги для молокопереробного підприємства

З метою структурування даних щодо підбору та верифікації вимірювальних трансформаторів струму (ТС), встановлених на вхідних лініях 10 кВ, складається зведена відомість. Зважаючи на те, що ТС одночасно інтегровані в системи протиаварійної автоматики (де визначальною є стійкість до значних перевантажень при замиканнях) та вузли комерційного контролю енергії (де вимагається мінімальна похибка за штатних умов), їхнє тестування здійснюється за розширеним спектром критеріїв правил улаштування електроустановок.

Таблиця 6.4.1 - Вибір ТС на вводах 10 кВ

Параметричний показник пристрою	Розрахункове підтвердження	Умова технічної відповідності
Ном. напруга показник приср ТС	$10 \leq 10$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
Тривало допустимий номінальний струм ТС	$294,34 \leq 300$	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$
Динамічна стійкість (піковий струм) ТС	$4,34 \leq 52$	$i_{уд} \leq i_{дин} = \sqrt{2} k_{ед} I_{1ном}$
Термічна стабільність обладнання ТС	$5,37 \leq 768$	$B_k \leq I_{тер}^2 t_{тер}$
Потужність вторинного навантаження ТС	$0,35 \leq 0,4$	$Z_2 \leq Z_{ном}$

Спираючись на проведені обчислення, для інтеграції в розподільні фідерні ланцюги погоджено вимірювальні пристрої серії ТЛК-10/100 У1.

Підбір вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) для головного розподільного вузла 10 кВ (на секціях шин ГПП чи РП) належить до ключових стадій проектування. Від точності цих апаратів безпосередньо залежить правильність функціонування комплексів розрахункового контролю енергоресурсів, релейних захисних пристроїв (зокрема, від замикань на землю чи коливань рівнів напруги) та систем автоматичного відновлення живлення (АВР). Вибір ТН передбачає аналіз відповідності номінальним експлуатаційним характеристикам мережі, а також розрахунок навантаження вторинного кола для збереження необхідного класу точності. Для комплектації шаф КРП затверджено дві одиниці антирезонансних вимірювальних приладів марки НАМИ-10-66-У3.

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

7. Спеціальний розділ. Аналіз експлуатаційної надійності силового трансформаторного обладнання.

7.1. Аналіз проблематики забезпечення експлуатаційної надійності силового трансформаторного обладнання

7.1.1. Базові показники безвідмовності трансформаторів

Безвідмовність роботи трансформаторних установок (клас напруги 6–10 кВ) традиційно визначають кількістю аварійних ситуацій протягом року на кожні 515 одиниць обладнання. Сучасна експлуатаційна статистика фіксує рівень пошкоджуваності у межах 3,1%. Подібна стабільність роботи пояснюється повною відсутністю рухомих механічних вузлів та впровадженням високоефективного моніторингу фізико-хімічних параметрів рідких діелектриків.

Уточнений статистичний розподіл локалізації несправностей між елементами конструкції виглядає наступним чином: поздовжня (міжвиткова) ізоляція - 61,8%; струмопровідні відводи - 8,2%; пристрої перемикачів відгалужень - 7,3%; високовольні керамічні вводи - 7,2%; резервуари, прокладки, охолодження - 7,1%; система основної ізоляції - 6,8%; активна сталь (магнітопровід) - 1,9%.

Як свідчать дані, найуразливішим компонентом об'єктивно виступає ізоляційна система. Її деградацію та пробої найчастіше провокують зовнішні перенапруги, постійні експлуатаційні вібрації, електродинамічні зміщення незапресованих котушок та приховані виробничі дефекти (залишки стружки, задирки). Визначальний вплив на ресурс має стан трансформаторного масла: перегрів, інтенсивне шламоутворення та погіршення конвекції різко знижують діелектричну міцність.

Пошкодження активної сталі (ослаблені стяжні шпильки, забиті канали охолодження) сприяють формуванню короткозамкнених контурів, провокуючи локальне вигорання металу («пожежу сталі»). Фарфорові ізолятори переважно руйнуються від термічних чи механічних ударів, а поверхневе забруднення викликає перекриття. Дефекти контактної групи перемикачів супроводжуються їхнім окисленням та локальним нагрівом. Крім того, розгерметизація бака і

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

критичний витік масла створюють реальний ризик вибухонебезпечних дугових процесів, тоді як втрата контуру заземлення генерує смертельно небезпечний потенціал на зовнішньому корпусі.

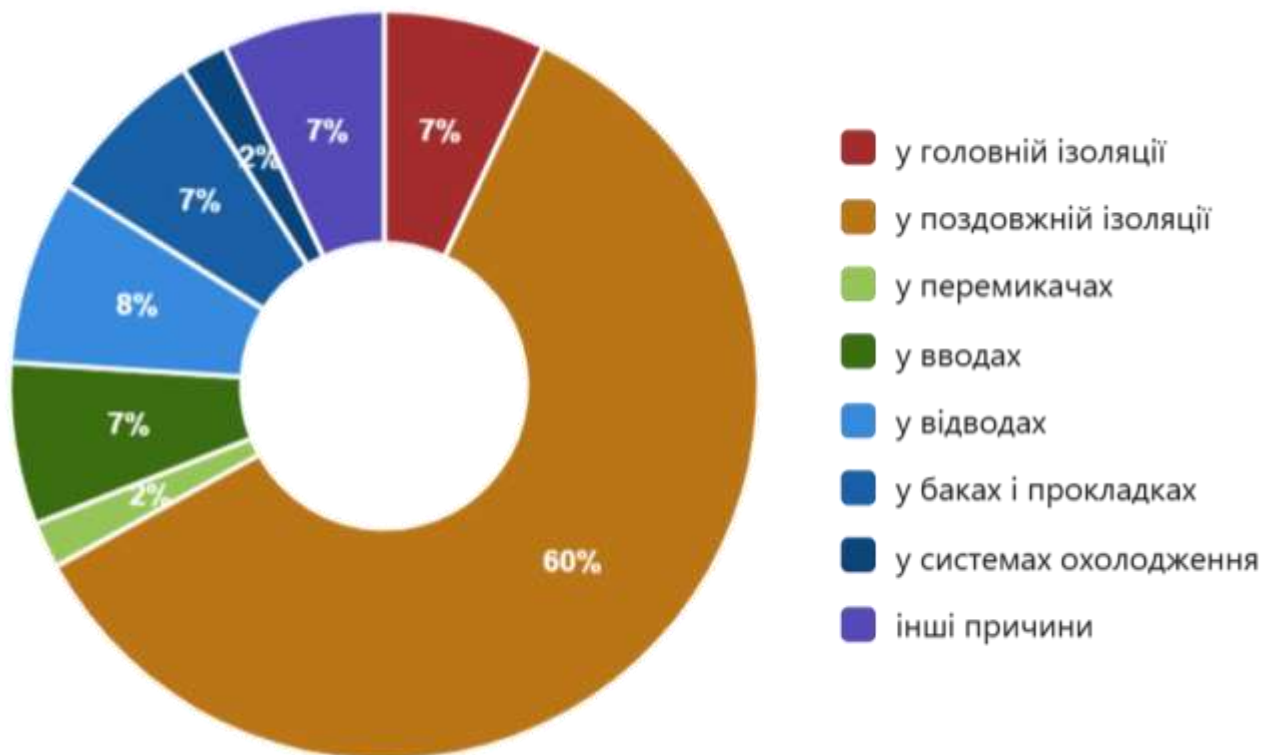


Рисунок 7.1.1 - Структура причин пошкодження силових трансформаторів.

7.1.2 Експлуатаційна стійкість енергетичного обладнання

Безвідмовність функціонування силових електроапаратів безпосередньо лімітується якістю діелектричного покриття обмоток, яке постійно зазнає жорсткого зовнішнього впливу. Ключовими дестабілізуючими факторами виступають агресивні температурні градієнти довкілля (від $+52^{\circ}\text{C}$ влітку до -28°C взимку) та інтенсивна сонячна радіація.

Особливу небезпеку становлять струмові перевантаження, спровоковані короткими замиканнями (КЗ) або пусками потужних електродвигунів. Через сезонну нерівномірність споживання та значну довжину ліній 0,38 кВ, напруга в мережі коливається від $0,81 U_n$ до $1,18 U_n$ (зі зниженням до $0,63 U_n$ під час пусків). Частими є неповнофазні режими, викликані перегоранням запобіжників, обривами повітряних ліній чи окисненням алюмінієвих контактів (особливо в агресивному середовищі агропідприємств) [7].

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

Деградація діелектрика переважно має термічну природу. Під дією нагріву матеріали втрачають еластичність, випаровують леткі фракції та стають крихкими. Це ініціює механічне руйнування та появу мікротріщин, де розвиваються іонізаційні процеси, що неминуче завершуються електричним пробоем [7].

7.1.3 Специфіка робочих режимів трансформаторних установок

Нормативна база (ПУЕ) класифікує аварійні ситуації на: багатофазні/однофазні та виткові замикання, внутрішні надструми від зовнішніх КЗ, падіння рівня охолоджувача та його критичний перегрів.

Окрему групу ризику формують особливі режими (зовнішні КЗ, системні хитання, несиметричні перевантаження), які супроводжуються надструмами, нижчими за поріг спрацювання миттєвих захистів, але здатними викликати прискорене теплове старіння ізоляції. Для нівелювання цих загроз застосовують релейний захист із часовою затримкою.

Трансформаторне обладнання здатне витримувати тимчасові перевантаження без втрати ресурсу. Допустима тривалість таких режимів (наприклад, при спрацюванні АВР) обернено пропорційна їхній кратності. На об'єктах без постійного персоналу ліквідація перевантажень забезпечується автоматичним відключенням другорядних ліній.

7.1.4 Алгоритм деградації діелектричних систем

Базуючись на дослідженнях [7], механізм пошкодження трансформаторів визначається переважно не початковими технологічними вадами, а природним фізико-хімічним старінням під дією експлуатаційних стресів. Блок-схему етапів руйнування ізоляції наведено на рис. 7.1.2.

Первинним тригером виступає термічне зношення обмоток через перевантаження та надструми. Процес прискорюється наявністю вологи та продуктів розпаду масла, що критично зменшує механічну міцність паперу. Послаблена ізоляція швидко руйнується під впливом постійних вібрацій та ударних

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

електродинамічних зусиль при зовнішніх КЗ. Це провокує локальні виткові замикання, які стрімко масштабуються у руйнівні міжфазні дугові пробої.

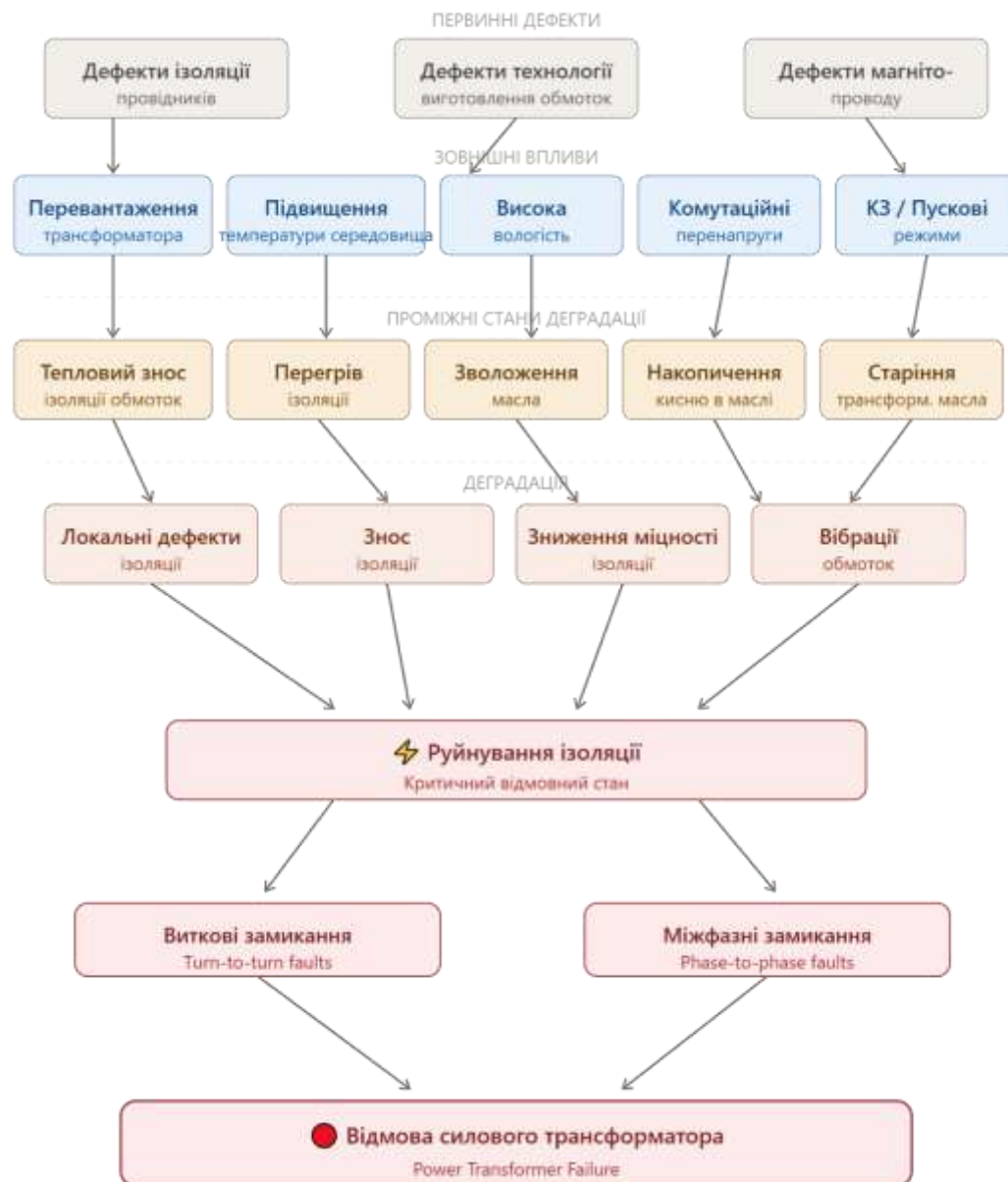


Рисунок 7.1.2 - Блок-схема розвитку пошкоджень ізоляції силових трансформаторів

7.2 Дослідження зношення ізоляції силових трансформаторів в експлуатаційних умовах

7.2.1 Особливості електропровідності твердих діелектриків

У твердих електроізоляційних матеріалах за нормальних умов наскрізний струм формується переважно міграцією іонів. Енергія, яка розсіюється в

діелектрику під впливом електричного поля, називається діелектричними втратами.

У постійному полі ці втрати залежать лише від струму наскрізної провідності. У змінному полі ситуація ускладнюється: до наскрізного струму додається активна складова струму абсорбції.

Згідно з векторною діаграмою, загальний струм через діелектрик формується зі струмів поляризації, наскрізної провідності та абсорбції. Сумарні втрати обумовлені активними компонентами наскрізного та абсорбційного струмів. Через це кут зсуву фаз між струмом і напругою стає меншим за 90° на величину кута δ (кута діелектричних втрат).

Тангенс цього кута ($\operatorname{tg} \delta$), виражений у відсотках, є ключовим індикатором якості ізоляції: що він більший, то інтенсивніше розсіюється енергія і гірший стан матеріалу.

Надійність трансформаторів критично залежить від стану ізоляції, яка працює під впливом електромагнітних полів, нагріву та вібрацій. Незворотна деградація діелектриків у часі називається старінням.

Головні причини старіння:

- вплив робочої напруги та перенапруг;
- іонізація, що стимулює окислення;
- забруднення та зволоження (підвищує провідність);
- перегріву та температурні стрибки;
- механічні впливи (вібрації, удари).

Нагрів є основним фактором зношення. Джерелами тепла виступають струмовідні частини, самі діелектричні втрати та температура довкілля. Діелектрики класифікують за нагрівостійкістю. За правилом МЕК, перевищення температури на кожні $6,3^\circ\text{C}$ скорочує ресурс ізоляції вдвічі. Наприклад, ізоляція класу А при 96°C служить близько 15 років, а при 145°C зруйнується за кілька днів.

Волога також катастрофічно впливає на ізоляцію:

1. Зменшує поверхневий опір.
2. Знижує питомий опір товщі матеріалу та збільшує втрати.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						54

3. Утворює струмопровідні сполуки з деякими смолами.
4. Збільшує ємність через високу діелектричну проникність (поглинання лише 1,05% води збільшує провідність паперу майже в тисячу разів).

Для захисту від вологи застосовують герметизацію, вологопоглиначі, монолітну синтетичну ізоляцію та термостатування.

7.2.2 Закономірності процесу термічної деградації трансформаторної ізоляції

Руйнування діелектричних конструкцій провокується нагріванням, механічними навантаженнями (вібраціями, тиском), а також впливом вологи та агресивних реагентів. Незворотна зміна хімічної структури під дією цих факторів класифікується як старіння, а безпосереднє погіршення електрофізичних властивостей - як зношення. Термічне старіння виступає ключовим критерієм, що визначає загальний ресурс електричних машин, тому аналіз швидкості температурної деградації є критично важливим [14].

Перші експериментальні дослідження ізоляції класу А дозволили сформулювати емпіричне правило «8 градусів»: збільшення робочої температури на кожні 8°C зменшує життєвий цикл діелектрика вдвічі. Математично ця залежність має вигляд:

$$D = D_0 \cdot 2^{-\frac{\Theta}{8}}$$

де D_0 - базовий термін служби за температури 0°C, год;

Θ - фактична температура матеріалу, °C.

Незважаючи на простоту, це правило застосовується лише для вузьких температурних діапазонів через свою наближеність та емпіричний характер. Більш фундаментальний підхід базується на законах хімічної кінетики. Залежність швидкості реакцій від температури описується рівнянням Вант-Гоффа - Арреніуса:

$$\ln K = \frac{B}{\theta} + A,$$

де K - константа швидкості хімічної реакції; Θ_a - абсолютна температура, К;
 B - температурний критерій ізоляції, К; A - постійний коефіцієнт.

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



Рисунок 7.2.1 - Вплив підвищеної температури на ізоляцію

Доведено, що процеси окислення в діелектриках є мономолекулярними реакціями, кінетика яких підпорядковується рівнянню:

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot C$$

де C - поточна концентрація незруйнованих молекул у момент часу t .

Після інтегрування отримуємо:

$$t = \frac{1}{K} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)$$

де C_0 - початкова концентрація стабільних молекул.

Фізичний зміст коефіцієнтів A та B визначається термодинамічними параметрами:

$$A = Z \cdot P = Z \cdot e^{\frac{\Delta S}{R}}$$

$$B = \frac{E_a}{R}$$

$$K = Z \cdot e^{\frac{\Delta S}{R}} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot \Theta_a}}$$

де Z - частота зіткнень молекул;

P - імовірнісний фактор просторової орієнтації;

ΔS - ентропія активації;

R - універсальна газова стала ($R = 8,314$ Дж/(моль · К));

E_a - енергія активації (мінімальний бар'єр для початку взаємодії).

Об'єднуючи вирази, отримуємо класичну формулу Вант-Гоффа - Арреніуса:

$$t = \frac{1}{Z} \cdot e^{-\frac{\Delta S}{R}} \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot \Theta_a}}$$

Значення параметра B для базових класів ізоляції (визначені дослідно).

Об'єднуючи кінетичні рівняння та позначаючи ресурс ізоляції як D , маємо:

$$D = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}$$

де

$$G = \frac{1}{Z} \cdot e^{-\frac{\Delta S}{R}} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)$$

За відомого базового терміну D_H при номінальній температурі $\Theta_{\text{ном}}$, фактичний ресурс D за температури Θ_a обчислюється як:

$$D = D_H \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{\Theta_a} - \frac{1}{\Theta_{\text{ном}}}\right)}$$

Інтенсивність термічного зношення (у базових годинах за одну астрономічну годину) визначається відношенням:

$$L = \frac{D_H}{D}$$

Звідси формула швидкості теплового зношення набуває вигляду:

$$L = e^{B \cdot \left(\frac{1}{\Theta_{\text{ном}}} - \frac{1}{\Theta_a}\right)}$$

7.2.3 Вплив вологості та хімічно агресивних речовин на деградацію діелектрика

Суттєвим каталізатором старіння є контакт із вологою та хімічно активними сполуками. Якщо за критерій агресивності середовища взяти відносну

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

концентрацію реагенту C , то комплексну швидкість зношення (з урахуванням нагріву та електродинамічних сил) можна виразити доповненим рівнянням [7]:

$$L_c = e^{B \cdot \left(\frac{1}{\Theta_{\text{ном}}} - \frac{1}{\Theta_a} \right)} + \chi \cdot k^2 + m \cdot C$$

де χ - коефіцієнт впливу середовища та вологості;

k - коефіцієнт струмового навантаження;

m - емпірична константа;

C - відносна концентрація агресивного агента.

Використовуючи відносну вологість η як додатковий критерій, загальну швидкість деградації ізоляції від синергетичної дії температури, струмових зусиль, хімії та вологості записують як:

$$L_{c\eta} = e^{B \cdot \left(\frac{1}{\Theta_{\text{ном}}} - \frac{1}{\Theta_a} \right)} + \chi \cdot k^2 + m \cdot C + n \cdot$$

де n - константа вологості;

η - відносна вологість довкілля.

Точні значення констант m та n встановлюються виключно шляхом лабораторних досліджень конкретних матеріалів.

7.2.4 Дослідження теплових перехідних процесів у силовому трансформаторі (модель трьох тіл)

Аналіз режимів експлуатації доводить, що домінуючим фактором зношення ізоляції є її теплове старіння. Тому точний математичний опис перехідних температурних процесів є вкрай актуальним завданням.

Для розрахунку нагріву трансформатор з високою точністю можна представити як термодинамічну систему з трьох взаємопов'язаних тіл: обмотки (тіло 1), магнітопровода (тіло 2) та ізоляційного масла (тіло 3).

Елементи системи мають власні теплоємності (C_1, C_2, C_3) та з'єднані тепловими провідностями ($\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}$). Масло (тіло 3) віддає тепло в довкілля через провідність Λ_3 . Вважаємо, що тепловіддача в середовище з нескінченною теплоємністю є стабільною, а внутрішні втрати генеруються лише в обмотках (P_1) та сталі (P_2).

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		58

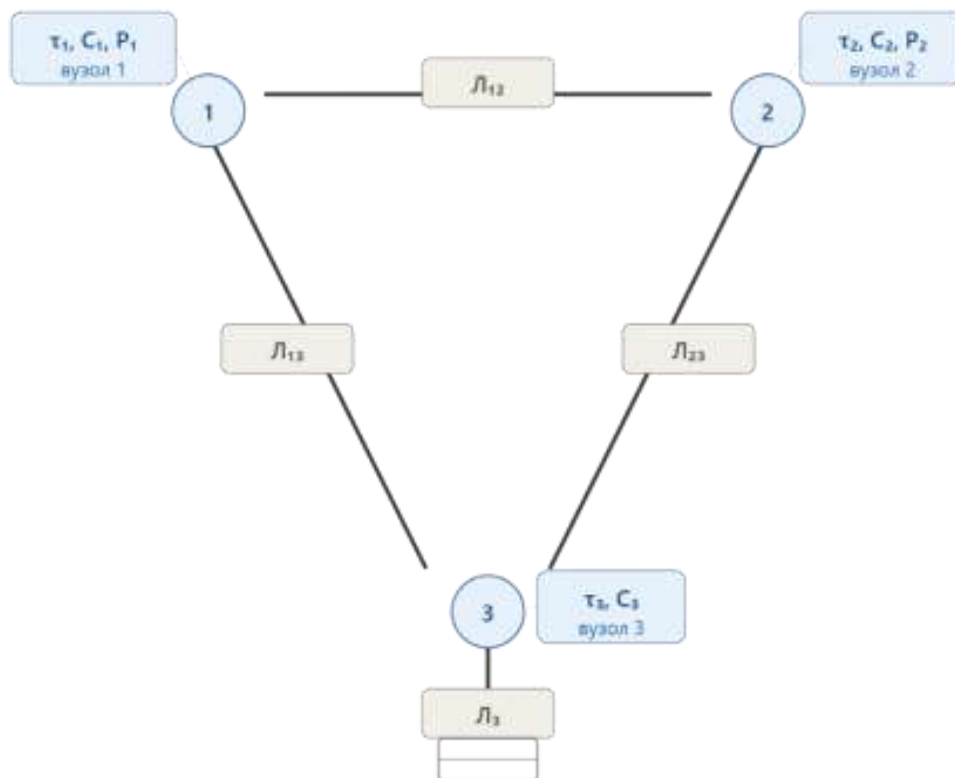


Рисунок 7.2.2 - Теплова схема заміщення трансформатора)

Диференціальні рівняння теплового балансу для цієї системи мають вигляд:

$$C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) + \Lambda_{13}(\tau_1 - \tau_3) = P_{10}(1 + \alpha\tau_1)$$

$$C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \Lambda_{12}(\tau_2 - \tau_1) + \Lambda_{23}(\tau_2 - \tau_3) = P_2$$

$$C_3 \frac{d\tau_3}{dt} + \Lambda_{13}(\tau_3 - \tau_1) + \Lambda_{23}(\tau_3 - \tau_2) + \Lambda_3\tau_3 = 0$$

де $\tau_{1,2,3}$ - перевищення температури відповідних тіл над довкіллям, °С;

α - температурний коефіцієнт опору провідників;

P_{10} - активні втрати в первинній обмотці за температури довкілля.

Використовуючи операторний метод Лапласа та розв'язуючи систему рівнянь, отримуємо загальний вираз для сталого перевищення температури обмотки при $t = \infty$:

$$\tau_{1y} = \frac{A_0 \cdot \Lambda_{23} + A_0 \cdot \Lambda_3 + P_2 \cdot \Lambda_3 + P_2 \cdot \Lambda_{13}}{r_1}$$

Вводячи поняття сталого перевищення температури обмотки в ідеалізованому досліді короткого замикання ($\tau_{1к}$ при $P_2 = 0$ та $I = I_n$), формулу

можна спростити. Для номінального режиму ($I = I_n$, $\tau_{1y} = \tau_{1n}$) залежність має вигляд:

$$\tau_{1y} = \tau_{1k} \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_{1k}} \cdot \frac{P_2 \cdot \Lambda_3 + P_2 \cdot \Lambda_{13}}{r} \right)$$

При зміні струмового навантаження ($I = k \cdot I_n$), стале перевищення температури обмотки трансформатора залежить від кратності струму (k), співвідношення втрат (a) та теплових параметрів:

$$\tau_{1y} = \frac{\tau_{1n}}{1 - \alpha \cdot \tau_{1n}} \cdot \frac{k^2 + a}{1 + a}$$

де a - відношення номінальних втрат у сталі до номінальних втрат у міді ($\Delta P_{с.н}/\Delta P_{м.н}$).

Отже, температурний режим обмотки, подібно до електродвигунів, визначається рівнем завантаження апарата та конструктивним балансом його активних втрат. Значення теплових провідностей (Λ) між компонентами розраховуються на основі даних стандартних дослідів холостого ходу та короткого замикання.

7.3 Аналітичне дослідження експлуатаційних режимів силових трансформаторів

7.3.1 Фізична сутність електромагнітних та теплових процесів

Під час роботи силового трансформатора в його первинних обмотках виникає комплекс взаємопов'язаних фізичних явищ. Протікання змінного електричного струму супроводжується генеруванням магнітного поля (електромагнетизм) та виділенням джоулевого тепла. Одночасно виникають процеси самоіндукції та електродинамічні зусилля, що діють на провідники.

У вторинних обмотках ключовим є явище взаємоіндукції, яке наводить електрорушійну силу. При підключенні навантаження там також виникають електричний струм, вторинне магнітне поле та процеси виділення теплової енергії. Сумарним результатом цих явищ в обох обмотках стає їхній інтенсивний нагрів.

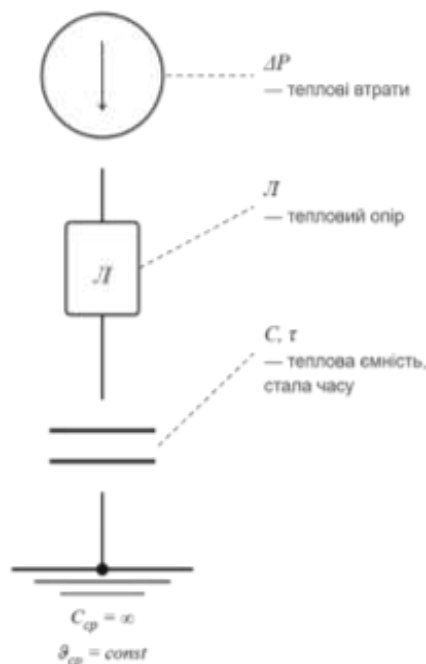
						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		60

Активна сталь (магнітопровід) також зазнає складного фізичного впливу. Змінний магнітний потік наводить у сталевих листах паразитні вихрові струми (струми Фуко), які спричиняють додаткове нагрівання. Крім того, безперервний процес перемагнічування осердя супроводжується втратами на гістерезис, енергія якого також повністю перетворюється на тепло.

Отже, функціонування силового трансформатора неминуче супроводжується активними енергетичними втратами в міді обмоток та сталі магнітопроводу, що в комплексі ініціює загальний процес нагрівання апарата.

7.3.2 Аналітичне дослідження температурних режимів силового трансформатора як еквівалентного однорідного тіла в умовах симетричних перевантажень

Дослідимо динаміку тепловиділення в трансформаторі під час його перевантаження з метою побудови перевантажувальної характеристики - функціональної залежності допустимої тривалості роботи від кратності перевищення номінального струму [7].



Для виведення базового рівняння нагрівання припустимо, що трансформатор є ідеальним термодинамічним ізотропним тілом. Відповідна розрахункова тепла схема заміщення представлена на рис. 7.3.1.

Рисунок 7.3.1. Теплова схема заміщення силового трансформатора

Введемо базові параметри системи: C - еквівалентна теплоємність апарата, Дж/°C; τ - поточне перевищення температури об'єкта відносно довкілля, °C; P - сумарні втрати активної потужності, Вт; Λ - інтегральний коефіцієнт тепловіддачі в середовище, Вт/°C; θ_0 та C_0 - відповідно температура та теплоємність довкілля (приймаємо $C_0 = \infty$).

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

Теплова енергія, що генерується всередині активних частин, розподіляється на два потоки: акумулюється в масі трансформатора (підвищуючи його температуру) та дисипує у навколишній простір. Чим сильніше нагрітий апарат, тим інтенсивнішою стає тепловіддача. Стан термодинамічної рівноваги, коли вся згенерована потужність розсіюється назовні без подальшого зростання температури тіла, називають усталеним тепловим режимом.

Кількість теплоти, витраченої на внутрішній нагрів:

$$dQ_1 = C \cdot d\tau$$

Енергія, віддана в середовище:

$$dQ_2 = \Lambda \cdot \tau \cdot dt$$

Загальна виділена енергія за нескінченно малий проміжок часу dt :

$$dQ = P \cdot dt$$

Згідно із законом збереження енергії формуємо диференціальне рівняння теплового балансу:

$$P \cdot dt = C \cdot d\tau + \Lambda \cdot \tau \cdot dt$$

Розділивши змінні, отримуємо:

$$dt = \frac{C \cdot d\tau}{P - \Lambda \cdot \tau}$$

Для спрощення розв'язку введемо два фундаментальні параметри:

Постійна часу нагрівання (характеризує теплову інерцію системи):

$$T = \frac{C}{\Lambda}$$

Усталене перевищення температури (максимальне значення для заданих втрат):

$$\tau_y = \frac{P}{\Lambda}$$

Після підстановки рівняння трансформується:

$$dt = T \cdot \frac{d\tau}{\tau_y - \tau}$$

Інтегруючи даний вираз за умови початкового нагріву $\tau_{\text{поч}}$, отримуємо класичний експоненціальний закон:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		62

$$\tau = \tau_y - (\tau_y - \tau_{\text{поч}}) \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Динаміку нагрівання при стрибкоподібному навантаженні ілюструють графіки. Аналіз рівняння доводить:

- В початковий момент ($t = 0$), оскільки $e^0 = 1$, температура дорівнює початковій ($\tau = \tau_{\text{поч}}$).
- У нескінченності ($t \rightarrow \infty$), оскільки $e^{-\infty} = 0$, температура досягає максимуму ($\tau = \tau_y$).

Ступінь струмового перевантаження характеризується кратністю:

$$k_{\text{пер}} = \frac{I}{I_{\text{н}}}$$

де I - фактичний струм режиму; $I_{\text{н}}$ - номінальний струм.

Сімейство експоненційних кривих нагрівання для різних кратностей перевантаження (за умови $\tau_{\text{поч}} = \tau_{\text{ном}}$) продемонстровано на інтерактивному віджеті нижче.

7.3.3 Аналітичне моделювання перевантажувальної здатності трансформатора на основі теплових обмежень ізоляції

Фіксуючи гранично допустимий тепловий стан апарата $\tau_{\text{доп}}$, можна чітко простежити таку закономірність: що вища кратність струму k , то швидше ізоляція нагрівається до критичної межі. Цей обернено пропорційний зв'язок формує перевантажувальну характеристику електрообладнання (рис. 7.3.2).

Для математичного опису цієї залежності використаємо базове рівняння нагрівання. Підставивши граничні умови ($t = t_{\text{доп}}$, $\tau = \tau_{\text{доп}}$) та провівши логарифмування, отримуємо формулу безпечного часу експлуатації:

$$t_{\text{доп}} = T \cdot \ln \left(\frac{\tau_y - \tau_{\text{поч}}}{\tau_y - \tau_{\text{доп}}} \right)$$

Щоб обчислити усталене перевищення температури τ_y для будь-якого режиму, проаналізуємо баланс потужностей. У номінальному режимі сумарні втрати складаються зі сталих магнітних ($\Delta P_{\text{хх}}$) та змінних електричних ($\Delta P_{\text{кз}}$) втрат.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		63

При струмових перевантаженнях магнітні втрати залишаються незмінними, а електричні зростають пропорційно квадрату кратності струму:

$$\Sigma P = \Delta P_{xx} + k^2 \cdot \Delta P_{кз}$$

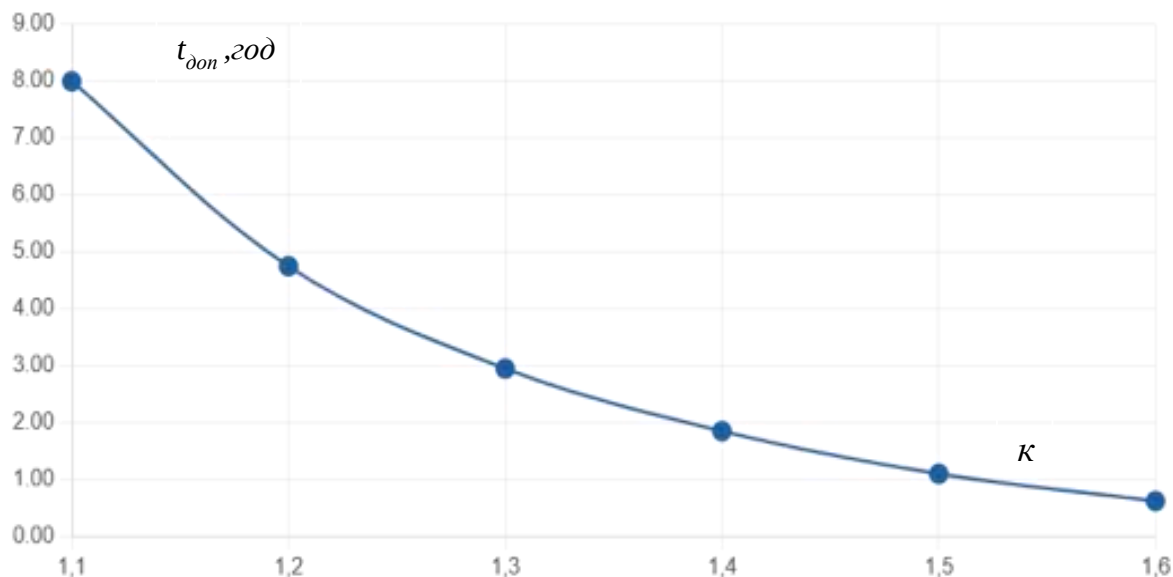


Рисунок 7.3.2 - Перевантажувальна характеристика: залежність допустимого часу роботи від кратності струму

Коефіцієнт тепловіддачі Λ визначається з умов номінального режиму. Для трансформаторної ізоляції (клас А) приймаємо уточнене розрахункове перевищення температури $\tau_{ном}^* = 67^\circ C$ (збільшено на 3,1% для компенсації найгарячіших точок). Тоді:

$$\Lambda = \frac{\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз}}{\tau_{ном}^*}$$

Підставивши вирази втрат та тепловіддачі у формулу усталеної температури ($\tau_y = \Sigma P / \Lambda$), отримуємо універсальну залежність:

$$\tau_y = \tau_{ном}^* \cdot \frac{a + k^2}{a + 1}$$

де a - коефіцієнт втрат трансформатора (відношення $\Delta P_{xx} / \Delta P_{кз}$).

Постійна часу нагрівання T виражає теплову інерційність апарата і розраховується як частка від ділення теплової енергії, накопиченої масою трансформатора за номінального нагріву, на відповідну потужність втрат:

$$T = \frac{C \cdot \tau_{ном}^*}{\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз}}$$

7.3.4 Оцінка впливу конфігурації добового графіка навантажень на інтенсивність деградації ізоляції

Проаналізуємо швидкість термічного старіння ізоляції трансформатора у квазіусталеному режимі протягом доби. Дослідження проведемо для постійної (максимальної літньої) температури довкілля $\Theta_{\text{ср}} = 40^\circ\text{C}$, розглядаючи три різні сценарії струмових навантажень.

Алгоритм розрахунку для кожного годинного інтервалу ($t_i = 1$ год) базується на визначенні усталеного перевищення температури τ_{iy} , фактичного нагріву τ_i та інтегральної швидкості зношення ε_i .

Для зведення балансу розрахунків починається з визначення граничних температур на початку ($t = 0$) та в кінці доби ($t = 24$). З огляду на циклічність процесу, ці температури мають збігатися:

$$\tau_0 = \tau_{24} = \frac{\tau_{24y} + \sum_{i=1}^{n-1} \tau_{iy} \cdot \left(e^{\frac{t_i}{T}} - e^{\frac{t_{i-1}}{T}} \right)}{e^{\frac{t_n}{T}}}$$

Температура наприкінці кожної i -тої ділянки обчислюється за рекурентною формулою:

$$\tau_i = \tau_{iy} - (\tau_{iy} - \tau_{i-1}) \cdot e^{-\frac{t_i}{T}}$$

Поточна інтенсивність теплового зношення (базових годин за астрономічну годину) визначається як:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\Theta_{\text{ср}} + \tau_i} \right)}$$

де $B = 9500 \text{ K}$; $\Theta_n = 378 \text{ K}$; $\varepsilon_n = 1 \text{ б.год/год}$.

Загальне добове зношення розраховується як сума годинних показників:
 $D_{\text{доб}} = \sum \varepsilon_i$.

- *Сценарій №1 (Базовий)*: Навантаження змінюється від $k = 0,45$ вночі до $k = 1,0$ у пікові години.
- *Сценарій №2 (+10%)*: Струми рівномірно збільшені, піки досягають $k = 1,1$.
- *Сценарій №3 (+20%)*: Максимуми сягають $k = 1,2$, що провокує значні термічні перевантаження.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	65

Результати розрахунку динаміки температур та швидкості зношення зведено в таблиці 7.3.1 – 7.3.3.

Таблиця 7.3.1 - Графік навантаження та швидкості теплового зношення (Сценарій №1)

$t_i, \text{год}$	k_i	$\tau_{iy}, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_i, \frac{\text{б.год}}{\text{год}}$	$t_i, \text{год}$	k_i	$\tau_{iy}, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_i, \frac{\text{б.год}}{\text{год}}$
0	0,45	26,7	32,9	0,09	13	0,9	57,6	54,4	0,44
1	0,45	26,7	31,1	0,08	14	0,9	57,6	55,3	0,47
2	0,45	26,7	29,9	0,07	15	1	67,2	58,7	0,59
3	0,45	26,7	29	0,07	16	1	67,2	61,1	0,69
4	0,45	26,7	28,4	0,06	17	0,9	57,6	60,1	0,65
5	0,5	29,1	28,6	0,07	18	0,8	48,9	56,9	0,53
6	0,5	29,1	28,8	0,07	19	0,6	34,7	50,6	0,34
7	0,8	48,9	34,5	0,1	20	0,6	34,7	46,1	0,25
8	0,9	57,6	41	0,17	21	0,5	29,1	41,3	0,17
9	1	67,2	48,4	0,29	22	0,5	29,1	37,9	0,13
10	1	67,2	53,7	0,42	23	0,5	29,1	35,4	0,11
11	0,9	57,6	54,8	0,46	24	0,45	26,7	32,9	0,09
12	0,8	48,9	53,1	0,41					

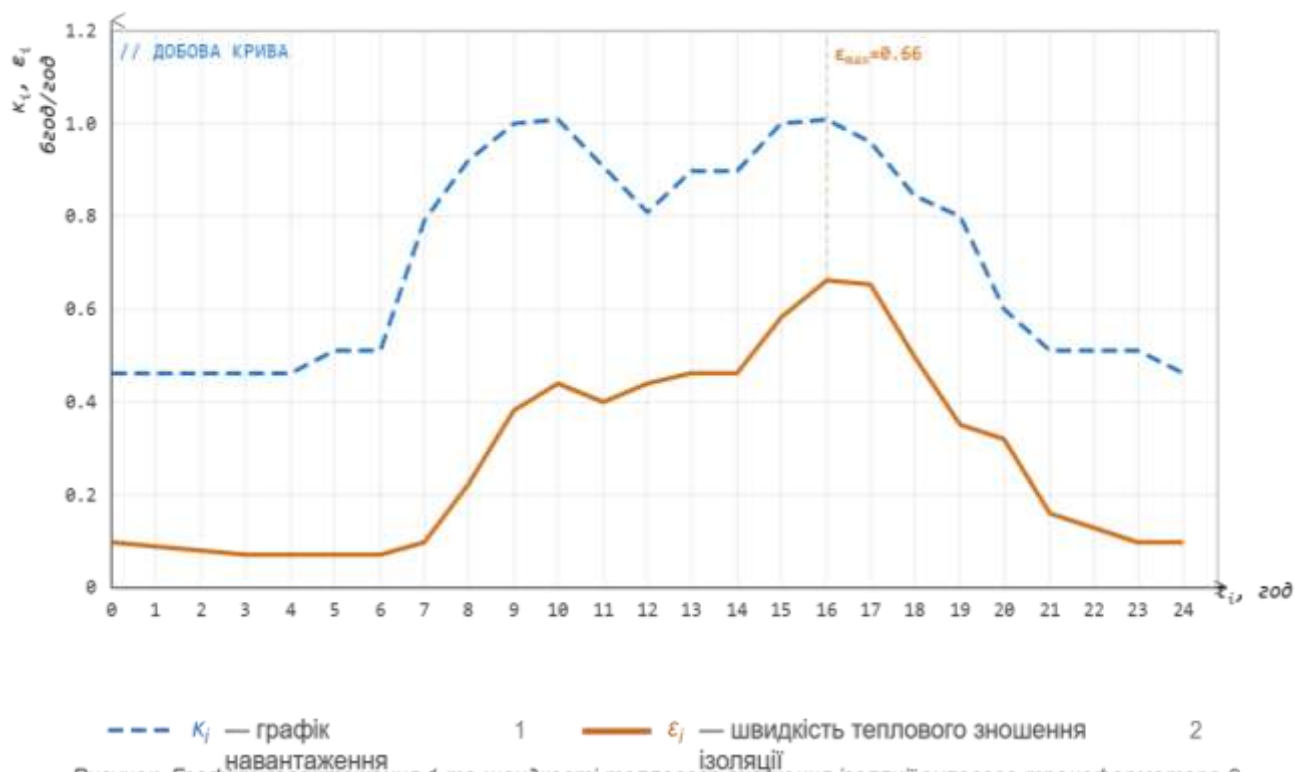


Рисунок 7.3.3 - Графіки навантаження 1 та швидкості теплового зношення ізоляції силового трансформатора 2 (Сценарій №1)

Таблиця 7.3.2 - Графік навантаження та швидкості теплового зношення (Сценарій №1)

t_i , год	k_i	τ_{iy} , °C	τ_i , °C	ε_i , б.год/год	t_i , год	k_i	τ_{iy} , °C	τ_i , °C	ε_i , б.год/год
0	0,55	31,8	39	0,15	13	1	67,2	63,6	0,82
1	0,55	31,8	37	0,13	14	1	67,2	64,6	0,87
2	0,55	31,8	35,5	0,11	15	1,1	77,9	68,4	1,11
3	0,55	31,8	34,5	0,1	16	1,1	77,9	71,1	1,32
4	0,55	31,8	33,7	0,1	17	1	67,2	70	1,23
5	0,6	34,7	34	0,1	18	0,9	57,6	66,5	0,98
6	0,6	34,7	34,2	0,1	19	0,7	41,3	59,3	0,62
7	0,9	57,6	40,8	0,17	20	0,7	41,3	54,2	0,44
8	1	67,2	48,3	0,29	21	0,6	34,7	48,7	0,3
9	1,1	77,9	56,7	0,52	22	0,6	34,7	44,7	0,22
10	1,1	77,9	62,7	0,77	23	0,6	34,7	41,9	0,18
11	1	67,2	64	0,84	24	0,55	31,8	39	0,15
12	0,9	57,6	62,2	0,74					

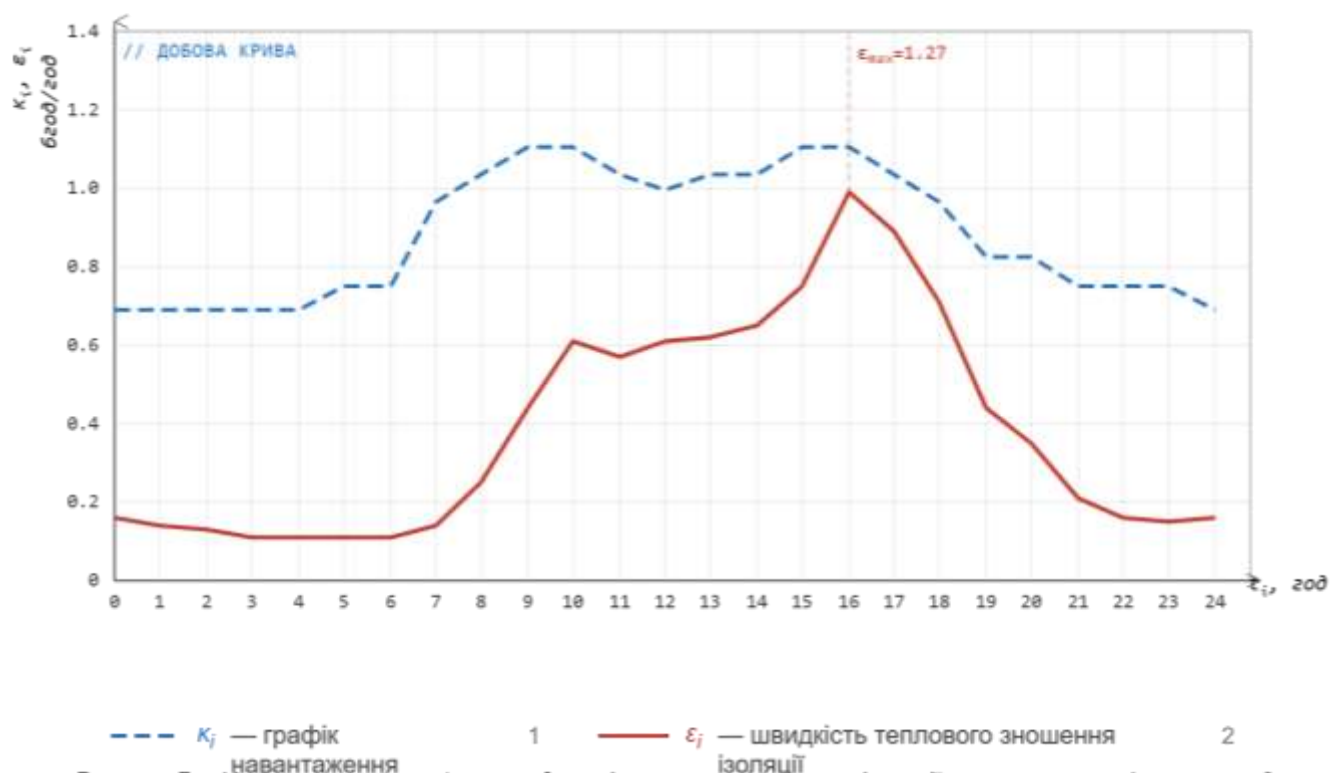


Рисунок 7.3.4 - Графіки навантаження 1 та швидкості теплового зношення ізоляції силового трансформатора 2 Сценарій №2

Таблиця 7.3.3 - Графік навантаження та швидкості теплового зношення (Сценарій №3)

$t_i, \text{год}$	k_i	$\tau_{iy}, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_i, \text{б.год/год}$	$t_i, \text{год}$	k_i	$\tau_{iy}, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_i, \text{б.год/год}$
0	0,65	37,9	46,2	0,25	13	1,1	77,9	73,8	1,57
1	0,65	37,9	43,8	0,21	14	1,1	77,9	74,9	1,68
2	0,65	37,9	42,1	0,19	15	1,2	89,6	79,1	2,17
3	0,65	37,9	40,9	0,17	16	1,2	89,6	82,1	2,59
4	0,65	37,9	40,1	0,16	17	1,1	77,9	80,9	2,41
5	0,7	41,3	40,4	0,16	18	1	67,2	77	1,91
6	0,7	41,3	40,7	0,17	19	0,8	48,9	69	1,16
7	1	67,2	48,2	0,29	20	0,8	48,9	63,3	0,8
8	1,1	77,9	56,6	0,51	21	0,7	41,3	57,1	0,53
9	1,2	89,6	65,9	0,95	22	0,7	41,3	52,6	0,39
10	1,2	89,6	72,6	1,46	23	0,7	41,3	49,4	0,31
11	1,1	77,9	74,1	1,6	24	0,65	37,9	46,2	0,25
12	1	67,2	72,2	1,42					

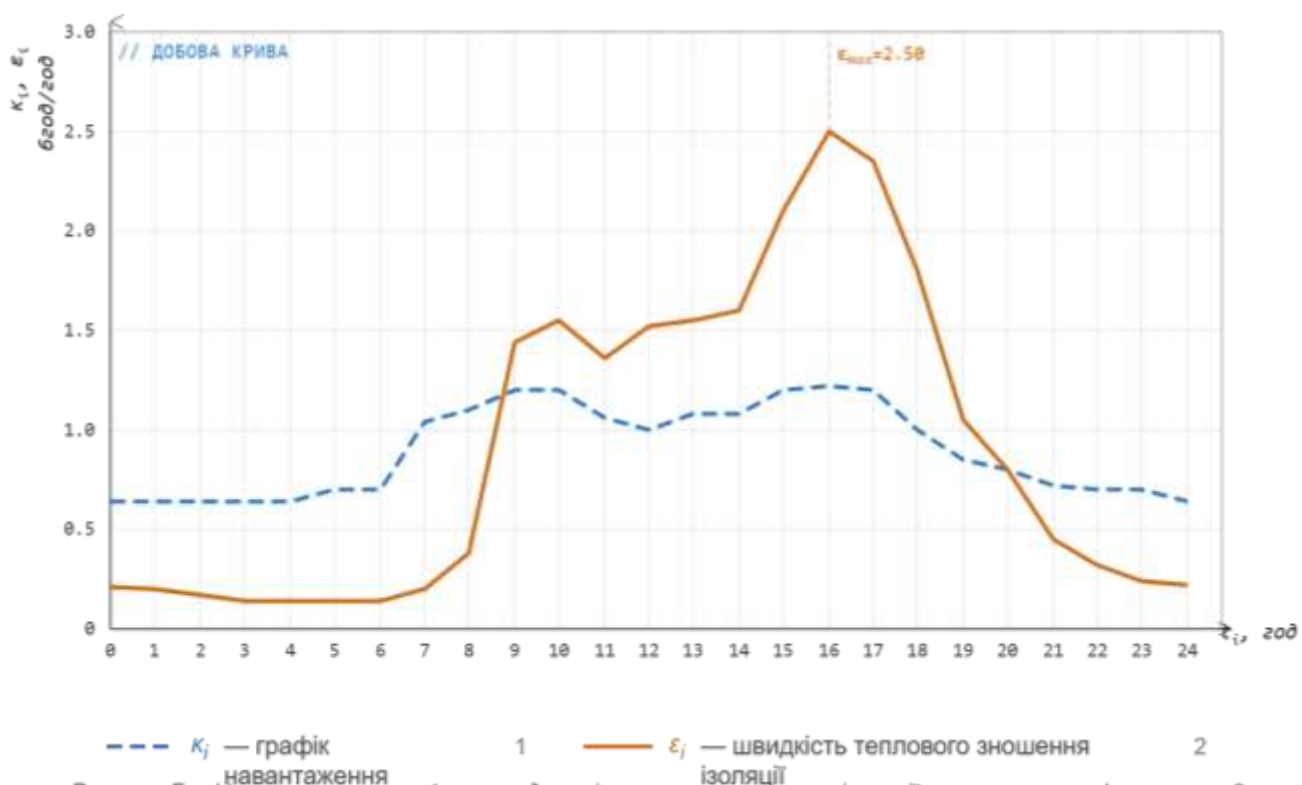


Рисунок 7.3.5 - Графіки навантаження 1 та швидкості теплового зношення ізоляції силового трансформатора 2 Сценарій №3

Зіставляючи інтегральні результати трьох сценаріїв, складемо порівняльну таблицю добового теплового зношення (табл. 7.3.5).

Таблиця 7.3.5-Порівняльний аналіз добового теплового зношення ізоляції при 40 °C

Температура довкілля, °C	Добове зношення ізоляції (б.год) для Сценарію №1	Добове зношення ізоляції (б.год) для Сценарію №2	Добове зношення ізоляції (б.год) для Сценарію №3
40	6,84	12,39	23,32

7.4 Висновки

Аналіз умов експлуатації та надійності ТП: Споживчі трансформаторні підстанції розподільних мереж територіально розсереджені, не мають постійного персоналу та систем дистанційного моніторингу. Вплив симетричних і несиметричних перевантажень, струмів КЗ, пускових струмів та високих температур за відсутності сигналізації призводить до високого рівня щорічних відмов силових трансформаторів (СТ) на рівні 3–5%.

Комплексний характер зносу ізоляції СТ: Витрата ресурсу та руйнування ізоляції електроустаткування відбувається внаслідок синергетичного впливу режимних і кліматичних чинників. Основними деструктивними факторами є тепловий нагрів, механічні зусилля (тиск, вібрація, удари), вологість та агресивні середовища, які викликають незворотні фізико-хімічні зміни її структури.

Оцінка теплових процесів та закономірностей зносу: Для точного моделювання теплових перехідних процесів (особливо при циклічному навантаженні) СТ необхідно розглядати як гетерогенні тіла. Отримана закономірність швидкості зносу ізоляції від сукупності температурних, електродинамічних, хімічних і вологісних факторів дозволяє оптимізувати експлуатаційні режими різних класів ізоляції з позиції ресурсозберігання.

Вплив графіків навантаження та напрями розвитку засобів моніторингу: Форма графіка навантаження суттєво визначає добове теплове зношення обмоток: підвищення форми графіка на 10% збільшує знос ізоляції СТ майже вдвічі. Обґрунтовано потребу впровадження лічильників теплового зносу та розробки технічних засобів, що полегшують аварійні режими для збереження безперервності технологічних процесів до початку технологічних пауз.

Висновки

У випускній кваліфікаційній роботі виконано проектування внутрішніх та зовнішніх систем електропостачання молокопереробного підприємства, а також аналітично досліджено експлуатаційну надійність силового трансформаторного обладнання. За результатами роботи сформульовано такі узагальнені висновки:

Оптимізація режимів мережі: На основі розрахунку інтегральних параметрів навантаження об'єкта обґрунтовано схему компенсації реактивної потужності. Комбіноване впровадження низьковольтних цехових батарей конденсаторів та централізованої високовольтної установки забезпечило зниження коеф. реактивної потужності до нормативних вимог, суттєво розвантаживши живильні лінії.

Схема розподілу та вибір обладнання: Шляхом техніко-економічного аналізу затверджено варіант зовнішнього живлення підприємства, який гарантує необхідну категорійність надійності. Внутрішній розподіл енергії організовано за радіальним принципом для мінімізації взаємного впливу цехів під час аварій. Потужність обраних силових трансформаторів повністю задовольняє критеріям їхнього оптимального завантаження.

Верифікація стійкості елементів мережі: Розрахунки струмів к. з. дозволили виконати комплексну перевірку провідникових матеріалів та комутаційного обладнання на термічну і динамічну стійкість. Як базові захисні елементи погоджено вакуумні вимикачі, що мають високу швидкодію та значний ресурс.

Закономірності старіння діелектриків: Аналіз безвідмовності підтвердив, що паперово-масляна ізоляція обмоток є найуразливішим вузлом силових трансформаторів, де фіксується більшість відмов. Завдяки тепловому моделюванню системи як еквівалентного однорідного тіла встановлено закономірності деградації діелектрика, що описуються кінетичними законами хімічних реакцій Вант-Гоффа - Арреніуса.

Вплив навантажень та практична цінність: Дослідження теплової динаміки довело, що навіть незначне інтенсифікування добового графіка навантаження спричиняє експоненційне прискорення термічного зносу ізоляції. Отримані залежності обґрунтовують доцільність розробки мікропроцесорних систем безперервного теплового моніторингу, що дозволяє перейти до обслуговування трансформаторів за фактичним станом і продовжує їхній загальний життєвий цикл.

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

Перелік посилань

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 -196 с.
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. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.] ; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.
4. Козирський В.В. Електропостачання промислового комплексу: підруч./Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М.- К.: Аграрна освіта, 2011. – 488с.
5. Коваленко О.І. Основи електропостачання сільського господарства : Навчальний посібник / О.І. Коваленко, Л.Р. Коваленко, В.О. Мунтян, І.П. Радько. – Мелітополь : ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011. – 462с.
6. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2015.-316 с.
7. Курашкін С.Ф. Механізм пошкодження елементів конструкції силового трансформатора / С.Ф. Курашкін, І.О. Попова. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Технічні науки. // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Вип.186. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – С.62-63.

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