

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему:

**«РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ
СЕРЕДНЬОГО МАШИНОБУДУВАННЯ»**

Виконав: студент V курсу

групи Ен – 513 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

_____ Теслюк А. Д.

Керівник: _____ Левонюк В. Р.

Рецензент: _____ Коробка С. В.

ДУБЛЯНИ 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)
к.т.н., доцент Левонюк В. Р.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ _____ ” _____ 202__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Теслюку Анатолію Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення системи електропостачання заводу середнього машинобудування»

керівник роботи к.т.н., доцент Левонюк В. Р.
(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом ЛНУВМБТ 32-4 від 14.01.26 р.

2. Строк подання студентом роботи 16.03.26 р.

3. Вихідні дані
технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Розрахунок електричних навантажень та вибір схеми електропостачання заводу

2 Розроблення внутрішніх електричних мереж та вибір обладнання системи електропостачання

3 Релейний захист силових трансформаторів головної понижувальної підстанції

4 Охорона праці та навколишнього середовища

5 Техніко-економічне обґрунтування проєкту системи електропостачання заводу

Висновки

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	<i>Городецький І. М., к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання 14.01.26 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Виконання аналізу вихідних даних та характеристики об'єкта електропостачання</i>	<i>14.01.2026 – 23.01.2026</i>	
2	<i>Розробка схеми відкритих розподільчих пристроїв підстанції та вибір основного обладнання</i>	<i>26.01.2026 – 6.02.2026</i>	
3	<i>Розробка релейного захисту трансформаторів</i>	<i>9.02.2026 – 13.02.2026</i>	
4	<i>Виконання структурно-функціонального аналізу процесу та розробка моделі травмонебезпечних та аварійних ситуацій</i>	<i>16.02.2026 – 20.02.2026</i>	
5	<i>Вивчення питання охорони навколишнього середовища та здійснення техніко-економічної оцінки прийнятих рішень</i>	<i>23.02.2026 – 27.02.2026</i>	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	<i>02.03.2026 – 06.03.2026</i>	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>9.06.2025 – 16.03.2026</i>	

Студент

Теслюк А. Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 621.33.0202:1

Теслюк А. Д. «Розроблення системи електропостачання заводу середнього машинобудування». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, 2026 р. 54 с текстової частини, 15 таблиць, 12 рисунків, 24 джерел посилання.

У кваліфікаційній роботі представлено розроблення системи електропостачання заводу середнього машинобудування з урахуванням вимог надійності, енергоефективності та електробезпеки. Виконано аналіз електричних навантажень підприємства, побудовано картограму навантажень та визначено центр електричних навантажень. Розроблено схеми зовнішнього та внутрішнього електропостачання, здійснено вибір трансформаторів, провідників та основного електротехнічного обладнання. У роботі виконано розрахунок струмів короткого замикання, розроблено та обґрунтовано пристрої релейного захисту і автоматики. Значну увагу приділено питанням охорони праці та електробезпеки, зокрема розрахунку захисного заземлення. Проведено техніко-економічне оцінювання проекту та доведено доцільність упровадження запропонованих технічних рішень.

Ключові слова: система електропостачання, промислове підприємство, електричні навантаження, трансформаторна підстанція, компенсація реактивної потужності, струми короткого замикання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИБІР СХЕ- МИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ.....	8
1.1 Вихідні дані та характеристика об'єкта електропостачання.....	8
1.2 Розрахунок активних та реактивних навантажень.....	10
1.3 Картограма електричних навантажень.....	13
1.4 Зовнішнє електропостачання заводу.....	17
2 РОЗРОБЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	20
2.1 Вибір та розміщення цехових трансформаторних підстанцій.....	20
2.2 Компенсація реактивної потужності.....	22
2.3 Розробка схема електропостачання цехових підстанцій та вибір проводів ліній електропостачання.....	24
2.4 Обчислення струмів короткого замикання.....	26
2.5 Вибір основного обладнання.....	29
3 РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ГОЛОВНОЇ ПОНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ.....	33
3.1 Проектування диференційного захисту трансформатора головної понижувальної підстанції.....	34
3.2 Захист від симетричних надструмів при зовнішніх КЗ.....	37
3.3 Струмовий захист від перевантаження трансформатора.....	39
3.4 Захист від внутрішніх пошкоджень у трансформаторі.....	39
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	40
4.1 Структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій	40
4.2 Аналіз та обґрунтування технічних заходів електробезпеки в си- стемі електропостачання заводу.....	41

4.3 Розрахунок заземлення.....	43
4.4 Організаційні та пожежно-профілактичні заходи з охорони праці	45
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ.....	47
5.1 Аналіз комерційного потенціалу.....	47
5.2 Аналіз конкурентних технічних рішень.....	48
5.3 Планування та обчислення вартості розрахунків.....	50
ВИСНОВКИ.....	52
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	53

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості супроводжується зростанням енергоспоживання та ускладненням структури електричних мереж підприємств. Для заводів середнього машинобудування характерна наявність значної кількості електроприймачів різної потужності та призначення, що зумовлює підвищені вимоги до надійності, якості та безпеки електропостачання. У цих умовах проектування раціональної системи електропостачання є одним із ключових завдань інженера-електрика [1].

Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення безперебійної роботи технологічного обладнання, зменшення втрат електроенергії, компенсації реактивної потужності та підвищення енергоефективності виробництва. Раціонально розроблена система електропостачання дає змогу не лише знизити експлуатаційні витрати, а й підвищити конкурентоспроможність підприємства в умовах ринкової економіки.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та обґрунтування системи електропостачання заводу середнього машинобудування з урахуванням вимог надійності, електробезпеки та економічної доцільності.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати вихідні дані та обчислити електричні навантаження;
- побудувати картограму електричних навантажень та визначити центр електричних навантажень;
- розробити схему зовнішнього та внутрішнього електропостачання заводу;
- здійснити вибір трансформаторів, провідників та основного електротехнічного обладнання;
- виконати розрахунок струмів короткого замикання та перевірити термічну стійкість елементів мережі;
- розробити заходи з релейного захисту та автоматики;
- обґрунтувати технічні рішення з охорони праці та електробезпеки;
- провести техніко-економічне оцінювання проєкту.

1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИБІР СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

1.1 Вихідні дані та характеристика об'єкта електропостачання

Організація системи електропостачання буде здійснюватися для об'єкту, який відноситься до II категорії за надійністю електропостачання. Живлення цього об'єкта буде здійснюватись однією з діючих підстанцій або безпосередньо від електростанції, залежно від встановленої потужності підприємства та напруги живильних ліній. Ці значення будуть детерміновані подальшими розрахунками. Відповідно до категорії об'єкта, живлення буде здійснюватися двоконтурною лінією електропередачі. Розподіл електроенергії на території підприємства буде здійснюватися кабельними лініями з ізоляцією із зшитого поліетилену, а також самонесучими ізольованими проводами СПП-3.

Вихідними даними до кваліфікаційної роботи є:

1. Генеральний план підприємства, який представлено на рисунку 1.1;
2. Відомості про електричні навантаження, характеристика середовища виробничих приміщень, характеристика споживачів електроенергії представлена у вигляді таблиці 1.1;
3. Довжина живильної лінії (таблиця 1.1).

Генеральний план дає змогу детермінувати розміри цехів та довжини майбутніх кабельних ліній, а також місць їх прокладання та місць розподілу трансформаторних підстанцій [2]. Плани цехів аналогічно дають змогу визначити оптимальне розташування пунктів живлення електроприймачів та трас розподільної та живильної мережі. Відомості про електричні навантаження дають можливість детермінувати розрахункові потужності цехів, вибрати перерізи проводів ліній та обладнання.

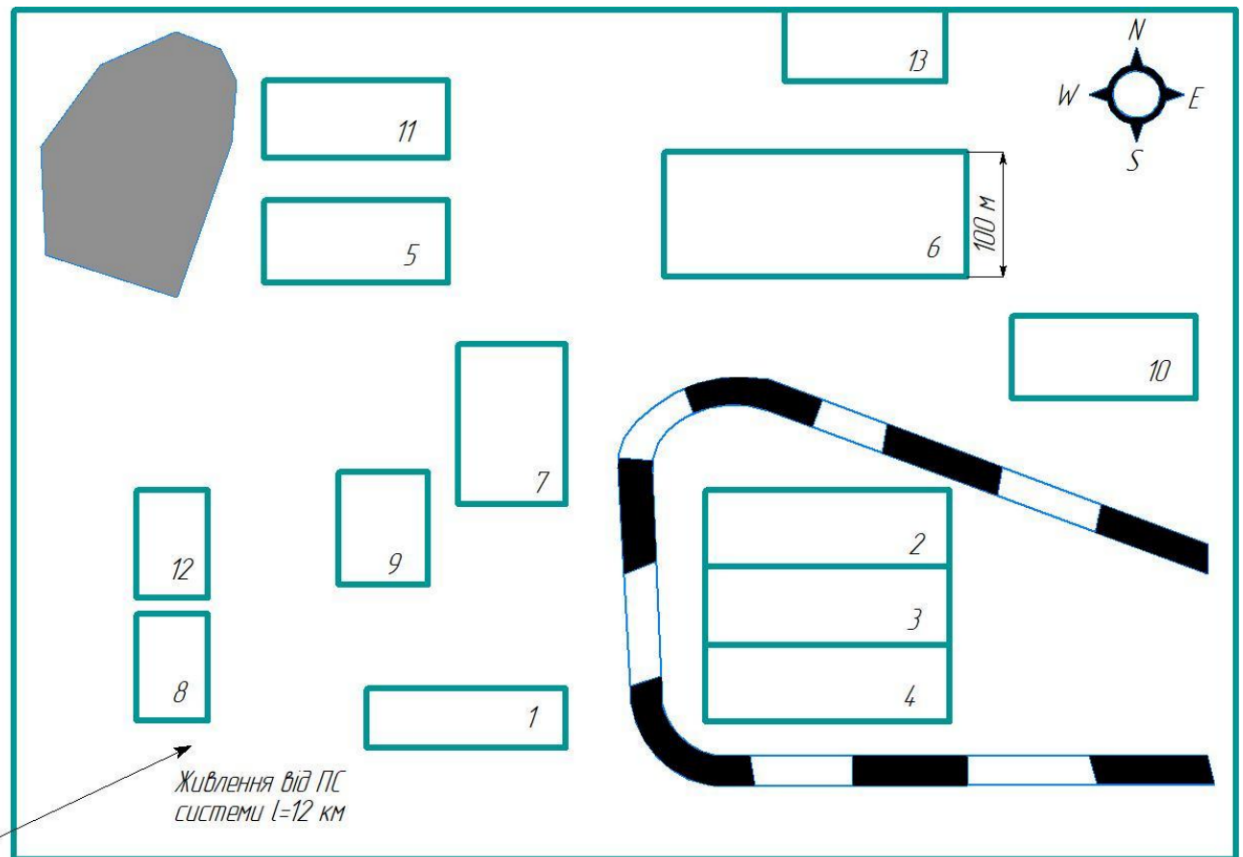


Рисунок 1.1 – Генеральний план заводу середнього машинобудування

Таблиця 1.1 – Відомості про електричні навантаження підприємства

Споживач	Категорія	Напруга, кВ	Середовище	Встановлена потужність
1. Ливарний цех	II	0,4	жарке	700
2. Механічний цех	III	0,4	нормальне	900
3. Інструментальний цех	III	0,4	нормальне	400
4. Штампувальний цех	II	0,4	нормальне	400
5. Деревообробний цех	III	0,4	пожежонебезпечне	–
6. Збиральний цех	II	0,4	нормальне	250
7. Кузня	II	0,4	жарке	900
8. Експериментальний цех	III	0,4	нормальне	208
9. Компресорна	II	0,4 (СД) 10	нормальне	120 2 x 550
10. Насосна	II	0,4	вологе	900
11. Лабораторія	III	0,4	нормальне	200
12. Ремонтно-механічний цех	III	0,4	нормальне	250
13. Адміністрація	III	0,4	нормальне	60

1.2 Розрахунок активних та реактивних навантажень

Розрахункова максимальна потужність підприємства детермінується за розрахунковими активними та реактивними навантаженнями цехів із врахуванням освітлення, втрат потужності у трансформаторах 10/0,4 кВ та інших класів напруг. На початковому етапі розробки системи електропостачання, для визначення наближених навантажень підприємства, потужності джерела живлення, дозволяється використовувати метод «Коефіцієнта попиту». Коефіцієнт запиту є характеристикою групи електроприймачів або споживача з рівномірним навантаженням, тобто в групі настільки багато електроприймачів, що максимуми навантажень не носять вираженого характеру. Розрахункове навантаження (активне та реактивне) силових приймачів цехів визначаються за формулами [3]:

$$P_p = K_C \cdot P_{НОМ}, \quad P_p = 0,2 \cdot 700 = 140 \text{ кВт}, \quad (1.1)$$

де K_C – коефіцієнт попиту; $P_{НОМ}$ – сумарна номінальна потужність електроприймачів цеху.

Розрахункове реактивне навантаження обчислюємо за формулою:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad Q_p = 140 \cdot 0,88 = 123,5 \text{ кВт}, \quad (1.2)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності, який відповідає $\cos \varphi$ цієї групи електричних приймачів.

Номінальне навантаження освітлювальних споживачів визначаємо за формулою:

$$P_{PO} = K_{CO} \cdot P_{НОМ.О}, \quad P_{PO} = 0,95 \cdot 38,8 = 36,9 \text{ кВт}, \quad (1.3)$$

де K_{CO} – коефіцієнт попиту для освітлювальних установок; $P_{НОМ.О}$ – номінальна потужність освітлювальних установок.

$$P_{НОМ.О} = P_{ПИТ} \cdot F, \quad P_{НОМ.О} = 0,005 \cdot 7762 = 38,8 \text{ кВт}, \quad (1.4)$$

де $P_{ПИТ}$ – питома густина навантаження на 1 м² виробничої площі; F – площа відповідного цеху.

Визначаємо повну розрахункову потужність цеху

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{PO})^2 + Q_p^2}, S_p = \sqrt{(140 + 36,9)^2 + (123,5 + 17,9)^2} = 226,4 \text{ кВА. (1.5)}$$

Розрахунок освітленості цехів та території заводу здійснюється за площею. Наведений розрахунок стосується ливарного цеху (номер 1 на генплані). Номінальна потужність $P_{НОМ} = 700$ кВт, коефіцієнт попиту $K_C = 0,2$, $\cos \varphi = 0,75$, відповідно $\operatorname{tg} \varphi = 0,88$. Площа будівлі складає 7762 м^2 . Коефіцієнт попиту освітлювального навантаження $K_{CO} = 0,95$ питома густина навантаження на 1 м^2 $P_{ПИТ} = 0,005 \text{ Вт/м}^2$.

Для інших цехів обчислення здійснюються аналогічно, а результати представлено у таблиці 1.1.

Далі виконаємо визначення розрахункового навантаження підприємства з урахуванням заходів із компенсації реактивної складової потужності. Зважаючи на те, що на цьому етапі проектування параметри цехових трансформаторів і трансформаторів головної понижувальної підстанції ще не обрані, втрати активної та реактивної потужності в них оцінюватимемо за наближеними залежностями [4].

$$\Delta P_{Ц.ТР} = 0,02 \cdot S_p, \quad \Delta Q_{Ц.ТР} = 0,1 \cdot S_p; \quad (1.6)$$

$$\Delta P_{Ц.ТР} = 0,02 \cdot 39,05 = 78,1 \text{ кВт}, \quad \Delta Q_{Ц.ТР} = 0,1 \cdot 3905,9 = 390,5 \text{ кВАр.}$$

Розрахуємо реактивну потужність, яка буде споживатися споживачами заводу з мережі:

$$Q_C = \alpha \cdot P_p, \quad Q_C = 0,24 \cdot 3764,3 = 903,4 \text{ кВАр,} \quad (1.7)$$

Обчислимо потужність компенсувальних пристроїв, які потрібно встановити на заводі:

$$Q_{KV} = Q_p - Q_C, \quad Q_{KV} = 3598,3 - 903,4 = 2694,9 \text{ кВАр,} \quad (1.8)$$

Значення реактивної потужності підприємства, що не підлягає компенсації та приведене до шин напругою 10 кВ головної понижувальної підстанції, з урахуванням коефіцієнта різночасності настання максимуму силового навантаження, визначається як:

$$Q_{10кВ} = Q_{P\Sigma 0.4} \cdot K_{PM} - Q_{KV}, \quad Q_{10кВ} = (1970 + 412) \cdot 0,95 + 463,4 + 390,6 = 3117 \text{ кВАр,} \quad (1.9)$$

Таблиця 1.1 – Розрахунок електричних навантажень заводу

Назва цеху	Силове навантаження					Освітлювальне навантаження					Сумарна потужність			
	$P_{ном}$, кВт	K_C	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	P_p , кВт	Q_p , кВАр	F , м ²	$P_{шт}$, кВт/м ²	K_{CO}	$P_{НОМО}$, кВт	P_{PO} , кВт	$P_p + P_{PO}$, кВт	Q_p , кВАр	S_p , кВА
1. Ливарний цех	700,0	0,20	0,75	0,88	140,0	123,5	7762	5	0,95	38,8	36,9	176,9	141,3	226,4
2. Механічний цех	900,0	0,30	0,60	1,33	270,0	360,0	11907	6	0,95	71,4	67,9	337,9	392,9	518,2
3. Інструментальний цех	400,0	0,30	0,60	1,33	120,0	160,0	11907	6	0,95	71,4	67,9	187,9	192,9	269,2
4. Штампувальний цех	400,0	0,40	0,75	0,88	160,0	141,1	11907	6	0,95	71,4	67,9	227,9	174,0	286,7
5. Деревообробний цех	672,2	-	0,78	0,81	348,8	192,0	13107	6	0,95	78,6	74,7	423,5	228,2	481,1
6. Збиральний цех	250,0	0,45	0,75	0,88	112,5	99,2	24939	9	0,95	224,5	213,2	325,7	202,5	383,5
7. Кузня	900,0	0,20	0,75	0,88	180,0	158,7	11146	5	0,95	55,7	52,9	232,9	184,4	297,1
8. Експериментальний цех	280,0	0,35	0,70	1,02	98,0	100,0	5003	9	0,80	45,0	36,0	134,0	117,4	178,2
9. Компресорна	120,0	0,50	0,75	0,88	60,0	52,9	6551	5	0,95	32,8	31,1	91,1	68,0	113,7
10. Насосна	900,0	0,50	0,75	0,88	450,0	396,9	9922	5	0,95	49,6	47,1	497,1	419,7	650,6
11. Лабораторія	200,0	0,30	0,70	1,02	60,0	61,2	9294	9	0,80	83,6	66,9	126,9	93,6	157,7
12. Ремонтно-механічний цех	250,0	0,30	0,60	1,33	75,0	100,0	5077	6	0,95	30,5	28,9	103,9	114,0	154,3
13. Адміністрація	60,0	0,40	0,70	1,02	24,0	24,5	7479	9	0,90	67,3	60,6	84,6	53,8	100,3
Територія заводу	0	-	-	-	0	0	655178	0,16	0,95	104,8	104,8	104,8	50,8	116,5
Загалом по 0,4 кВ	6032,2	-	-	-	2098,3	1970,0	136001			1025	956	3055	2433	3905
Синхронні двигуни 10 кВ														
9 Компресорна	1100	0,5	0,8	0,75	550	0,0						550	412	687
Загалом по 10 кВ	1100				550	0,0						550	412	687

Сумарна активна потужність підприємства, приведена до шин напругою 10 кВ головної понижувальної підстанції з урахуванням коефіцієнта різночасності максимумів силових навантажень, а також втрат потужності в компенсувальних пристроях, дорівнює [5]:

$$P_{10кВ} = (P_{P\Sigma 10кВ} + P_{P\Sigma 0,4кВ}) \cdot K_{PM} + P_{PO} + \Delta P_{ЦТ} + \Delta P_{KV}; \quad (1.10)$$

$$P_{10кВ} = (2098,3 + 550) \cdot 0,95 + 956,9 + 78,1 + 117,2 = 3668 \text{ кВт.}$$

Розрахуємо повну потужність на шинах 10 кВ ГПП за формулою:

$$S_{P10кВ} = \sqrt{P_{10кВ}^2 + Q_{10кВ}^2}, \quad S_{P10кВ} = \sqrt{3668^2 + 3117^2} = 4813,5 \text{ кВА.} \quad (1.11)$$

Обчислюємо наближені втрати потужності у трансформаторах ГПП за формулами:

$$\Delta P_{T.ГПП} = 0,02 \cdot S_{P10кВ}, \quad \Delta P_{T.ГПП} = 0,02 \cdot 4813,5 = 96,3 \text{ кВт;} \quad (1.12)$$

$$\Delta Q_{T.ГПП} = 0,1 \cdot S_{P10кВ}, \quad \Delta Q_{T.ГПП} = 0,1 \cdot 4813,5 = 481,3 \text{ кВт;} \quad (1.13)$$

Повна розрахункова потужність підприємства зі сторони вищої напруги трансформаторів головної понижувальної підстанції з урахуванням компенсації реактивної потужності становить:

$$S_{PBH} = \sqrt{(P_{10кВ} + \Delta P_{T.ГПП})^2 + (Q_{10кВ} + \Delta Q_{T.ГПП})^2}; \quad (1.14)$$

$$S_{PBH} = \sqrt{(3764,3)^2 + (3598,3 - 2694,9)^2} = 3871,2 \text{ кВА.}$$

1.3 Картограма електричних навантажень

Картограма навантажень являє собою розміщені на плані підприємства площі, обмежені колами, які у певному масштабі відповідають розрахунковим навантаженням цехів. Силові навантаження до та понад 1000 В зображуються окремими колами. Освітлювальне навантаження наноситься у вигляді сектора кола, яке відображає навантаження до 1000 В.

Картограма дає змогу сформуванню наочне відображення структури силових навантажень на підприємстві. На основі побудованої картограми елек-

тричних навантажень детермінується центр електричних навантажень (ЦЕН), який є оптимальним місцем для розміщення джерела живлення.

У реальних умовах, з урахуванням наявності доріг, будівель та природних перешкод, джерело живлення (ГПП) може бути зміщене у бік живильної лінії. Для визначення ЦЕН мережі на план місцевості наносяться осі координат. Початок системи координат обирається довільно. Координати кожного об'єкта x_i та y_i визначаються у міліметрах відносно початку координат для точки, у якій встановлено джерело живлення об'єкта, або його локального центру навантажень (за відсутності відповідних даних допускається визначити координати за геометричним центром об'єкта).

Для прикладу представимо розрахунок для ливарного цеху.

$$S_p = 226,4 \text{ кВА}, S_{P.O.} = \sqrt{P_{P.O.}^2 + Q_{P.O.}^2} = \sqrt{36,9^2 + 17,9^2} = 41,0 \text{ кВА},$$

$$x = 84 \text{ мм}, \quad y = 26,6 \text{ мм.} \quad (1.15)$$

Радіус круга для силового навантаження цеху становить [6]:

$$r_i = \sqrt{\frac{S_{Pi}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{266,4}{\pi \cdot 0,9}} = 8,9 \text{ мм}, \quad (1.16)$$

де S_{Pi} – розрахункова повна потужність цеху; m – масштаб для визначення проці круга.

Кут сектора α навантаження освітлення цеху визначаємо за формулою:

$$\alpha_i = \frac{360 \cdot S_{PO_i}}{S_{Pi}} = \frac{360 \cdot 41,0}{226,4} = 65,1 \text{ град.} \quad (1.17)$$

Відтак,

$$S_p \cdot x = 226,4 \cdot 84 = 19017,2 \text{ кВА мм};$$

$$S_p \cdot y = 226,4 \cdot 26,6 = 6022,1 \text{ кВА мм.}$$

Для побудови зони розсіювання центру електричних навантажень

$$S_x = S_y = \frac{S_p}{\sum_{i=1}^n S_{pi}} = \frac{226,4}{3441,3} = 0,066; \quad (1.18)$$

$$\sigma_x^2 = S_x \cdot (x - x_0)^2 = 0,066 \cdot (84 - 103,3)^2 = 24,407;$$

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку картограми електричних навантажень

№ цеху	S_{Pi} , кВА	$S_{P.O.i}$, кВА	r , мм	α , град	x_{is} , м	y_{is} , м	$S_{pi} \cdot x_i$, кВА мм	$S_{pi} \cdot y_i$, кВА мм	$\frac{S_{pi}}{\sum_{i=1}^n S_{pi}}$, кВА мм	σ_x^2	σ_y^2
Споживачі ел. енергії 0,4 кВ											
1	226,4	41,0	8,9	65,1	84,0	26,6	19017	6022	0,066	24,4	119,6
2	518,2	75,4	13,5	52,4	150,1	60,6	77778	31401	0,151	330,3	11,2
3	269,2	75,4	9,8	100,8	150,1	47,0	40414	12654	0,078	171,6	38,7
4	286,7	75,4	10,1	94,7	150,1	33,1	43032	9489	0,083	182,7	108,8
5	481,1	83,0	13,0	62,1	63,6	114,1	30595	54888	0,140	219,8	281,1
6	383,5	236,9	11,6	222,4	150,6	118,1	57760	45295	0,111	249,7	265,9
7	297,1	58,8	10,3	71,3	91,3	80,0	27124	23767	0,086	12,3	9,9
8	178,2	40,0	7,9	80,9	29,0	35,1	5167	6254	0,052	285,5	60,3
9	113,7	34,6	6,3	109,5	68,0	60,6	7730	6889	0,233	289,3	17,4
10	650,6	52,4	15,2	29,0	201,0	92,1	130769	59920	0,189	1806,0	98,7
11	157,7	74,4	7,5	169,7	63,0	136,1	9935	21464	0,046	74,2	204,8
12	154,3	32,2	7,4	75,0	29,4	58,7	4535	9056	0,045	244,5	4,9
13	100,3	67,3	6,0	241,7	156,8	149,8	15720	15018	0,029	83,5	189,0
Синхронні двигуни 10 кВ											
10	687,2	-	15,6	-	68,0	60,6	46730,3	41645,0	-	-	-
Всього	3441,3	-	-	-	-	-	355350,9	238307,7	-	1766,1	913,5

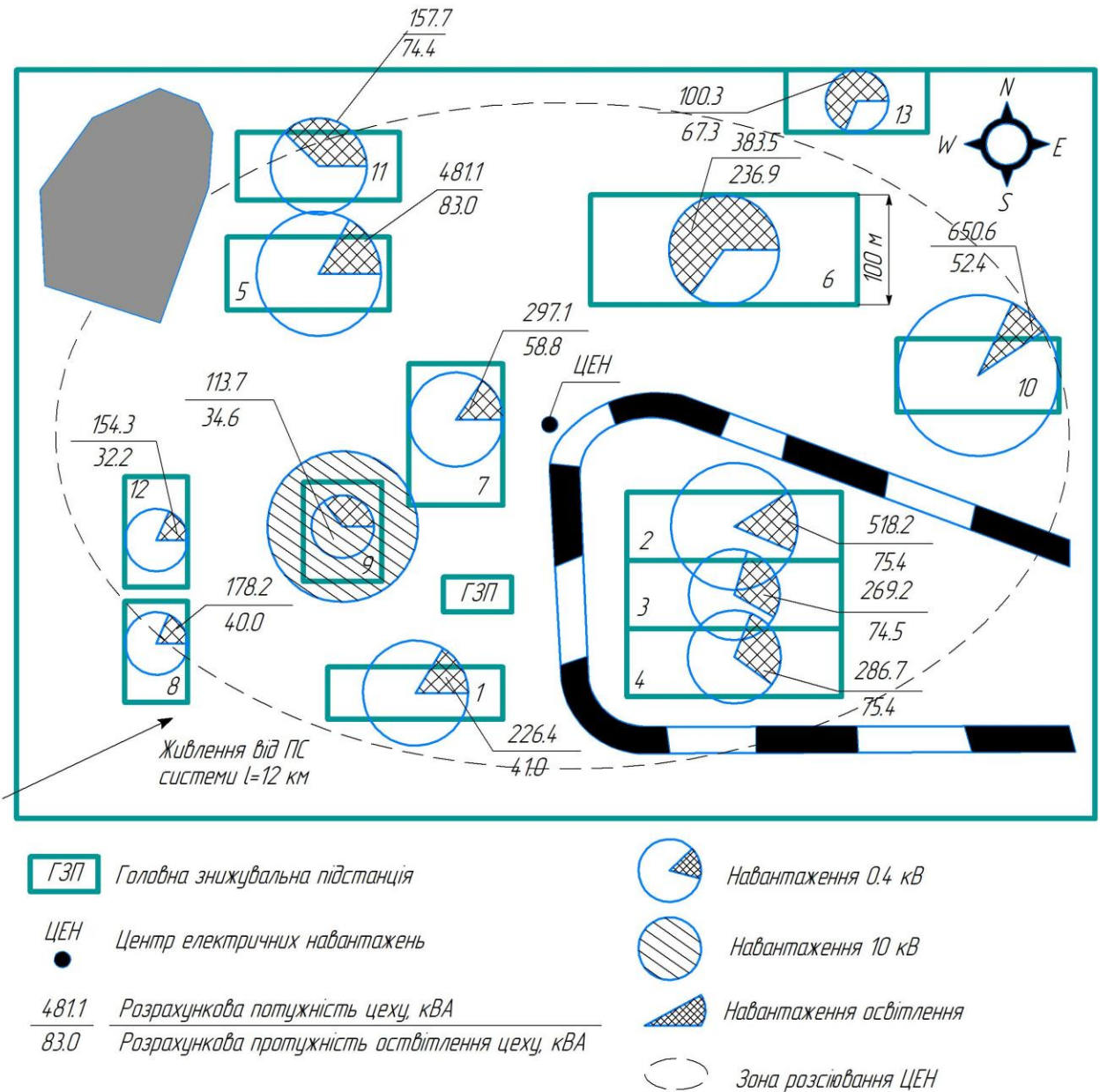


Рисунок 1.2 – Картограма навантаження заводу середнього

$$\sigma_y^2 = S_y \cdot (y - y_0)^2 = 0,066 \cdot (26,6 - 69,2)^2 = 119,66.$$

Відтак, визначаємо координати центру навантаження заводу [7]:

$$x_0 = \frac{\sum_1^n S_{P_i} \cdot x_i}{\sum_1^n S_{P_i}} = \frac{355350,9}{2441,3} = 103,3 \text{ мм}; \quad y_0 = \frac{\sum_1^n S_{P_i} \cdot y_i}{\sum_1^n S_{P_i}} = \frac{238307,7}{3441,3} = 69,2 \text{ мм}; \quad (1.19)$$

Обчислюємо параметри нормального закону розподілу:

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n S_{x_i} \cdot (x_i - x_0)^2 = 1766,1, \quad \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n S_{y_i} \cdot (y_i - y_0)^2 = 913,5,$$

$$h_x = \frac{1}{\sqrt{\sigma_x} \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1769.9} \cdot \sqrt{2}} = 0.0168;$$

$$h_y = \frac{1}{\sqrt{\sigma_y} \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{885.1} \cdot \sqrt{2}} = 0.0234.$$

Обчислюємо значення пів осей еліпса розсіювання:

$$R_x = \frac{\sqrt{3}}{h_x} = \frac{\sqrt{3}}{0.0168} = 102.9 \text{ мм}, \quad R_y = \frac{\sqrt{3}}{h_y} = \frac{\sqrt{3}}{0.0234} = 74 \text{ мм}.$$

Картограму електричних навантажень заводу представлено на рисунку 1.2.

Координати центру навантаження є такими: $x = 103,3$ мм, $y = 69,2$ мм.

1.4 Зовнішнє електропостачання заводу

Понижувальна підстанція складається із трьох основних частин: відкритого розподільного пристрою 35 кВ; силового трансформатора; закритого розподільного пристрою 10 кВ. У кваліфікаційній роботі розглядається варіант тупикової підстанції. Основними елементами відкритого розподільного пристрою є: роз'єднувачі, відокремлювачі та короткозамикачі; вимірювальні трансформатори струму та напруги; високовольтний вимикач. Основним елементом понижувальної підстанції є силовий трансформатор з напругою первинної обмотки 35 кВ.

Для розподілу електричної енергії на напрузі 10 кВ необхідна розробка закритого розподільного пристрою. Розміри цього пристрою безпосередньо залежать від кількості приєднань на даному рівні напруги. Кожне приєднання до шин 10 кВ потребує окремої комірочки КРП [8].

У загальному випадку, для нормального функціонування розподільчої мережі необхідно не лише підключити всі цехові трансформаторні підстанції, але й передбачити пристрої компенсації реактивної потужності 10 кВ, вимірювальні трансформатори 10 кВ, а також залишити місця під резервні лінії.

Склад обладнання відкритого розподільного пристрою підстанції визначається її головною схемою з'єднань. Нами було розраховано економічно доцільне значення напруги живильних ліній за формулою Ніклосова. З урахуванням рекомендацій було прийнято напругу живильних ліній 35 кВ.

Приймаємо схему зовнішнього електропостачання у вигляді двох блоків із вимикачами Q_1 та Q_2 та неавтоматичною перемичкою. У випадку пошкодження у трансформаторі T_1 спрацює захист та подасть сигнал на відключення вимикачів у колах трансформатора з боку низької напруги Q_4 та з боку високої напруги Q_2 . Секційний вимикач низької сторони Q_5 підключить секцію, яка буде без напруги живлення.

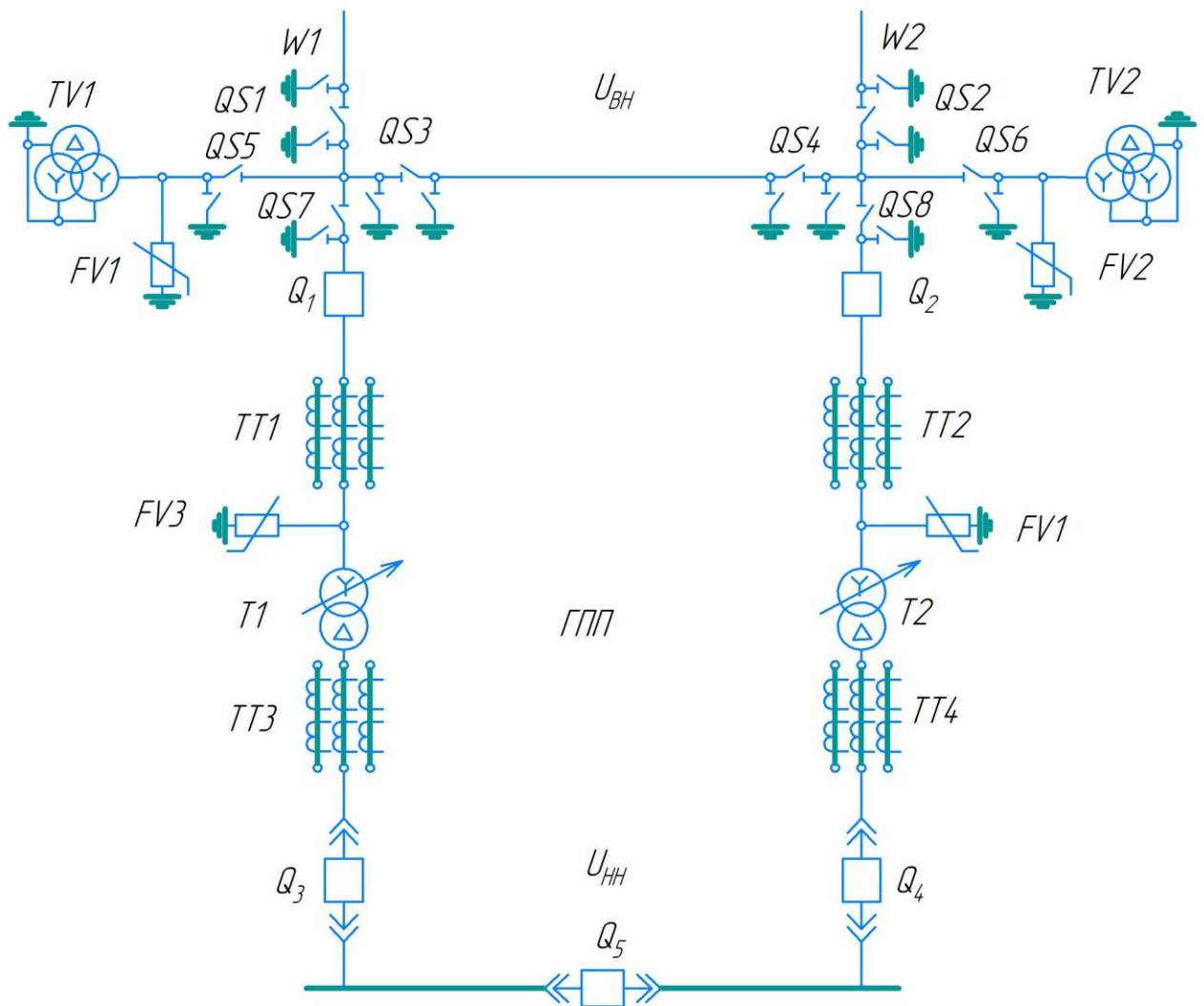


Рисунок 1.3 – Схема зовнішнього електропостачання ГПП

Роз'єднувачі QS_3 та QS_4 у ремонтній перемичці при нормальному режимі вимкнені. У випадку виведення у ремонт трансформатора T_2 або ви-

микача в контурі трансформатора $Q2$ або $Q4$ існує можливість залишити у роботі обидві живильні лінії шляхом увімкнення роз'єднувачів перемички $QS3$ та $QS4$. При цьому спочатку вмикається перемичка, а потім відмикається контур трансформатора. Схема представлена на рисунку 1.3.

Електропостачання споживачів першої та другої категорії здійснюється за допомогою двотрансформаторної підстанції. При використанні двох трансформаторів коефіцієнт завантаження не повинен перевищувати 0,7, що пояснюється можливістю збереження працездатності електроустановки у випадку виходу з ладу одного з трансформаторів. Робота справного трансформатора допускається із завантаженням 1,4, але не більше ніж 5 днів поспіль по 6 годин. Електропостачання ГПП здійснюється двоконтурною повітряною лінією електропередачі, прокладеною на сталевих опорах зі сталево-алюмінієвими проводами марки АС.

Після визначення загальної структури зовнішнього електропостачання підприємства та вибору напруги живильних ліній наступним етапом проектування є розроблення внутрішньої системи розподілу електроенергії. Внутрішнє електропостачання охоплює вибір кількості та потужності цехових трансформаторних підстанцій, формування схеми розподільчої мережі 10/0,4 кВ, а також вибір провідників і кабельних ліній, що забезпечують надійне живлення електроприймачів заводу.

Особливу увагу при цьому необхідно приділити забезпеченню нормативних показників якості електроенергії, допустимих втрат напруги, а також виконанню вимог щодо категорійності споживачів. Оскільки значна частина технологічного обладнання належить до II категорії надійності, система внутрішнього електропостачання повинна передбачати резервування живлення та можливість швидкого відновлення електропостачання у випадку аварійних відмикань.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Вибір та розміщення цехових трансформаторних підстанцій

Трансформаторні підстанції 10 кВ повинні бути встановлені у центрах своїх електричних навантажень. При розміщенні на великих промислових підприємствах груп цехових трансформаторів їх номінальна потужність визначається густиною навантаження та вибирається однаковою (за можливості) для усієї групи. Завантаження двотрансформаторних підстанцій за повною потужністю не повинно перевищувати 70 %, а однострансформаторних – 90%.

Питання вибору місць встановлення ТП безпосередньо пов'язане із забезпеченням категорії надійності електропостачання. Споживачі I та II категорії надійності потребують двох незалежних джерел живлення, а відтак повинні бути заживлені від двотрансформаторної підстанції або РП 0,4 кВ, які живляться від такої підстанції.

Питома густина навантаження визначається за формулою [9]:

$$\sigma_H = \frac{S_p}{F} = \frac{3905,9}{136001,2} = 0,029 \text{ кВА/м}^2, \quad (2.1)$$

де S_p – розрахункове навантаження цеху; F – площа цеху.

При $\sigma_H < 0,2$ застосовують трансформатори потужністю до 1000 кВА; при $0,2 < \sigma_H < 0,3$ застосовують трансформатори потужністю 1600 кВА; при $\sigma_H > 0,3$ застосовують трансформатори потужністю 1600 – 2500 кВА.

Мінімальна кількість цехових трансформаторів визначається так:

$$N_{\min} = \frac{P_p}{K_3 \cdot S_{НОМ}} = \frac{3055,2}{0,7 \cdot 400} = 10,9 \text{ шт}, \quad (2.2)$$

приймаємо 11 шт.

Активне навантаження на один трансформатор становить:

$$P_1 = \frac{P_P}{N_1} = \frac{3055,2}{11} = 277,7 \text{ кВт.} \quad (2.3)$$

Обчислюємо кількість трансформаторів для встановлення у цехах заводу за формулою [10]:

$$N_T = \frac{P_{P.i}}{P_1} = \frac{176,9}{277,7} = 0,637 \text{ шт.} \quad (2.4)$$

Навантаження цехів об'єднуються таким чином, щоб трансформаторні підстанції були завантажені оптимально, а кількість трансформаторів перебувала у межах розрахункової кількості трансформаторів.

Для більш оптимального розподілу трансформаторів по території заводу приймаємо трансформатори різної потужності. Параметри прийнятих трансформаторів представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри вибраних трансформаторів

Тип	$S_{НОМ}$, кВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	$P_{НХ}$, кВт	$Q_{НХ}$, кВАр	$P_{КЗ}$, кВт	$Q_{КЗ}$, кВАр	U_K , %	$I_{НХ}$, %
ТМ-400/10	400	10	0,4	1,2	8,4	5,5	22	5,5	2,1
ТМ-630/10	630	10	0,4	1,56	12,6	8,5	34,7	5,5	2

Результати групування навантажень та обчислення коефіцієнтів завантаження трансформаторів представлено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати групування навантажень та обчислення коефіцієнтів завантаження трансформаторів

№ Т П	Місце розташування на генплані	Споживачі	P_P , кВт	$S_{НОМ.Т}$, кВА	Завантаження т-рів за активною потужністю	Завантаження т-рів за повною потужністю	N_T , шт
1	Цех №5	5, 11	550,4	400	0,68	0,79	2
2	Цех №6	6, 13	410,3	400	0,51	0,6	2
3	Цех №10	10	497,1	400	0,62	0,81	2
4	Цех №8	8, 12	238	400	0,59	0,83	1
5	Цех №9	1, 7, 9	500,9	400	0,62	0,79	2
6	Цех №3	2, 3, 4	753,6	630	0,59	0,85	2

Розрахунки показали, що деякі трансформаторні підстанції перевантажені за повною потужністю. Отже, необхідно здійснити компенсацію реактивної потужності.

2.2 Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності на цехових підстанціях промислового підприємства є одним із ключових заходів підвищення ефективності роботи системи електропостачання. Значна частка індуктивних споживачів, таких як електродвигуни, трансформатори та зварювальне обладнання, зумовлює підвищене споживання реактивної потужності, що призводить до зростання струмів у мережі, додаткових втрат електроенергії та зниження рівня напруги на шинах підстанцій. З метою забезпечення нормативного коефіцієнта потужності, зменшення навантаження на елементи мережі та оптимізації режимів роботи електроустановок виконується розрахунок і вибір компенсаційних пристроїв, які встановлюються безпосередньо на цехових підстанціях.

Представимо розрахунок для ТП1. Необхідне начення коефіцієнта потужності становить: $\cos \varphi_{\text{баз}} = 0,78$, $\text{tg} \varphi_{\text{баз}} = 0,81$.

Початковий коефіцієнт потужності для ТП1 становить [11]:

$$\text{tg} \varphi_{\text{факт}} = \frac{Q_{\text{ТП1}}}{P_{\text{ТП1}}} = \frac{321,7}{550,4} = 0,58. \quad (2.5)$$

Розрахункова потужність конденсаторних установок становить:

$$Q_{\text{КУ.розр}} = P_{\text{ТП1}} \cdot (\text{tg} \varphi_{\text{факт}} - \text{tg} \varphi_{\text{баз}}) = 550,4 \cdot (0,58 - 0,81) = -124,4 \text{ кВАр}. \quad (2.6)$$

Приймаємо до встановлення дві установки компенсації реактивної потужності типу УКМ 58-0,4-112,5. Повна реактивна потужність, яка генерується УКРП становить:

$$Q_{\text{КУ}} = Q_{\text{КУ.розр}} \cdot n_{\text{КУ}} = 112,5 \cdot 2 = 225 \text{ кВАр}. \quad (2.7)$$

Повна потужність ТП1 з урахуванням УКРМ

$$S_{\text{ТП1}} = \sqrt{P_{\text{ТП1}}^2 + (Q_{\text{ТП1}} - Q_{\text{КУ}})^2} = \sqrt{550,4^2 + (321,8 - 225)^2} = 558,8 \text{ кВА}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт завантаження ТП1 з урахуванням КРП становить:

$$\beta_{зТП1} = \frac{S_{зТП1}}{N_{зТП1} \cdot S_{ном.т}} = \frac{558,8}{2 \cdot 400} = 0,699. \quad (2.9)$$

Обчислюємо результативний коефіцієнт потужності ТП1 [12]:

$$\operatorname{tg} \varphi_{рез} = \frac{Q_{ТП1} - Q_{КУ}}{P_{ТП1}} = \frac{321,8 - 225}{550,4} = 0,18, \quad \cos \varphi_{рез} = 0,98. \quad (2.10)$$

Для інших ТП розрахунки здійснено аналогічно. Результати зведено до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахунок компенсації реактивної потужності

№ТП	$P_{ТП}$, кВт	$Q_{ТП}$, кВАр	$\operatorname{tg} \varphi_{факт}$	$\operatorname{tg} \varphi_{баж}$	$Q_{КУ.р}$, кВАр	$Q_{КУ.ном}$, кВАр	$n_{КУ}$, шт	$\cos \varphi_{рез}$
ТП1	550,4	321,8	0,58	0,81	-124,4	112,5	2	0,98
ТП2	410	256,3	0,62	0,88	-104,4	0	0	0,84
ТП3	497,1	419,7	0,84	0,87	-18,6	90	2	0,91
ТП4	238	231,4	0,96	1	-10,3	0	0	0,73
ТП5	501	393,7	0,78	0,88	-47	75	2	0,91
ТП6	754	759,7	0,99	0,87	95,1	160	2	0,87

Схема розподілу реактивної потужності у системі електропостачання підприємства представлена на рисунку 2.1.

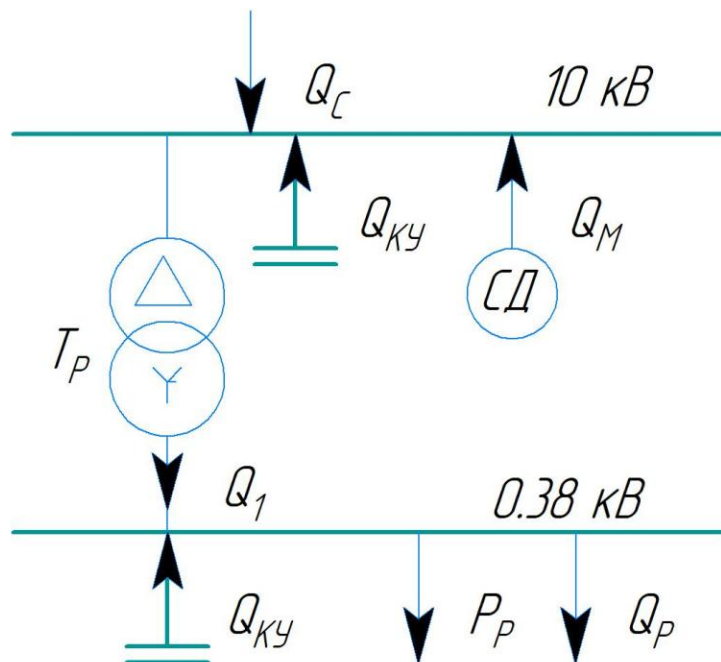


Рисунок 2.1 – Схема розподілу реактивної потужності в системі електропостачання заводу

В системі електропостачання заводу наявне високовольтне навантаження 10 кВ, зокрема синхронний двигун типу СТД 630 кВт. Розрахунки показали, що додаткової компенсації реактивної потужності зі сторони 10 кВ не потрібно [13].

2.3 Розробка схема електропостачання цехових підстанцій та вибір проводів ліній електропостачання

На рисунку 2.2 представлено план заводу з попереднім розташуванням об'єктів електропостачання.

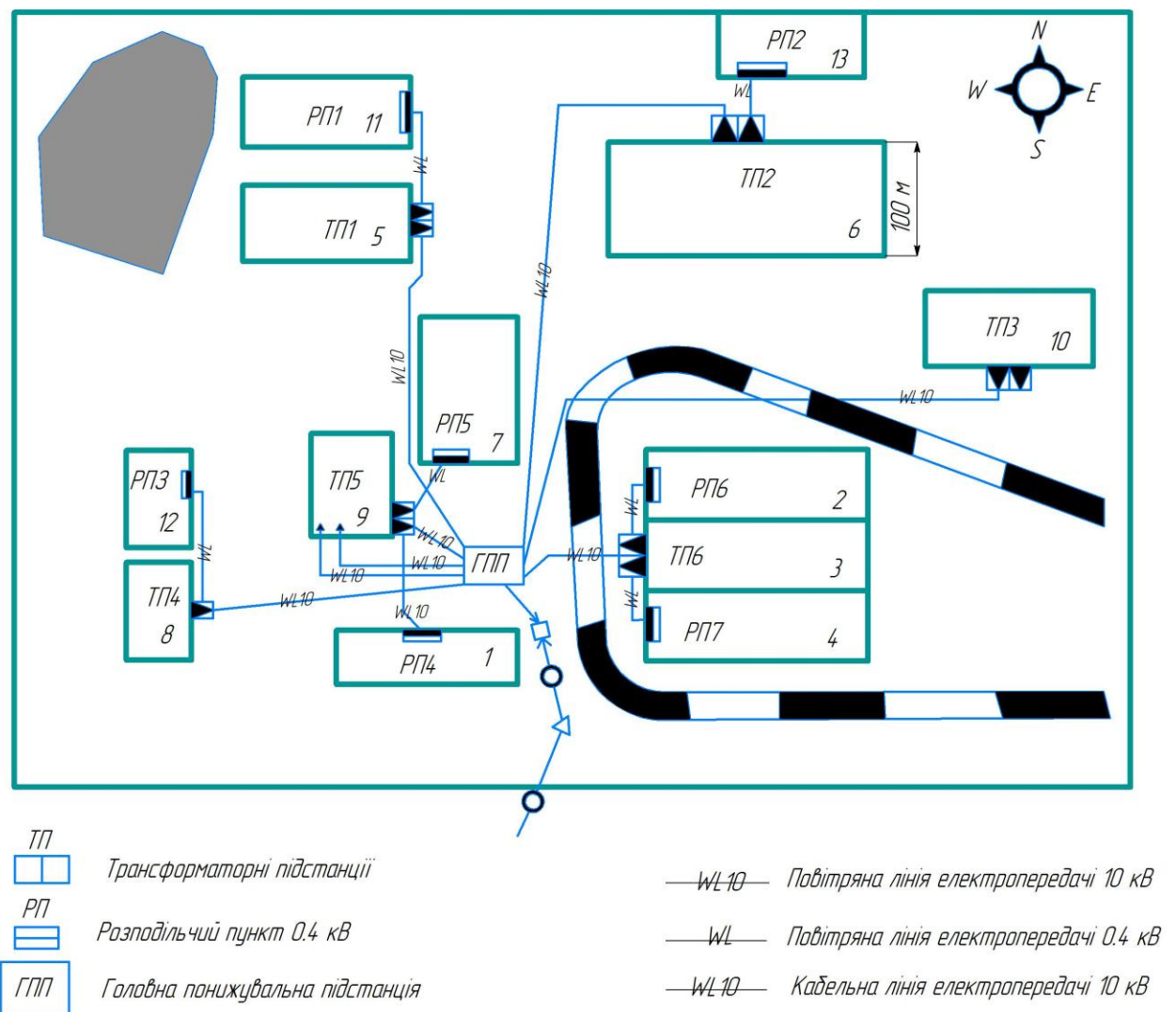


Рисунок 2.2 – План заводу з попереднім розташуванням об'єктів електропостачання

Розроблена схема електропостачання є надійною, оскільки використовуються радіальні лінії. Також, схема є економічною та ефективною, оскільки довжини ліній мінімальні на всіх рівнях напруг.

Розподільча мережа напругою понад 1000 В на території підприємства виконується самонесучим ізольованим проводом марки СП-3 із прокладанням на залізобетонних опорах. Живлення високовольтних електродвигунів здійснюється кабельними лініями з алюмінієвими жилами марки АПвВнг, прокладеними у траншеї.

Спрощена схема живлення цехових трансформаторних підстанцій наведена на рисунку 2.3.

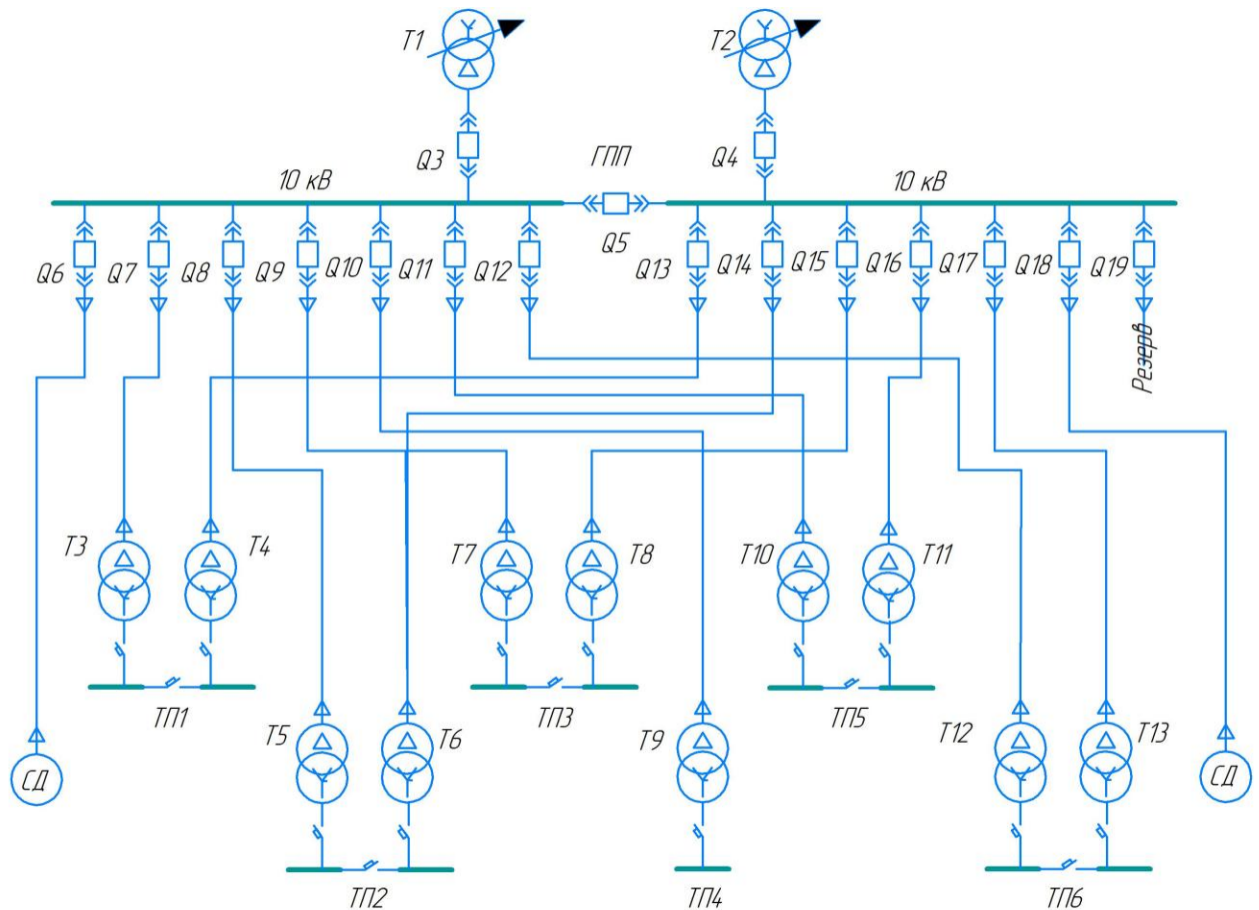


Рисунок 2.3 – Спрощена схема живлення цехових підстанцій та високовольтних споживачів

Для виконання подальших розрахунків струмів короткого замикання обираємо повітряні лінії електропередачі, які забезпечують з'єднання головної понижувальної підстанції з цеховими трансформаторними підстанціями. Як силові кабельні лінії приймаємо кабель марки СП-3 із мідними струмопровід-

ними жилами та ізоляцією із зшитого поліетилену. Оцінювання термічної стійкості кабелів буде проведено після визначення величин струмів КЗ. Отримані результати розрахунків подано у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вибір кабелів для внутрішнього електропостачання

Лінія	S_p , кВА	К-ть кабелів	I_p , А	$F_{РОЗР}$, мм ²	$F_{СТ}$, мм ²	$I_{ДОП.СТ}$, А
ГПП – ТП1	800	2	24,2	20,2	35	160
ГПП – ТП2	800	2	24,2	20,1	35	160
ГПП – ТП3	800	2	24,2	20,2	35	160
ГПП – ТП4	400	1	24,2	20,4	35	160
ГПП – ТП5	800	2	24,2	20,2	35	160
ГПП – ТП6	1260	2	38,1	31,7	35	160
РП1 – СД	687	1	39,7	33,1	50/16	175

Таким чином, було здійснено вибір живильних провідників та виконано їх перевірку за умовами допустимого нагрівання та втрат напруги. За результатами розрахунків встановлено, що всі обрані провідники відповідають вимогам експлуатації та можуть бути використані в електричній мережі підприємства.

2.4 Обчислення струмів короткого замикання

В електроустановках можуть виникати різні види коротких замикань, які супроводжуються різким зростанням струму. У зв'язку з цим електрообладнання, яке використовується у системах електропостачання, має бути стійким до дії струмів КЗ та підбиратися із урахуванням їх можливих величин.

Під час розрахунків напругу на шинах високої напруги ГПП можна вважати сталою, оскільки підприємство отримує живлення від енергосистеми практично необмеженої потужності. Це означає, що періодична складова струму короткого замикання майже не змінюється з часом та залишається сталою від моменту виникнення КЗ до його ліквідації.

Розрахунок струмів короткого замикання виконуємо у відносних одиницях. Для цього всі вихідні дані приводяться до базисних значень напруги та потужності. Для обчислень необхідно знати параметри трансформаторів головної понижувальної підстанції та повітряної лінії, яка забезпечує живлення підприємства.

У випадку встановлення на підстанції двох трансформаторів при аварійному відключенні одного з паралельно працюючих агрегатів навантаження переходить на трансформатор, який залишається в роботі.

Для здійснення розрахунку струмів короткого замикання складають розрахункову схему системи електропостачання (рисунок 2.4), а на її основі формують відповідну схему заміщення (рисунок 2.5). Розрахункова схема є спрощеною однолінійною моделлю, на якій відображаються основні елементи системи електропостачання та їх параметри, які впливають на величину струму КЗ. Також на схемі позначають точки мережі, у яких необхідно визначити значення струмів короткого замикання.

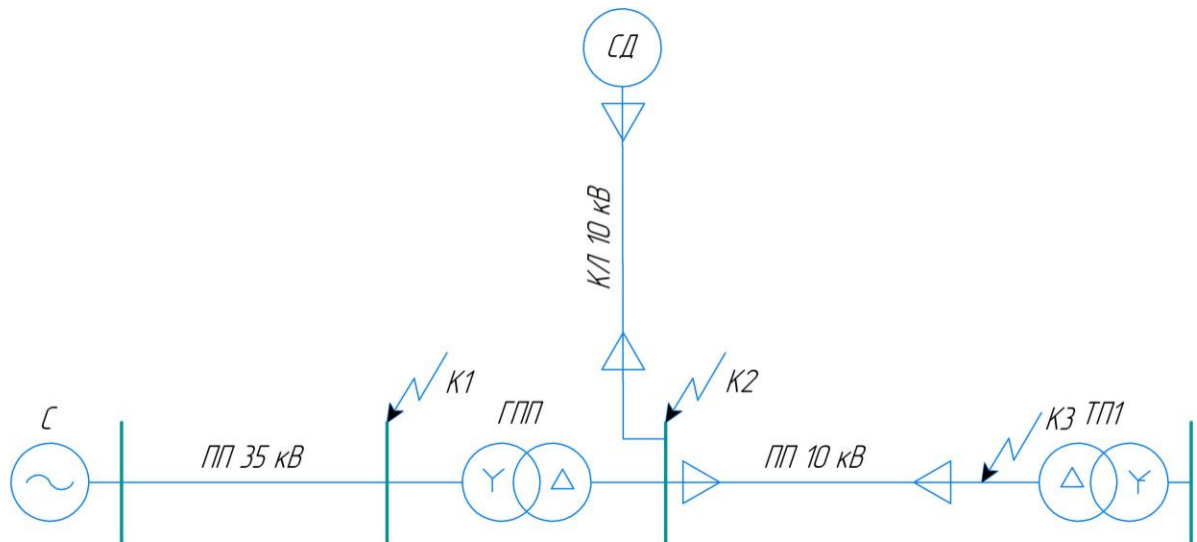


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема системи електропостачання

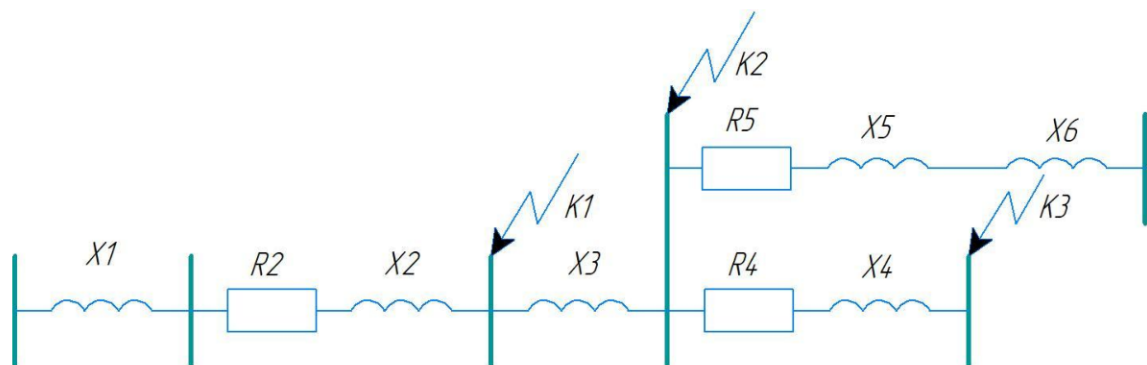


Рисунок 2.5 – Схема заміщення аналізованої ділянки мережі

Розрахунки струмів КЗ будемо здійснювати для наступних параметрів елементів системи. Синхронний двигун: $S_{НОМ} = 687$ кВА, $U_{НОМ} = 10$ кВ, $I_{НОМ} = 0,04$ кА, $x_d'' = 0.189$ Ом, $\cos \varphi = 0.8$. Кабельна лінія ГПП – СД: провід

2хАПВВНГ-1(3х50/16), $U_{НОМ} = 10$ кВ, $l = 0.033$ км, $r_0 = 0,641$ Ом/км, $x_0 = 0.184$ Ом/км. Параметри системи: $S_C = \infty$, $x_C = 0$. Повітряна лінія Система – ГПП: провід 2хАС-120/19, $U_{НОМ} = 35$ кВ, $l = 12$ км, $r_0 = 0,244$ Ом/км, $x_0 = 0.414$ Ом/км. Трансформатор ГПП: ТМН-4000/35. Повітряна лінія ГПП – ТП1: провід СІП-3-6(1х35), $U_{НОМ} = 10$ кВ, $l = 0,276$ км, $r_0 = 0,89$ Ом/км, $x_0 = 0.305$ Ом/км.

Обчислення будемо здійснювати у відносних одиницях, при базових умовах: $S_B = 100$ МВА, $U_{\sigma 1} = 37$ кВ, $U_{\sigma 2} = 10,5$ кВ.

Базисні струми становлять:

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}}; \quad (2.7)$$

$$I_{\sigma 1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}, \quad I_{\sigma 2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}.$$

Оскільки, $U_{\sigma} = U_{cp.НОМ}$ на всіх ступенях напруги, то величина ЕРС у відносних базисних і номінальних одиницях рівні:

$$E_{*(\sigma)} = E_{*(н)} \frac{U_{cp.НОМ}}{U_{\sigma}} = E_{*(н)}, \quad (2.8)$$

Значення ЕРС прийнято: для GS $E_1 = 1$ в.о., для $H1$ $E_2 = 0,85$ в.о., для M $E_3 = 1,1$ в.о. Визначення системних параметрів та обчислення струмів КЗ було здійснено у програмному комплексі ДАКАР. Результати обчислень представлено у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Результати обчислень струмів КЗ

Точка КЗ	U_{σ} , кВ	I_{σ} , кА	$I_{КЗ}$, кА	T_a , с	$k_{y\sigma}$	$i_{y\sigma}$, кА	B_k , кА ² с
К1	37	1,56	4,4	0,12	1.92	11,9	–
К2	10,5	5,499	2,9	0,65	1.98	8	5946
К3	10,5	5,499	2,7	0,02	1.69	6,5	–

За результатами розрахунку струмів короткого замикання виконано перевірку обраних провідників на термічну стійкість. Проведені обчислення показали, що прийняті перерізи провідників перевищують мінімально допустимі значення, а отже забезпечують необхідну надійність роботи мережі в аварійних режимах.

2.5 Вибір основного обладнання

Вибір високовольтних вимикачів. Для сторони 35 кВ вибираємо елегазовий вимикач 30-SFGP40A [14]. Значення робочого струму та струму короткого замикання, що протікатимуть через вимикач, були визначені у попередніх розрахунках. Результати перевірки правильності вибору апарата наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Перевірка виконання умов вибору вимикача на 35 кВ

Умови вибору	Розрахункові дані	Довідникові дані
$U_{УСТ} \leq U_{НОМ}$	35 кВ	35 кВ
$I_{КЗ} \leq I_{ВДМ}$	4400 А	25000 А
$i_{уд} \leq I_{\max.ДОП}$	11900 А	63000 А
$I_P \leq I_{НОМ}$	61.9 А	630 А

Як видно з отриманих результатів, усі необхідні умови виконуються, тому обраний вимикач відповідає заданим вимогам та може бути використаний у схемі електропостачання.

Наступним етапом є вибір ввідних та секційних вимикачів. Зазначені апарати постачаються у складі комірок розподільчих пристроїв. Для цього приймаємо комірки комплектних розподільчих установок серії КРУ-2-10, оснащені вакуумними вимикачами EasyPact EXE 10 кВ. Перевірку вибору за встановленими умовами наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Перевірка умов вибору вимикача 10 кВ

Умови вибору	Розрахункові дані	Довідникові дані
$U_{УСТ} \leq U_{НОМ}$	10 кВ	10 кВ
$I_{КЗ} \leq I_{ВДМ}$	2700 А	12500 А
$i_{уд} \leq I_{\max.ДОП}$	6500 А	32000 А
$I_P \leq I_{НОМ}$	28,6 А	630 А

Вибір ОПН. У повітряних лініях електропередачі можуть виникати перенапруги, спричинені прямими ударами блискавки. Ці хвильові перенапруги поширюються вздовж лінії та досягають підстанцій, викликаючи короткочасне підвищення напруги на електрообладнанні, що може призвести до пошкодження ізоляції.

З метою запобігання подібним аварійним явищам та забезпечення надійного захисту устаткування застосовуються нелінійні обмежувачі перенапруг.

Для захисту ізоляції повітряних ліній та трансформаторів від атмосферних та комутаційних перенапруг на сторонах високої та низької напруги встановлюють обмежувачі перенапруг типу. Вибираємо для захисту на високій стороні ОПН – *TEL-35/40,5-550*, а на низькій – ОПН – *PT/TEL-10/10,5*.

Таблиця 2.8 – Каталогні дані ОПН [5]

Тип	$U_{НОМ}$, кВ	$U_{ДОП}$, кВ	Номінальний розрядний струм
<i>TEL-35/40,5-550</i>	35	40,5	10
<i>PT/TEL-10/10,5</i>	10	10,5	10

Вибір роз'єднувачів. Роз'єднувач є комутаційним апаратом, призначеним для створення видимого розриву в електричних колах без навантаження (контур при цьому повинен бути попередньо вимкнений вимикачем).

Для обраної системи приймаємо роз'єднувачі на 35 кВ типів РНДЗ-35/1000 для високої сторони та РВ-10/400 для низької сторони 10 кВ. Результати перевірки відповідності обраних апаратів встановленим умовам наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Каталогні дані роз'єднувачів

Тип	$U_{НОМ}$, кВ	$U_{ДОП}$, кВ	$I_{НОМ}$, А	Стійкість при наскрізних струмах			
				Головні ножі		Заземлювальні ножі	
				Гранич. наскрізн. струм, кА	Струм терміч. стійкості	Гранич. наскрізн. струм, кА	Струм терміч. стійкості
РВ-10/400	10	400	43	16	–	16	–
РНДЗ-35/1000	35	1000	100	40	100	40	100

Вибір трансформаторів струму. Вибір трансформаторів струму здійснюється з урахуванням таких критеріїв:

- напругою електричної установки:

$$U_{НОМ} \geq U_{УСТ.НОМ}; \quad (2.9)$$

- за робочим струмом:

$$I_{1HOM} \geq I_{МАКС}, \quad (2.10)$$

де I_{1HOM} – номінальний первинний струм трансформатора струму. Він повинен максимально відповідати робочому струму установки, оскільки недовантаження первинної обмотки може призвести до збільшення похибки вимірювань.

- за конструкцією та класом точності;
- за електродинамічною стійкістю [7]:

$$i_{y\partial} \leq k_{ed} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1HOM}; \quad (2.11)$$

- за термічною стійкістю:

$$(k_T \cdot I_{1HOM})^2 \cdot t_{TEP} \geq B_K, \quad (2.12)$$

де k_T – кратність термічної стійкості; B_K – розрахунковий імпульс квадратичного струму КЗ; t_{TEP} – час перебігу струму термічної стійкості.

- за відповідністю класу точності:

$$Z_2 \leq Z_{2H}. \quad (2.13)$$

Для підключення диференційного захисту зі сторони високої напруги обираємо трансформатор струму ТА1. Схема з'єднання трансформаторів струму на стороні високої напруги виконана за схемою «трикутник».

Номінальний первинний струм трансформатора зі сторони ВН становить:

$$I_{HOM}^{BH} = \frac{S_{HOM}}{\sqrt{3} \cdot U_{HOM}^{BH}}, \quad I_{HOM}^{BH} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 35} = 103,9 \text{ А}. \quad (2.14)$$

Визначимо розрахункове значення первинного струму трансформаторів струму на стороні високої напруги:

$$I_{1PO3}^{TA1} = K_{CX} \cdot I_{HOM}^{BH}, \quad I_{1PO3}^{TA1} = \sqrt{3} \cdot 103,9 = 180 \text{ А}. \quad (2.15)$$

Стандартне значення первинного струму трансформаторів на стороні високої напруги становить 200 А, коефіцієнт трансформації $K_I = 200/5$. Для цих умов обираємо трансформатор струму типу ТФЗМ-35.

2. Далі виконуємо вибір трансформатора струму для підключення диференційного захисту зі сторони низької напруги (ТА2). Схема з'єднання трансформаторів струму на стороні низької напруги виконана за схемою неповної «зірки».

Номінальний струм силового трансформатора зі сторони НН становить:

$$I_{НОМ}^{НН} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}^{НН}}, \quad I_{НОМ}^{ВН} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 346,4 \text{ А.} \quad (2.16)$$

Визначимо розрахункове значення первинного струму трансформаторів струму на стороні низької напруги:

$$I_{1РОЗ}^{ТА2} = K_{СХ} \cdot I_{НОМ}^{НН}, \quad I_{1РОЗ}^{ТА2} = 1 \cdot 346,4 = 346,4 \approx 400 \text{ А.} \quad (2.17)$$

Стандартне значення первинного струму трансформаторів на стороні низької напруги становить 400 А, коефіцієнт трансформації $K_I = 400/5$. Для цих умов обираємо трансформатор струму типу ТОЛ10-1-1.

Вибір вимірювальних трансформаторів напруги. Вибір вимірювальних трансформаторів напруги проводиться з урахуванням наступних умов:

- за напругою:

$$U_{НОМ} \geq U_{УСТ.НОМ}; \quad (2.18)$$

- за вторинним навантаженням [8]:

$$S_{НОМ} \geq S_{2\Sigma}. \quad (2.19)$$

Для приєднання лічильників потужності 100 ВА обираємо трансформатор напруги типу НАМІ-10, що належить до класу точності 0,5. Параметри вторинного навантаження обраного трансформатора наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Вторинне навантаження трансформатора напруги

Пристрій	Тип	$S_{обм}, \text{ВА}$	$n_{обм}$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$P, \text{Вт}$	$Q, \text{ВАр}$
Вольтметр	Е335	2	1	1	0	2	–
Ватметр	Д335	1,5	2	1	0	3	–
Варметр	Д335	1,5	2	1	0	3	–
Д-ч активної пот-і	Е829	10	–	1	0	10	–
Л-ник активної енергії	230 ART	2	2	0,38	0,92	4	–
Ватметр	Д305	2	2	1	0	4	10
Частотомір	Е371	3	1	1	0	3	–
Загалом						40	10

Визначимо потужність приладів, що підключаються до трансформатора напруги:

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad S_2 = \sqrt{40^2 + 10^2} = 41,2 \text{ ВА.} \quad (2.20)$$

Відтак, $S_2 = 41,2 < 100 \text{ ВА}$, трансформатор буде працювати у вибраному класі точності.

3 РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ГОЛОВНОЇ ПОНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІ

Пристрої захисту та автоматики повинні виконувати визначені функції, які забезпечують надійну роботу електроенергетичних систем. Для релейного захисту основним завданням є спрацювання у випадку пошкодження елемента, який перебуває під захистом, та відсутність спрацювання при коротких замиканнях, які виникають поза межами цієї ділянки мережі [15].

З метою зменшення ймовірності відмов релейному захисту надають певних експлуатаційних властивостей. До основних з них належать селективність, стійкість та надійність функціонування. Надійна робота релейного захисту забезпечується виконанням таких вимог:

- дотримання селективності, тобто відключення лише пошкоджених ділянок мережі. Час спрацювання захисту визначається витримкою часу, яка забезпечує вибірковість дії;
- достатня чутливість до всіх можливих видів пошкоджень на захищеній лінії та на лініях, які живляться від неї. Ця властивість оцінюється коефіцієнтом чутливості;
- спрощеність схем із мінімальною кількістю апаратури за умови забезпечення необхідної швидкодії та надійності;
- наявність систем сигналізації, які повідомляють про несправності у колах живлення пристроїв релейного захисту.

Релейний захист реалізується за допомогою реле різних типів. Реле, які застосовуються у системах захисту, класифікуються за такими ознаками:

- за способом впливу на відмикання – реле прямої та непрямої дії;
- за принципом роботи – електромагнітні, електродинамічні, теплові, електронні та інші;
- за контрольованим параметром – струмові, напругові, потужності, теплові тощо.

Пристрої релейного захисту силових трансформаторів призначені для забезпечення захисту від основних видів пошкоджень.

3.1 Проектування диференційного захисту трансформатора головної понижувальної підстанції

Для запобігання пошкодженням трансформатора при міжфазних коротких замиканнях, замиканнях на землю, а також при міжвиткових дефектах в одній із фаз, широко застосовується поздовжній диференційний захист. Його робота ґрунтується на зіставленні значень та напрямків струмів на вході та виході об'єкта захисту – трансформатора. Для реалізації такого захисту передбачається використання диференційних реле типу РНТ-565.

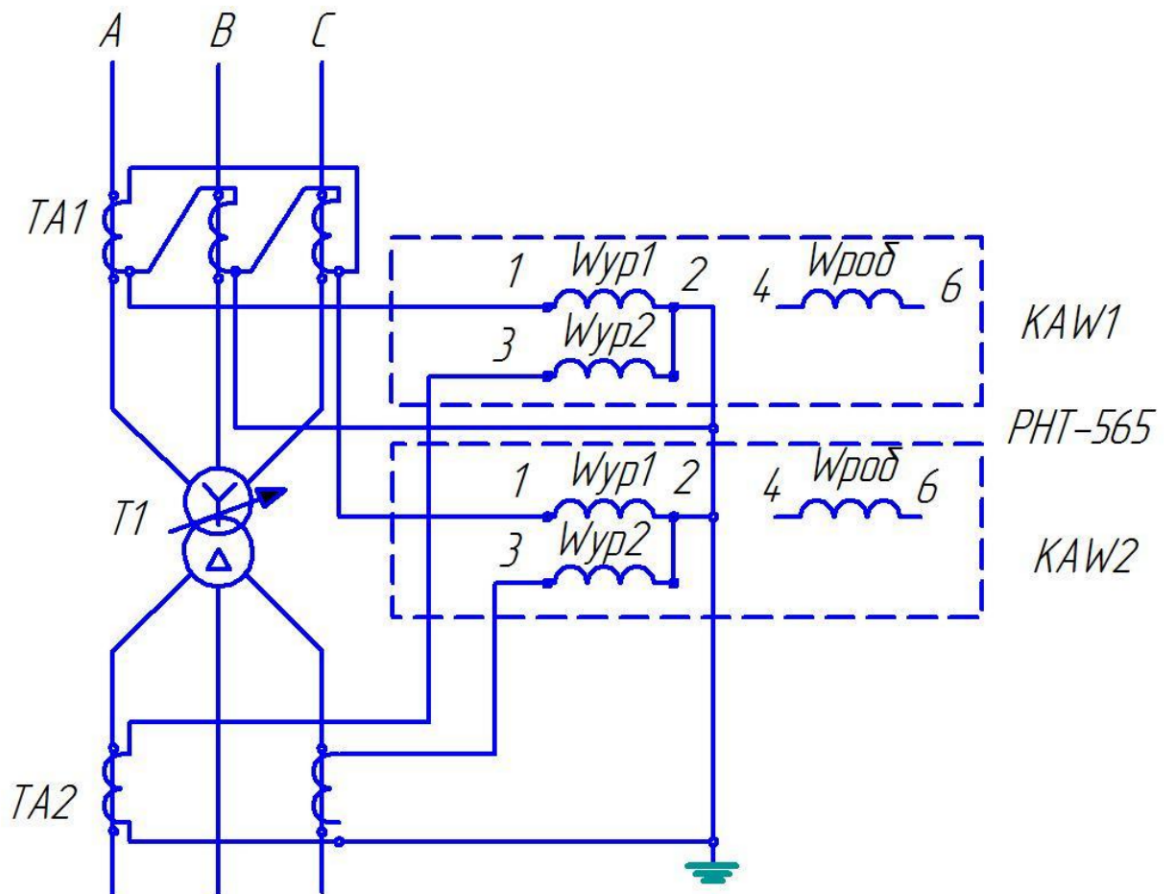


Рисунок 3.1 – Розроблена схема релейного захисту трансформатора

Дане реле містить виконавчий елемент, виконаний на основі реле типу РТ-40, а також тристрижневий швидконасихувальний трансформатор з розміщеними на ньому робочою, зрівнювальною, короткозамкненою та вторин-

ною обмотками. Обмотки, за винятком вторинної, оснащені відводами для налаштування параметрів реле. Реле РТ-40 та трансформатор БПТ змонтовані в спільному корпусі. Далі визначимо величину вторинного струму у колі релейного захисту для трансформатора струму ТА1.

$$i_2^{\partial TA1} = I_{НОМ}^{ВН} \cdot \frac{K_{сх}}{K_I}, \quad i_2^{\partial TA1} = 103,9 \cdot \frac{\sqrt{3}}{200/5} = 4,5 \text{ А.} \quad (3.1)$$

Проведемо розрахунок значення вторинного струму в контурі релейного захисту для ТА2 [16]:

$$i_2^{\partial TA2} = 346,4 \cdot \frac{1}{400/5} = 4,33 \text{ А.}$$

Оскільки $i_2^{\partial TA1} > i_2^{\partial TA2}$, то сторона ВН буде основною.

Далі проведемо розрахунок струму, при якому відбувається спрацювання захисту:

$$i_{сзI}^{поперед} = K_H \cdot I_{НОМ}^{ВН}, \quad i_{сзI}^{поперед} = 1,3 \cdot 103,9 = 135,1 \text{ А,} \quad (3.2)$$

де K_H – коефіцієнт надійності.

$$I_{сзII}^{предв.} = K_H \cdot I_{нб}, \quad (3.3)$$

де $I_{нб}$ – струм небалансу.

$$I_{нб} = I'_{нб} + I''_{нб} + I'''_{нб}, \quad (3.4)$$

де $I'_{нб}$ – частина струму, яка виникає внаслідок неточності трансформатора струму; $I''_{нб}$ – частина струму, яка виникає внаслідок регулювання параметрів трансформатора, який захищається; $I'''_{нб}$ – частина струму, яка пов'язана з процесом вирівнювання струмів у плечах схеми захисту.

$$I'_{нб} = K_o \cdot K_a \cdot f_i \cdot I_{ВН \max K-2}^{(3)}, \quad I'_{нб} = 1 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 1049,4 = 157,4 \text{ А,} \quad (3.5)$$

де K_o – коефіцієнт однотипності ТС, $K_o = 1$; K_a – коефіцієнт, який враховує аперіодичну складову; f_i – припустима похибка ТТ, $f_i = 0,1$; $I_{ВН \max K-2}^{(3)}$ – струм у точці K_2 приведений до високої сторони.

$$I''_{нб} = \Delta U_{рег} \cdot I_{ВН \max K-2}^{(3)}, \quad I''_{нб} = \frac{9 \cdot 1,78}{100} \cdot 1049,4 = 165,28 \text{ А,} \quad (3.6)$$

де $\Delta U_{рез}$ – відносна похибка, зумовлена регулюванням напруги.

На першому етапі розрахуємо первинний струм спрацювання релейного захисту з урахуванням вимоги відбудови від максимального струму небалансу:

$$I_{нб} = I_{нб}^I + I_{нб}^{II}, \quad I_{нб} = 157,41 + 165,28 = 322,69 \text{ А}, \quad I_{сзII}^{предв.} = 1,3 \cdot 322,69 = 419,5 \text{ А}. \quad (3.7)$$

Оскільки, $I_{сзI}^{предв.} < I_{сзII}^{предв.}$, то для подальших обчислень приймаємо більше значення струму спрацювання захисту $I_{сз} = 419,5 \text{ А}$.

Здійснимо попередню перевірку рівня чутливості релейного захисту:

$$K_q = \frac{I_{кз.min K-1}^{(2)}}{I_{сз}} \geq 2, \quad I_{кз.min K-1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз,K-1}^{(3)}; \quad (3.8)$$

$$I_{кз.min K-1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2277 = 1971,94 \text{ А}, \quad K_q = \frac{1971,94}{419,5} = 4,7 > 2.$$

Далі обчислимо величину струму, при якій реле спрацює [17]:

$$I_{сп} = I_{сз} \cdot \frac{K_{сх}}{K_{1осн}}, \quad I_{сп} = 419,5 \cdot \frac{\sqrt{3}}{200/5} = 18,16 \text{ А}; \quad (3.9)$$

$$I_{нб}^{III} = \frac{|\omega_{ур1}^{розр} - \omega_{ур1}^{см}|}{2} \cdot I_{ВН \max K-2}^{(3)}, \quad (3.10)$$

де $\omega_{ур1}^{розр}$, $\omega_{ур1}^{см}$ – кількість витків зрівнювальної обмотки, обрана за розрахунком та стандартом, відповідно.

Кількість витків основної обмотки за розрахунком становить:

$$\omega_{осн.розр} = \frac{F_{сп}}{I_{сп.осн}}; \quad (3.11)$$

$$\omega_{осн.розр} = \frac{100}{18,16} = 5,51 \text{ шт},$$

де $F_{сп}$ – магніторушійна сила спрацювання реле, при якій реле приводиться в дію.

Визначимо стандартне значення, округливши його до меншого цілого числа $\omega_{осн} = 5 \text{ шт}$.

Далі визначимо кількість витків зрівнювальної обмотки за розрахунком:

$$\omega_{ур1}^{роз} = \frac{i_2^{\partial,осн}}{i_2^{\partial,неосн}} \cdot \omega_{осн}^{см}; \quad (3.12)$$

$$\omega_{yp1}^{роз} = \frac{4,5}{4,33} \cdot 5 = 5,2 \text{ шт.}$$

Стандартне значення кількості витків зрівнювальної обмотки обчислюється з округленням до найближчого цілого числа $\omega_{yp1} = 5$.

Обчислюємо частину первинного струму небалансу, що виникає внаслідок округлення розрахункової кількості витків неосновної сторони [18]:

$$I_{нб}^{///} = \frac{|5,2 - 5|}{5,2} \cdot 1049,4 = 40,3 \text{ А,}$$

$$I_{нб} = 157,4 + 165,2 + 40,3 = 363 \text{ А.}$$

Далі уточнимо струм спрацювання захисту на основній стороні трансформатора:

$$I_{сз} = 1,3 \cdot 363 = 472 \text{ А.}$$

Виконуємо уточнення значення коефіцієнта чутливості захисту:

$$K_{\psi} = \frac{1971,94}{472} = 4,18 > 2.$$

Можна зробити висновок, що захист відповідає всім необхідним умовам експлуатації.

3.2 Захист від симетричних надструмів при зовнішніх КЗ

Як засіб захисту від надструмів при зовнішніх коротких замиканнях застосовується максимальний струмовий захист з пуском мінімальної напруги (МСЗ) на базі реле РТ-40. Величина струму спрацювання захисту на високій напрузі становить:

$$I_{сз} = \frac{K_n \cdot K_{с.з.}}{K_{\phi}} \cdot I_{ном}^{ВН} \cdot 1,4, \quad I_{сз} = \frac{1,3 \cdot 1,1}{0,85} \cdot 103,9 \cdot 1,4 = 244,7 \text{ А,} \quad (3.13)$$

де K_n – коефіцієнт надійності ($K_n = 1,3$); $K_{с.з.}$ – коефіцієнт само запуску ($K_{с.з.} = 1,1$); K_{ϕ} – коефіцієнт повернення ($K_{\phi} = 0,85$).

Далі обчислимо величину струму, при якій реле спрацює:

$$I_{cp} = I_{c3} \cdot \frac{K_{cx}}{K_I}, \quad I_{cp} = 244,7 \cdot \frac{1}{150/2} = 8,1 \text{ А.} \quad (3.14)$$

Далі обчислимо напругу, при якій спрацювує захист:

$$U_{c3} = 0,7 \cdot U_{ном}^{BH}, \quad U_{c3} = 0,7 \cdot 35 = 24,5 \text{ кВ.} \quad (3.15)$$

Напруга спрацювання реле визначається як:

$$U_{cp} = \frac{U_{c3}}{K_U}, \quad U_{cp} = \frac{24500}{\frac{35000}{100}} = 70 \text{ В.} \quad (3.16)$$

Час спрацювання захисту $t_{c3} = 0,5 \text{ с.}$

Коефіцієнт чутливості струму МСЗ з пуском мінімальної напруги визначається як:

$$K_q^I = \frac{I_{\min K-2}^{(2)}}{I_{c3}} \geq 1,5, \quad (3.17)$$

де $I_{\min K-2}^{(2)}$ – двофазний струм КЗ в точці К2, приведений до сторони ВН.

$$I_{\min K-2}^{(2)} = I_{\max K-2}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad I_{\min K-2}^{(2)} = 1049,4 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 908,8 \text{ А, } K_q^I = \frac{908,8}{244,7} = 3,71 > 1,5. \quad (3.18)$$

Коефіцієнт чутливості за напругою МСЗ з пуском мінімальної напруги визначається як:

$$K_q^U = \frac{U_{c3} \cdot K_B}{U_{осн.K-2}^{(3)BH}}, \quad (3.19)$$

Залишкова напруга на високій стороні трансформатора при трифазному КЗ у точці К2 визначається як:

$$U_{осн.K-2}^{(3)BH} = \sqrt{3} \cdot I_{\min.K-2}^{(2)BH} \cdot x_m, \quad (3.20)$$

де x_m – опір трансформатора.

$$x_m = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_{ном}^{BH})}{S_{ном}}, \quad x_m = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{35^2}{6,3} = 14,58; \quad (3.21)$$

$$U_{осн.K-2}^{(3)BH} = \sqrt{3} \cdot 908,8 \cdot 14,5 = 22955,7 \text{ В, } K_q^U = \frac{24500 \cdot 1,25}{22955,7} = 1,51 > 1,5.$$

Можна зробити висновок, що захист має необхідний коефіцієнт чутливості.

3.3 Струмівий захист від перевантаження трансформатора

Для захисту від перевантажень передбачено максимальний струмовий захист на базі реле РТ-40. Це реле встановлюється на одну фазу, оскільки перевантаження трансформатора, як правило, є симетричним. Далі обчислюємо струм спрацювання захисту на високій стороні:

$$I_{сз} = \frac{K_n}{K_g} \cdot 1,4 \cdot I_{ном}^{BH}, \quad I_{сз} = \frac{1,05}{0,85} \cdot 1,4 \cdot 103,9 = 179,7 \text{ А}, \quad (3.22)$$

де K_n – коефіцієнт надійності (для цього захисту становить 1,05).

Далі обчислюємо струм спрацювання реле:

$$I_{сп} = 179,7 \cdot \frac{1}{150/5} = 5,99 \text{ А}.$$

Захист від перевантаження не перевіряється на чутливість. Він буде реалізований з двома уставками за часом. Перша уставка тривалістю $t'_{сз} = 9 - 10$ с діє на сигнал. Друга уставка тривалістю $t''_{сз} = 30 - 40$ с діє на відмикання вимикача.

3.4 Захист від внутрішніх пошкоджень у трансформаторі

Обмотки більшості силових трансформаторів розміщуються всередині герметичного бака, заповненого трансформаторною оливою. Олива виконує подвійну функцію: забезпечує електричну ізоляцію струмопровідних частин та сприяє відведенню тепла під час роботи трансформатора. У разі виникнення внутрішнього короткого замикання, що супроводжується появою електричної дуги, або навіть при значному перегріванні обмоток, відбувається розкладання оливи з утворенням газів. Саме це явище покладено в основу дії газового захисту трансформатора [19].

Газовий захист реалізується за допомогою спеціального газового реле, яке монтується у трубопроводі між баком трансформатора та розширювачем. Конструктивно реле являє собою корпус із двома поплавковими елементами, оснащеними ртутними контактами, що замикаються при зміні положення поплавків. Обидва поплавки шарнірно закріплені на вертикальній стійці: один розташований у верхній частині реле, інший – у середній зоні.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій

Розробка та вживання ефективних заходів запобігання аварійним і травмонебезпечним ситуаціям можливі лише при завчасному виявленні тих небезпек, з яких починаються процеси їх формування. Оскільки небезпечні умови не завжди завчасно можна виявити, а для вивчення небезпечних дій іноді потрібно багато часу, щоб зібрати статистичний матеріал, то і методи виявлення цих небезпек повинні бути відповідно диференційовані [20].

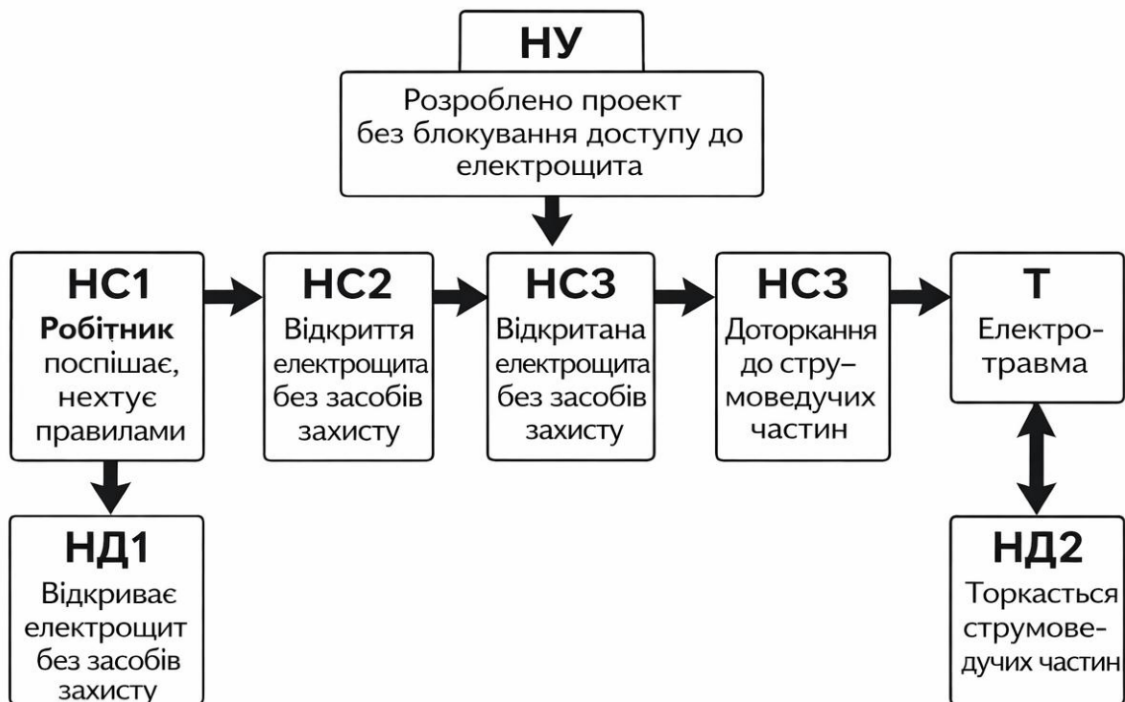


Рисунок 4.1 – Аналіз процесу формування небезпечної ситуації при доступі до електрощита на заводі середнього машинобудування: НУ – небезпечна умова (розроблено проект без блокування доступу до електрощита); НС1 – небезпечна ситуація 1 (робітник поспішає, нехтує правилами); НД1 – небезпечна дія 1 (відкриває електрощит без засобів захисту); НС2 – небезпечна ситуація 2 (торкається струмове-дучих частин); Т – травма.

На рисунку 4.1 представлено схему аналізу процесу формування небезпечної ситуації при проведенні ремонту устаткування підстанції. Бачимо, що при виникненні усіх описаних чинників виникне травма. У даному випадку

ку основним заходом запобігання небезпечної ситуації є проведення додаткових інструктажів із техніки безпеки.

4.2 Аналіз та обґрунтування технічних заходів електробезпеки в системі електропостачання заводу

Система електропостачання заводу середнього машинобудування належить до об'єктів підвищеної небезпеки, оскільки в процесі експлуатації електроустановок можливе виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів, зокрема ураження електричним струмом, термічні опіки, електричні дуги та пожежі. Результати структурно-функціонального аналізу, наведені в підрозділі 4.1, свідчать, що основними причинами формування небезпечних ситуацій є наявність напруги на струмоведучих частинах, порушення ізоляції, помилки персоналу та недосконалість технічних рішень.

З метою запобігання ураженню електричним струмом у системі електропостачання заводу передбачено комплекс технічних заходів електробезпеки, які відповідають вимогам ПУЕ, ДСТУ та чинних нормативних документів з охорони праці [21].

Виробничі та допоміжні приміщення заводу відносяться до приміщень з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних, оскільки характеризуються наявністю металевих конструкцій, струмопровідних підлог, можливим підвищеним рівнем вологості та запиленості. Це зумовлює необхідність застосування посиленних технічних заходів електрозахисту.

Одним із основних заходів електробезпеки є захисне заземлення відкритих провідних частин електрообладнання, які можуть опинитися під напругою в разі пошкодження ізоляції. Захисне заземлення забезпечує зменшення напруги дотику до безпечних значень та створює умови для надійного спрацювання апаратів захисту. У системі електропостачання заводу зазем-

ленню підлягають корпуси електродвигунів, розподільчих щитів, металеві оболонки кабелів, трансформатори та інше електрообладнання.

Для швидкого усунення аварійних режимів у системі електропостачання застосовується автоматичне відключення живлення при виникненні коротких замикань або струмів витоку. Цей захід реалізується за допомогою автоматичних вимикачів, запобіжників та пристроїв захисного відключення (ПЗВ). Автоматичне відключення значно зменшує тривалість дії небезпечної напруги та ймовірність ураження персоналу електричним струмом.

З метою зменшення різниці потенціалів між металевими частинами обладнання в електроустановках заводу передбачено систему вирівнювання потенціалів. Вона включає з'єднання між собою заземлених частин обладнання, металевих конструкцій будівель, трубопроводів та інших провідних елементів. Це дозволяє знизити напругу дотику і кроку до допустимих значень.

Струмоведучі частини електроустановок виконуються з надійною ізоляцією та розміщуються в закритих розподільчих пристроях або захищаються суцільними та сітчастими огороженнями. Конструкція огорожень унеможливує випадковий доступ персоналу до частин, що перебувають під напругою, та зменшує ризик виникнення небезпечних ситуацій.

У місцях з підвищеною безпекою ураження електричним струмом, зокрема під час ремонтних та налагоджувальних робіт, передбачається використання пониженої напруги живлення ручного електроінструменту та переносних світильників. Це є додатковим технічним заходом, спрямованим на підвищення рівня електробезпеки.

Таким чином, застосування комплексу технічних заходів електробезпеки дозволяє суттєво знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій у системі електропостачання заводу та забезпечити безпечні умови праці персоналу. Ключовим елементом цієї системи є захисне заземлення, розрахунок якого наведено в наступному підрозділі.

4.3 Розрахунок заземлення

Захисне заземлення – це спеціальне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металевих струмонепровідних частин, на яких може з'явитися напруга. Основне призначення захисного заземлення – запобігти ураженню електричним струмом при дотиканні до корпусу та інших струмонепровідних частин електроустановки, на яких з'явилася напруга. Заземлюють усі металеві струмопровідні частини електрообладнання, на яких внаслідок несправностей ізоляції може з'явитися напруга і до яких можливе дотикання людей або тварин. Принципом дії захисного заземлення пояснюється зниженням напруги між корпусом, на якому вона з'явилася, і землею до безпечного рівня.

Заземлювачі, що застосовуються для заземлення електроустановок, бувають штучні (виключно для заземлення) і природні (металеві предмети, що знаходяться в землі і мають інше призначення). Для штучних заземлювачів застосовують вертикальні і горизонтальні електроди. Вертикальні електроди (стержні) виготовляють із сталевих прутків діаметром 10 – 20 мм, кутової сталі розміром від 40x40 до 60x60 мм і сталевих труб діаметром 30 – 50 мм, довжиною 2,5 – 3 м. Вертикальні електроди з'єднують між собою сталюю штабою розмірами 4x12 мм або круглою – діаметром не менше як 6 мм, яку застосовують також як самостійний заземлювач. Опір заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 – 10 Ом залежно від характеру заземлення і конструкції електричних установок. З'єднання заземлюючих провідників виконують за допомогою зварювання.

Розрахуємо заземлюючий контур підстанції із глухозаземленою нейтраллю. Характер ґрунту – чорнозем з $\rho = 0,4 \cdot 10^4$ Ом·см, кліматична зона – Ш ($K_c = 1,4$, $K_n = 2$). Струм замикання на землю у мережі становить 30 мА.

Згідно з правилами, опір заземлюючого пристрою повинен становити

$$R = \frac{125}{I_3} = \frac{125}{30} = 4,2 \text{ Ом}, \quad (4.1)$$

де I_3 – струм замикання на землю, мА.

Приймаємо $R = 4$ Ом. Контур заземлення розміщуємо в ряд з $a = 5$ м, $l = 2,5$ м. Е якості стержневого заземлювача приймаємо кутникову сталь 60х60х6 мм, а протяжного – пластинчасту сталь 40х4 мм.

Обчислюємо опір одиничного стержня

$$R_o = 0,00318 \cdot \rho \cdot K_c, \quad R_o = 0,00298 \cdot 0,4 \cdot 10000 \cdot 1,4 = 16,7 \text{ Ом}, \quad (4.2)$$

де K_c – коефіцієнт сезонності для стержневого заземлювача ($K_c = 1,4$).

Число стержнів приймаємо 10. При цьому коефіцієнт використання стержневих заземлювачів становить $\eta_c = 0,75$. Опір усіх стержнів розтікання струму становить [21]:

$$R_c = \frac{R_o}{n \cdot \eta_c}, \quad R_c = \frac{16,7}{10 \cdot 0,75} = 2,2 \text{ Ом}, \quad (4.3)$$

де: n – число стержнів, шт.

Довжина протяжного заземлювача становить $l = 35$ м (3500см); приймаємо $t = 50$ см, $b = 0,4$ см.

Обчислюємо опір протяжного заземлювача

$$R_{np} = \frac{0,366}{l} \cdot \rho \cdot 2 \cdot \lg \frac{2 \cdot l^2}{t \cdot b}, \quad R_{np} = \frac{0,366}{5000} \cdot 0,4 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot \lg \frac{2 \cdot 3500^2}{50 \cdot 0,4} = 2,6 \text{ Ом}. \quad (4.4)$$

Приймаємо 3 Ом. Коефіцієнт використання протяжного заземлювача $\eta_n = 0,75$. Дійсний опір протяжного заземлення становить:

$$R_n = \frac{R_{np}}{\eta_n} = \frac{2}{0,75} = 4 \text{ Ом}. \quad (4.5)$$

Опір всього заземлюючого пристрою становить:

$$R_u = \frac{R_c \cdot R_n}{R_c + R_n} = \frac{2,2 \cdot 3}{2,2 + 4} = 1,4 < 4 \text{ Ом}. \quad (4.6)$$

Відповідно кількість стержнів вибрана правильно.

4.4 Організаційні та пожежно-профілактичні заходи з охорони праці

Безпечна експлуатація системи електропостачання заводу середнього машинобудування забезпечується не лише технічними рішеннями, але й комплексом організаційних та пожежно-профілактичних заходів. Їх впровадження спрямоване на запобігання виробничому травматизму, пожежам та аварійним ситуаціям під час експлуатації електроустановок.

До організаційних заходів належать заходи, що регламентують порядок виконання робіт та поведінку персоналу під час обслуговування електроустановок. На підприємстві передбачається допуск до роботи з електрообладнанням лише працівників, які пройшли відповідне навчання, перевірку знань правил охорони праці та мають встановлену групу з електробезпеки.

Перед початком робіт проводяться вступний, первинний та повторний інструктажі з охорони праці. Для виконання ремонтних, налагоджувальних та аварійних робіт застосовується нарядно-допускна система, що дозволяє контролювати умови безпеки та відповідальність персоналу. Особлива увага приділяється дотриманню режимів експлуатації електрообладнання та забороні виконання робіт під напругою без спеціальних технічних засобів і дозволів.

Для зменшення впливу людського фактора передбачається використання попереджувальних написів, знаків безпеки та сигнального маркування електрообладнання, що інформують персонал про наявність небезпеки ураження електричним струмом [22].

Працівники, які обслуговують систему електропостачання, забезпечуються необхідними засобами індивідуального захисту: діелектричними рукавицями, килимками, інструментом з ізольованими ручками, захисним спецодягом. Використання ЗІЗ є обов'язковим під час виконання робіт у зонах з підвищеною небезпекою та при проведенні ремонтних операцій.

Електроустановки є потенційним джерелом виникнення пожеж внаслідок коротких замикань, перевантажень та пошкодження ізоляції. Тому в системі електропостачання заводу передбачено комплекс пожежно-профілактичних заходів. До них належать правильний вибір та монтаж електрообладнання, застосування кабелів з негорючою або малодимною ізоляцією, а також регулярний контроль стану електричних мереж.

Приміщення електрощитових та трансформаторних підстанцій обладнуються первинними засобами пожежогасіння, зокрема порошковими та вуглекислотними вогнегасниками. Забороняється використання водяних засобів пожежогасіння для ліквідації загорянь електрообладнання, що перебуває під напругою. У виробничих приміщеннях забезпечується вільний доступ до евакуаційних виходів та пожежних проходів.

У разі виникнення аварійних режимів або пожежі персонал зобов'язаний негайно знеструмити пошкоджену ділянку електромережі, повідомити відповідальні служби та діяти відповідно до інструкцій з охорони праці та пожежної безпеки. Регулярне проведення навчальних тренувань дозволяє зменшити час реагування та мінімізувати наслідки аварійних ситуацій.

Таким чином, організаційні та пожежно-профілактичні заходи є невід'ємною складовою системи охорони праці та забезпечують безпечну експлуатацію системи електропостачання заводу середнього машинобудування у поєднанні з технічними засобами електробезпеки.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

У кваліфікаційній роботі здійснюється розробка підприємства середнього машинобудування. Відповідно до обраної спеціальності основну увагу приділено розрахунку та обґрунтуванню схеми електропостачання. Метою цього розділу є оцінювання ресурсоефективності та конкурентоспроможності проєктованого підприємства. Для досягнення поставленої мети буде виконано аналіз конкурентного середовища, проведено SWOT-аналіз, здійснено планування робіт з розрахунку електротехнічної частини проєкту, а також визначено загальний бюджет витрат [23].

Роботи з реалізації проєктних розрахунків виконувалися групою кваліфікованих фахівців у складі двох осіб – керівника та інженера.

5.1 Аналіз комерційного потенціалу

Розроблюване підприємство може бути перспективним для широкого кола споживачів, зокрема організацій, які здійснюють діяльність у промисловій сфері, аграрному секторі, будівництві, а також у сфері роздрібно́ї торгівлі. Крім того, продукція підприємства може становити інтерес і для приватних споживачів. Відтак, можна стверджувати, що даний проєкт має значний комерційний потенціал.

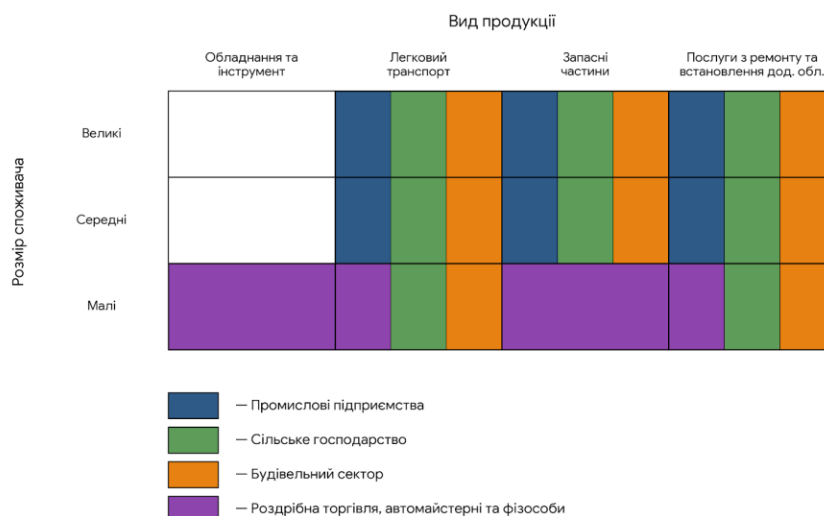


Рисунок 5.1 – Карта сегментації ринку

Для детального аналізу споживачів потрібно визначити цільовий ринок та виконати його сегментацію. Сегментування здійснюється за двома основними ознаками – масштабом споживача та типом продукції, яка випускається. Карта сегментації ринку представлена на рисунку 5.1.

З карти сегментації бачимо, що кожен вид продукції має свого цільового споживача, незалежно від розміру підприємства. Малі компанії та приватні особи зацікавлені у придбанні всього спектру виробленої продукції. Великі та середні компанії переважно орієнтовані на купівлю автомобілів та їх кваліфіковане обслуговування.

5.2 Аналіз конкурентних технічних рішень

Детальний аналіз конкурентних підприємств, які діють на ринку, необхідно здійснювати систематично, оскільки ринки перебувають у постійному розвитку. Такий аналіз дає змогу своєчасно вносити корективи у виробничі процеси, підвищуючи здатність підприємства ефективно протистояти конкурентам. Важливо об'єктивно оцінювати сильні та слабкі сторони розробок конкурентів.

Аналіз конкурентних технічних рішень з точки зору ресурсоефективності та енергозбереження дає змогу визначити порівняльну ефективність наукових розробок та виявити напрями для її подальшого підвищення. Критерії для порівняння та оцінки ресурсоефективності обираються на основі технічних та економічних особливостей об'єктів порівняння, включаючи стадії розробки, створення та експлуатації.

Позиція розробки та конкурентів оцінюється експертним методом за п'ятибальною шкалою, де 1 відповідає найслабшій позиції, а 5 – найсильнішій. Ваги показників, визначені експертним шляхом, сумарно дорівнюють 1. На основі цих оцінок формується комплексний аналіз конкурентних технічних рішень.

$$K = \Sigma(B_i \cdot B_i), \quad (5.1)$$

де K – конкурентоспроможність конкурента; B_i – вага показника у долях одиниці; B_i – оцінка за i -м показником.

У таблиці 5.1 представлено оцінювальну карту для порівняння конкурентних технічних рішень. Порівняння здійснювалося з підприємствами-конкурентами, які найбільше близькі за асортиментом до продукції, яка буде випускатися розроблюваним підприємством.

Таблиця 5.1 – Оцінювальна карта

Критерій оцінки	Вага критерію	Бали			Конкурентоспроможність		
		B_{ϕ}	B_{K1}	B_{K2}	K_{ϕ}	K_{K1}	K_{K2}
Технічні критерії							
1. Підвищення результативності праці	0,05	4	2	2	0,2	0,1	0,1
2. Надійність	0,05	4	2	3	0,2	0,1	0,15
3. Безпека	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
4. Функціональна потужність	0,2	5	2	3	1	0,4	0,6
5. Енергоефективність	0,15	5	4	2	0,75	0,6	0,3
6. Сучасна елементна база	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15
Економічні критерії							
1. Конкурентоспроможність продукту	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
2. Рівень проникнення на ринок	0,05	4	1	4	0,2	0,05	0,2
3. Ціна	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2
4. Прийнятий термін експлуатації	0,15	4	3	4	0,6	0,45	0,6
5. Наявність сертифіката продукції	0,05	5	4	4	0,3	0,2	0,2
Всього	1	49	32	36	4,65	3,0	3,15

За результатами здійснених розрахунків встановлено, що проєктоване підприємство є конкурентоспроможним у порівнянні з підприємствами аналогічного профілю. Найбільш суттєві переваги проявляються у високому рівні енергоефективності та функціональної потужності, а також у ширшому асортименті сертифікованої продукції. Водночас слід зазначити, що продукція даного підприємства характеризується вищою вартістю порівняно з продукцією основних конкурентів.

5.3 Планування та обчислення вартості розрахунків

З метою виконання розрахунку витрат на розроблення системи електропостачання об'єкта у встановлені терміни та з мінімальними фінансовими затратами складається план-графік, у якому визначається поетапна трудомісткість усіх робіт [24]. Після оцінки трудомісткості кожного етапу встановлюється кількість виконавців, залучених до виконання робіт за окремими стадіями (таблиця 5.2).

На основі даних таблиці 5.2 формується календарний план-графік (рис. 5.2), який відображає максимальну тривалість виконання робіт у межах науково-дослідного проєкту. Відповідно до побудованої діаграми можна зробити висновок, що загальна тривалість виконання технічного проєкту становить 74 днів.

Таблиця 5.2 – План розробки та виконання етапів проєкту

№	Вид роботи	Виконавець	Тривалість, дн	Заробітна плата, грн
1	Ознайомлення з виробничою документацією. Формулювання та постановка завдань працівникам.	Керівник Інженер	2	4000 2500
2	Розрахунок електричних навантажень по цеху	Інженер	5	6250
3	Розрахунок електричних навантажень по заводу	Інженер	8	10000
4	Побудова картограми електричних навантажень	Інженер	2	2500
5	Вибір трансформаторів та компенсаційних пристроїв	Інженер	5	6250
6	Вибір трансформаторів ГПП	Інженер	3	3750
7	Розрахунок внутрішньозаводської мережі	Керівник Інженер	1 10	2000 12500
8	Розрахунок струмів КЗ	Інженер	2	2500
9	Вибір обладнання	Інженер	2	2500
10	Розрахунок релейного захисту	Інженер	1	1250

11	Укладання розрахунково-пояснювальної записки	Керівник	3	6000
		Інженер	18	22500
12	Креслярські роботи	Інженер	2	4000
			16	20000
Всього				108500

На рисунку 5.2 представлено на основі таблиці 5.2 діаграму Ганта виконання розрахункових робіт при розробленні системи електропостачання заводу середнього машинобудування.

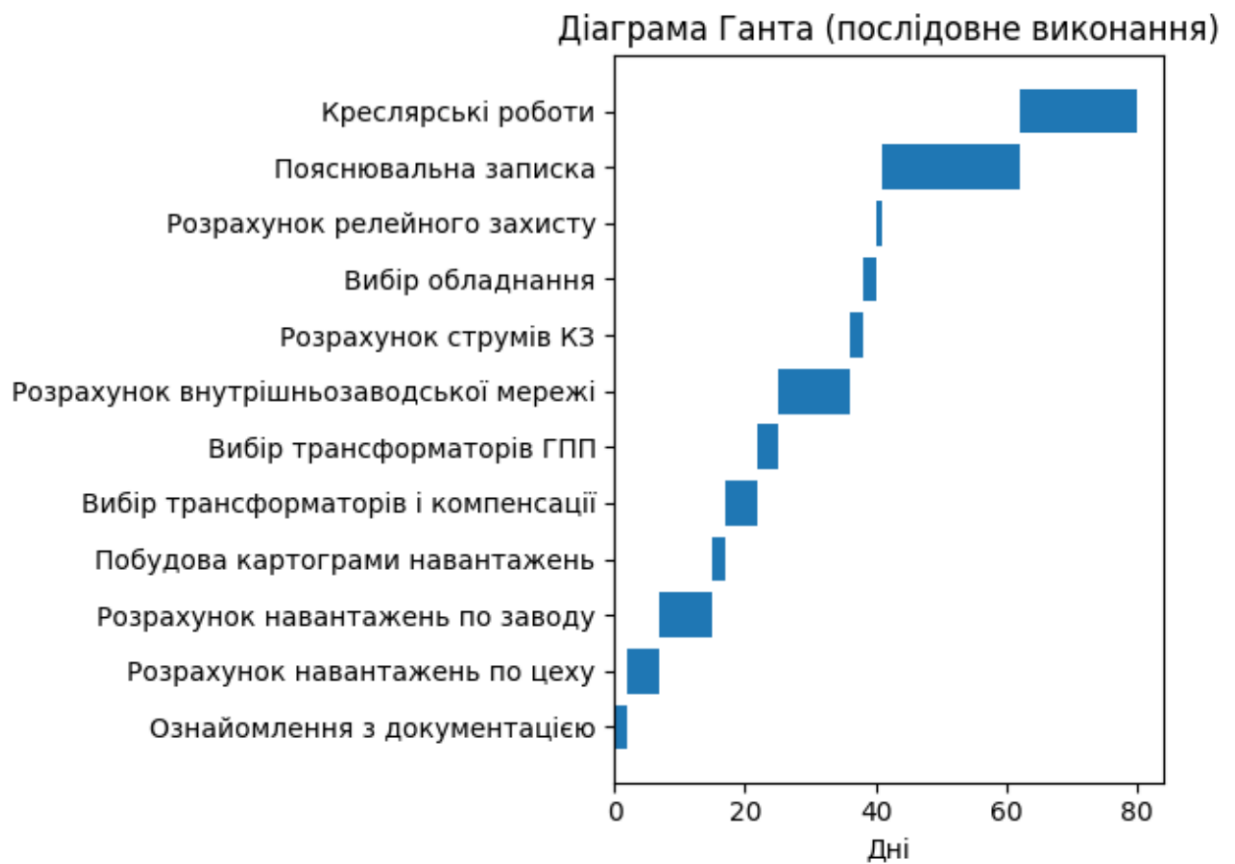


Рисунок 5.2 – Діаграма Ганта виконання розрахункових робіт

Отримані в цьому розділі результати дають змогу перейти до узагальнення матеріалів кваліфікаційної роботи у цілому. Запропоновані підходи до оцінювання ресурсоефективності, конкурентних переваг та планування реалізації проєкту доповнюють технічну частину дослідження та формують цілісне уявлення про доцільність упровадження розробленої системи електропостачання на підприємстві середнього машинобудування.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено та обґрунтовано систему електропостачання заводу середнього машинобудування з урахуванням вимог надійності та енергоефективності. Запропоновані технічні рішення забезпечують оптимальні режими роботи електричної мережі підприємства, зменшення втрат електроенергії та підвищення рівня експлуатаційної безпеки.

1. Встановлено, що коректне визначення електричних навантажень та центрів їх розподілу є основою раціонального проектування системи електропостачання, оскільки дає змогу мінімізувати довжини мереж, втрати потужності та забезпечити доцільне розміщення головної понижувальної підстанції.

2. Доведено, що застосування компенсації реактивної потужності та оптимальний вибір трансформаторних підстанцій і провідників суттєво знижують перевантаження елементів мережі, підвищують коефіцієнт потужності та забезпечують нормативні показники якості електроенергії у системі внутрішнього електропостачання.

3. Показано, що впровадження сучасних пристроїв релейного захисту силових трансформаторів забезпечує високу селективність та чутливість захисту, що є необхідною умовою запобігання розвитку аварійних режимів та підвищення надійності електропостачання споживачів II категорії.

4. Обґрунтовано, що комплекс технічних та організаційних заходів з охорони праці, зокрема розрахунок заземлення і застосування системи вирівнювання потенціалів, дає змогу суттєво знизити ризик ураження електричним струмом і забезпечити відповідність проекту чинним нормативним вимогам електробезпеки.

5. Встановлено, що запропоновані технічні рішення є економічно доцільними, оскільки забезпечують оптимальне співвідношення капітальних витрат та експлуатаційної ефективності, підвищують конкурентоспроможність підприємства і створюють передумови для подальшого розвитку електрогосподарства заводу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник. Вінниця: Нова Книга, 2011. 656 с.
2. Коваленко О. І., Коваленко Л. Р., Мунтян В. О., Радько І. П. Основи електропостачання сільського господарства. Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011. 462 с.
3. Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П. Г. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. Кіровоград: КНТУ, 2015. 287 с.
4. Денисюк С. П., Радиш І. П., Кабацій В. М., Дерев'янко Д. Г. Основи електротехніки та електропостачання. Київ: Кондор, 2012. 216 с.
5. Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Супрун О. Д. Проектування систем електропостачання залізниць. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 291 с.
6. Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Козловський О. А. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання: навч. посіб. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. 272 с.
7. Кулик В. В., Тептя В. В., Бурикін О. Б., Сікорська О. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110–330 кВ: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с.
8. Лук'яненко Ю. В., Остапчук Ж. І., Кулик В. В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. Вінниця: ВДТУ, 2002. 116 с.
9. Василега П. О. Електропостачання. Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. 415 с.
10. Лушкін В. А., Абраменко І. Г., Барбашов І. В., Черкашина В. В., Шутенко О. В. Загальна характеристика та розрахунок режимів розподільних мереж: навчальний посібник. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2013. 193 с.
11. Малинівський С. М. Загальна електротехніка: навчальний посібник. Львів: В-во Нац. у-ту «Львів. політех.», 2001. 596 с.

12. Казанський С. В., Матєєнко Ю. П., Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник. Київ: Вид-во «Політехніка», 2017. 456 с.
13. Правила улаштування електроустановок. Міненерговугілля України, 2017.
14. <https://appr.com.ua/wp-content/uploads/2023/08/1.-elegazovi-vumykachi-1.pdf>
15. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
16. Козярьський Д. П., Майструк Е. В., Козярьський І. П. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с.
17. Махлін П. В., Костенко С. Ю., Кузьменко О. П. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики: навч. посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с.
18. Голота А. Д. Автоматика в електроенергетичних системах. Київ: Вища шк., 2006. 367 с.
19. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем: підручник. Львів: В-во НУ«ЛП», 2013. 533 с.
20. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В. О., Городецький І. М. Охорона праці. Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
21. Бондаренко В. О., Ганус О. І., Старков К. О., Шевченко С. Ю. Охорона праці в електроенергетиці: навчальний посібник. Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2014. 286 с.
22. Лук'янова Л. Основи екології: навч. посіб. Київ: Вища шк., 2000. 327 с.
23. Мірошник О. О., Черкашина В. В., Мороз О. М., Черемісін М. М. Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики. Харків: ФЛП Панов А. Н., 2018. 214 с.
24. Бандурка О. М., Ковальов Є. В., Садиков М. А., Маковоз О. С. Економіка підприємства. Харків: ХНУВС. 2017. 192 с.