

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форми навчання  
Кафедра електроенергетики

Робота допущена до захисту  
Зав. кафедрою електроенергетики

\_\_\_\_\_ І.Л. Лебединський  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 р.

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: «Розрахунок режимів роботи та вибір устаткування електричної мережі»

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконавець роботи: студент гр. ЕТдн-51гл Ю.В. Сисоєва

\_\_\_\_\_  
підпис

Керівник: к.т.н., доцент В.В. Волохін

\_\_\_\_\_  
підпис

Суми 2020

Сумський державний університет

Центр заочної, дистанційної та вечірньої форми навчання

Кафедра електроенергетики

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою електроенергетики

\_\_\_\_\_ І.Л. Лебединський

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

Сисоєвої Юлії Віталіївни

1. Тема роботи: «Розрахунок режимів роботи та вибір устаткування електричної мережі»

затверджена наказом по університету № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

2. Термін здачі студентом закінченої роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: схема з'єднань мережі, довжини ліній, потужності навантажень та категорії надійності споживачів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно вирішити):

- Вступ

- Розрахунок електричної мережі;

- Розрахунок електричної частини підстанції;

- Розрахунок релейного захисту;

- Індивідуальне завдання;

- Висновки.

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

- розрахункова схема електричної мережі;

- схема електричних з'єднань підстанції.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розрахунок електричної мережі	25.04.- 01.05.2020	
2	Розрахунок електричної частини підстанції	02.05.- 12.05.2020	
3	Релейний захист трансформатора	13.05.- 20.05.2020	
4	Оформлення графічного матеріалу	21.05.- 28.05.2020	
5	Оформлення пояснювальної записки	29.05.- 03.06.2020	

Студент- дипломник

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

## РЕФЕРАТ

с. 60, рис. 15, табл. 25, кресл. 2

Бібліографічний опис: Сисоєва Ю.В. Розрахунок режимів роботи та вибір устаткування електричної мережі [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра; спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Ю.В. Сисоєва; наук. керівник В.В. Волохін. – Суми: СумДУ, 2020. – 60 с.

Ключові слова: електрична мережа, схема заміщення, підстанція, силовий трансформатор, вимірювальний трансформатор, вимикач, релейний захист;

электрическая сеть, схема замещения, подстанция, силовой трансформатор, измерительный трансформатор, выключатель, релейная защита;

electrical network, replacement circuit, substation, power transformer, measuring transformer, switch, relay protection.

Короткий огляд – Розраховано нормальний, мінімальний та аварійний режими електричної мережі. Проведено вибір обладнання електричної частини підстанцій, а також комутаційного та вимірювального устаткування. Розраховано струми короткого замикання та обрано релейний захист силового трансформатора. Розглянуто основні вимоги до застосування, монтажу та експлуатації вентильних розрядників.

## ЗМІСТ

1 Розрахунок режимів роботи електричної мережі	5
1.1 Визначення напруги мережі та типу проводів ліній	5
1.2 Вибір потужності трансформаторів	9
1.3 Визначення параметрів схеми заміщення та розрахунок мережі	9
1.4 Розрахунок мінімального режиму електричної мережі	12
1.5 Розрахунок аварійного режиму мережі	21
2 Розрахунок електричної частини підстанції	26
2.1 Перевірка потужності силових трансформаторів	26
2.2 Розрахунок струмів короткого замикання та вибір високовольтних апаратів.	29
2.3. Вибір ошиновки розподільних пристроїв:	33
2.4. Вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги	35
2.5. Обґрунтування схеми електричних з'єднань підстанції.	40
2.6. Вибір трансформаторів власних потреб	41
2.7. Компонування розподільних пристроїв на боці 220 кВ	43
2.8. Компонування розподільних пристроїв на боці 10 кВ	43
2.9. Заземлюючі пристрої підстанції	44
3 Розрахунок релейного захисту трансформатора	45
3.1 Визначення параметрів, необхідних для розрахунку захисту трансформаторів	45
3.2 Подовжній диференціальний струмовий захист.	46
3.3 Максимальний струмовий захист	52
4 Основні вимоги до застосування, монтажу та експлуатації вентильних розрядників	55
Висновки	59
Список літератури	60

					<i>БР 5.6.141.812 ПЗ</i>		
<i>Ізм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Сисоєва</i>				<i>Лит.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркуше</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Волохін</i>				3	60	
<i>Реценз.</i>					<i>СумДУ ЕТдн-51гл</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Утверд.</i>	<i>Лебединський</i>						

## ВСТУП

Рівень розвитку енергетики і електрифікації в найбільш опосередкованому вигляді відображає досягнутий техніко-економічний потенціал будь-якої країни. Енергетика забезпечує електроенергією і теплом промислові підприємства, сільське господарство, транспорт, а також комунально-побутові потреби населення. Електрифікація чинить визначальний вплив на розвиток всіх галузей господарства країни. Прагнучи своєї економічної незалежності і безпеки, країна зобов'язана турбуватися, щоб темпи розвитку електроенергетики, зокрема її найважливішої ланки – генерувальних потужностей, були випереджувальними.

Завданням даної роботи передбачено розрахунок режимів роботи електричної мережі, в процесі виконання якої необхідно вирішити наступні завдання:

- за навантаженнями і довжинами ліній вибрати напругу мережі;
- за напругами мережі і навантаженнями вибрати тип проводів повітряних ліній та силові трансформатори підстанцій;
- виконати розрахунок параметрів схеми заміщення ліній і трансформаторів;
- виконати розрахунок нормального, мінімального та аварійного режимів мережі і ,за необхідності, запропонувати способи регулювання напруги у вузлах навантаження;
- для обраної підстанції, яка входить до складу розглянутої мережі, виконати перевірку вибору потужності силових трансформаторів, встановлених на підстанції;
- розрахувати струми короткого замикання для забезпечення захисту підстанції;
- вибрати за умовами роботи високовольтні апарати розподільних пристроїв підстанції та перевірити їх на можливість спрацьовування в умовах короткого замикання. Виконати розрахунок поздовжньої диференціальної струмового захисту від усіх видів замикання на виводах і в обмотках сторін з заземленою нейтраллю;

					<b>БР 5.6.141.812 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		4

# 1 РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Згідно із завданням, необхідно розрахувати режими роботи мережі, схема якої містить 3 лінії електропередач, 2 підстанції і 4 споживачі (рис. 1.1). Довжини ліній, потужності і категорія навантажень мережі наведено в таблиці 1.1.

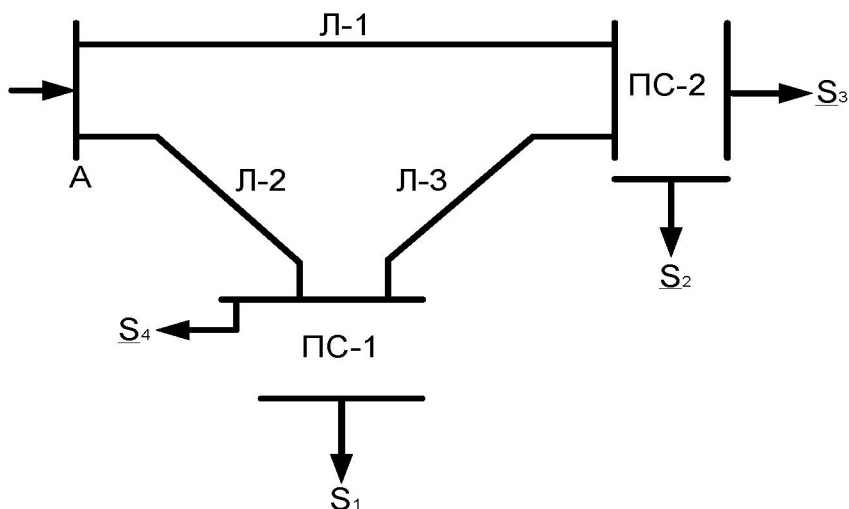


Рисунок 1.1. – Однолінійна електрична схема з'єднань електричної мережі

Таблиця 1.1 Вихідні дані

Довжина ВЛ, км			Потужність навантажень, МВА			
Л-1	Л-2	Л-3	S-1	S-2	S-3	S-4
40	70	40	40+j20 I	20+j10 II	35+j15 III	50+j30 II

1.1. Визначення напруги мережі та типу проводів ліній  
Розрахуємо мережу без урахування втрат на її елементах (рис. 1.2).

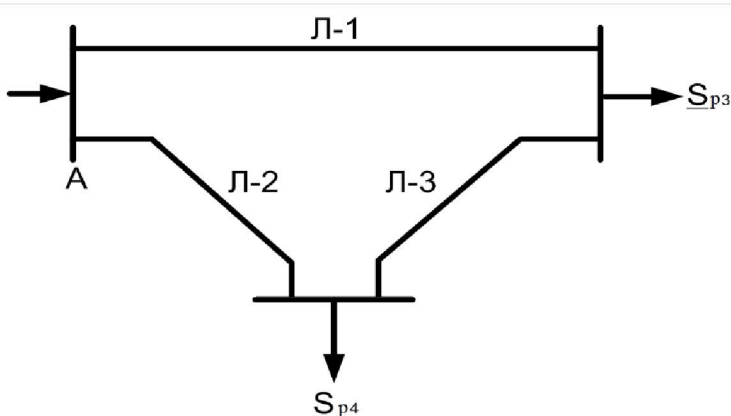


Рисунок 1.2 – Однолінійна схема замкнутої мережі

Визначимо параметри окремих ділянок лінії:

$$\underline{S}_{p3} = S_2 + S_3 = 20 + j10 + 35 + j15 = 55 + j25 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{p4} = S_1 + S_4 = 40 + j20 + 50 + j30 = 90 + j50 \text{ MVA}$$

Для розрахунку замкненої частини мережі необхідно представити її у вигляді лінії з двостороннім живленням (рис. 1.3)

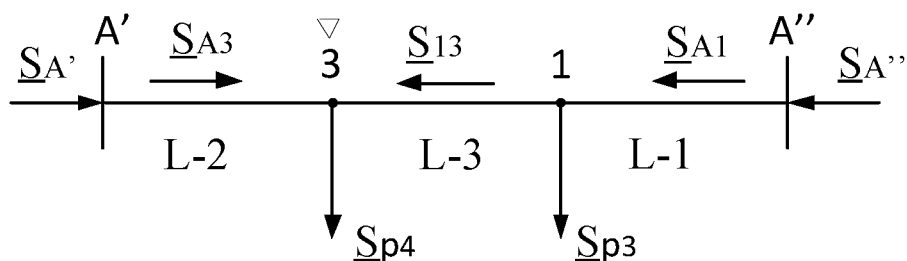


Рисунок 1.3 – Схема мережі з двостороннім живленням

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\underline{S}_{p4} \cdot L_{A'3} + \underline{S}_{p3} \cdot L_{A'1}}{L_{A'A''}} = \frac{(90 + j50) \cdot 70 + (55 + j25) \cdot (40 + 70)}{40 + 70 + 40}$$

$$= 82.33 + j41.67 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A3} = \frac{\underline{S}_{p4} \cdot L_{A''3} + \underline{S}_{p3} \cdot L_{A''1}}{L_{A'A''}} = \frac{(90 + j50) \cdot (40 + 40) + (55 + j25) \cdot 40}{40 + 70 + 40}$$

$$= 62.67 + j33.33 \text{ MVA}$$

Перевіряємо баланс потужності

$$\underline{S}_{p4} + \underline{S}_{p3} = \underline{S}_{A1} + \underline{S}_{A3}$$

$$90 + 55 + j(25 + 50) = 62.67 + 82.33 + j(33.33 + 41.67)$$

$$145 + j74.9 = 145 + j74.9 \text{ MVA}$$

Розраховуємо інші потужності

$$\underline{S}_{13} = \underline{S}_{A3} - \underline{S}_{p4} = 62.67 + j33.33 - 90 + j50 = -27.33 - j16.67 \text{ MVA}$$

Так як значення потужності вийшло негативним, тому на ділянці 1-3 змінюємо напрямок потужності, тоді точка потокорозділу буде в точці 3

Розраховуємо напругу на ділянках за імперичною формулою Ілларіонова:

$$U = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{l} + \frac{2500}{P}}}$$

Дані розрахунку заносимо в таблицю 1.2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Таблиця 1.2 – Результати розрахунку напруг

Ділянка кола	Напруга кВ
А-3	145.8
А-1	152.7
3-1	98.07

Так як для всіх ліній кільцевої мережі бажано мати однакову напругу, то приймаємо напруга  $U_H = 220$  кВ. Для того, щоб забезпечити виконання умови допустимого падіння напруги для самого віддаленого споживача електроенергії, приймаємо напругу джерела живлення на 10% вищою за номінальну напругу мережі:  $U_A = 242$  кВ.

В якості проводів для всіх ліній приймаємо сталевалюмінієві проводи марки АС.

Визначаємо тривало допустимі струми в лініях для нормального робочого режиму.

Розраховуємо струм на ділянках кола за формулою:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_H}$$

Отримані результати запишемо в таблицю 1.3

Таблиця 1.3 – Результати розрахунку струмів

Ділянка кола	Струм А
А3	186.3
А1	242.2
31	84.01

Використовуючи довідкові дані у відповідності зі шкалою стандартних перерізів і можливих перевантаженнях в аварійному режимі вибираємо провід марки АС-240/32. Відповідно до правил, мінімально допустимий переріз за умовами корони для ліній напругою 220 кВ дорівнює 240 мм<sup>2</sup>.

Таблиця 1.4 – Каталожні дані проводів повітряної лінії

Параметри	Марка проводу
	АС-240/32
Каталожні дані	
Переріз проводу, мм <sup>2</sup>	240/32
Тривало допустимий струм, А	605
Діаметр проводу, мм	21,6
Розрахункові дані	
Питомий активний опір лінії при температурі +20°C, $r_0$ (Ом/км)	0,118
Питомий реактивний опір, $x_0$ (Ом/км)	0,405
Питома ємнісна провідність лінії, $b_0$ (См/км)	$2,81 \cdot 10^{-6}$

Виконаємо розрахунок опорів лінії і зарядної потужності ліній за такими формулами:

Активний опір лінії:

$$R = r_0 \cdot L$$

Реактивний опір лінії:

$$X = x_0 \cdot L$$

Повний опір лінії:

$$Z = R + jX$$

Зарядна потужність лінії:

$$Q = \frac{U_H^2 \cdot b_0 \cdot 10^{-6} \cdot L}{2}$$

Дані розрахунків занесемо до таблиці 1.5:

Таблиця 1.5 – Результати розрахунку параметрів ліній електропередач

Лінія	A1	13	A3
Довжина, км	40	40	70
Переріз дроту мм <sup>2</sup>	240/32	240/32	240/32
Активний опір лінії, R, Ом	4.72	4.72	8.26
Реактивний опір лінії, X, Ом	16.2	16.2	28.35
Зарядна потужність лінії, Q, МВАр	2.72	2.72	4.76
Повний опір лінії, Z, Ом	4.72+j16.2	4.72+j16.2	8.26+j28.35

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

БР 5.6.141.812 ПЗ

Лист

8

## 1.2 Вибір потужності трансформаторів:

Вибираємо тип трансформатора на підстанції ПС-1

$$S_{T1} = \frac{S_{\text{нагр}}}{1.4} = \frac{S_1}{1.4} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{1.4} = \frac{\sqrt{40^2 + 20^2}}{1.4} = 31.94 \text{ МВА}$$

Вибираємо трифазний двообмотковий трансформатор типу ТРДН-40000/220.

Перевіряємо коефіцієнт завантаження трансформатора ТРДН -40000/220

$$k_3 = \frac{S_{\text{нагр}}}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{40^2 + 20^2}}{2 \cdot 40} = 0.56$$

Вибираємо тип трансформатора на підстанції ПС-2

$$S_{T2} = \frac{S_{\text{нагр}}}{1.4} = \frac{S_2 + S_3}{1.4} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{1.4} = \frac{\sqrt{55^2 + 25^2}}{1.4} = 43.15 \text{ МВА}$$

Вибираємо трифазний триобмотковий трансформатор типу ТДТН-63000/220.

Перевіряємо коефіцієнт завантаження трансформатора ТДТН -63000/220

$$k_3 = \frac{S_{\text{нагр}}}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{S_2 + S_3}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{55^2 + 25^2}}{2 \cdot 63} = 0.48$$

Каталожні дані трансформаторів мережі заносимо до таблиці 1.6.

## 1.3 Визначення параметрів схеми заміщення та розрахунок мережі

Навантаження вузла 3 до сторони ВН визначаємо як суму потужностей, заданих на шинах НН, втрат в обмотках, гідки намагнічування трансформаторів.

Схема заміщення ПС-1 зображена на рис. 1.4.

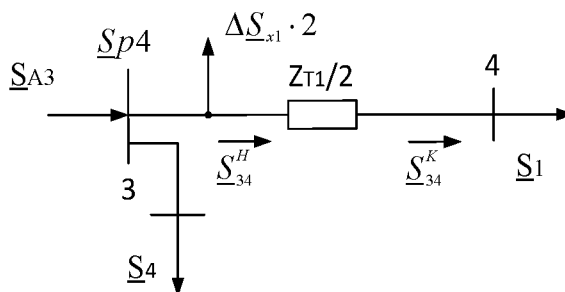


Рисунок 1.4 – Схема заміщення ПС-1

Знаходимо розподіл потоку потужностей:

$$\underline{S}_{34}^K = \underline{S}_1 = 40 + j20 \text{ МВА}$$

$$\underline{S}_4 = 50 + j30 \text{ МВА}$$

Потужність у вузлі 3 з урахуванням втрат в трансформаторі:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{34}^H &= \underline{S}_{34}^K + \Delta \underline{S}_{34} = \underline{S}_{34}^K + \frac{(P_{34}^K)^2 + (Q_{34}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \left( \frac{R_{T1} + jX_{T1}}{2} \right) = \\ &= 40 + j20 + \frac{40^2 + 20^2}{220^2} \cdot \left( \frac{5.6 + j158.7}{2} \right) = 40.12 + j23.28 \text{ МВА} \\ \underline{S}_{P4} &= \underline{S}_{34}^H + \underline{S}_4 + \Delta \underline{S}_{X1} \cdot 2 = 40.12 + j23.28 + 50 + j30 + (0.050 + j0.36) \cdot 2 = \\ &= 90.22 + j54 \text{ МВА} \end{aligned}$$

Навантаження вузла 1 до сторони ВН визначаємо як суму потужностей, заданих на шинах НН, втрат в обмотках, гілки намагнічування трансформаторів  
Схема заміщення ПС-2 зображена на рис. 1.5.

Таблиця 1.6 – Характеристики обраних трансформаторів

Параметри	Тип трансформатора	
	ТРДН-40000/220	ТРДН-63000/220
номінальна потужність, $S_{НОМ}$ (МВ·А)	40	63
Номінальні напруги обмоток, кВ		
вищої напруги, $U_{НОМ.ВН}$	230	230
середньої напруги, $U_{НОМ.СН}$		38,5
нижчої напруги, $U_{НОМ.НН}$	6.6/11	6.6/11
втрати, кВт		
холостого ходу, $\Delta P_x$	50	91
короткого замикання, $\Delta P_K$	170	320
Напруга короткого замикання між обмотками, від $U_{НОМ}\%$		
вищої - нижчої напруг, $U_{к.в-н}$	12	12.5
вищої - середньої напруги, $U_{к.с-н}$	-	24
середньої - нижчої напруг, $U_{к.с-н}$	-	10.5
Струм холостого ходу, $I_x$ (% від $I_{НОМ}$ )	0,9	1.0
Активний опір обмоток, $R_T$ (Ом)	5.6	
обмотка ВН		4.3
обмотка СН		4.3
обмотка НН		4.3
Реактивний опір обмоток, $X_T$ (Ом)	158.7	175
обмотка ВН		109.2
обмотка СН		0
обмотка НН		92.4
Втрати потужності в обмотках, $\Delta Q_x$ (кВАр)	360	630

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

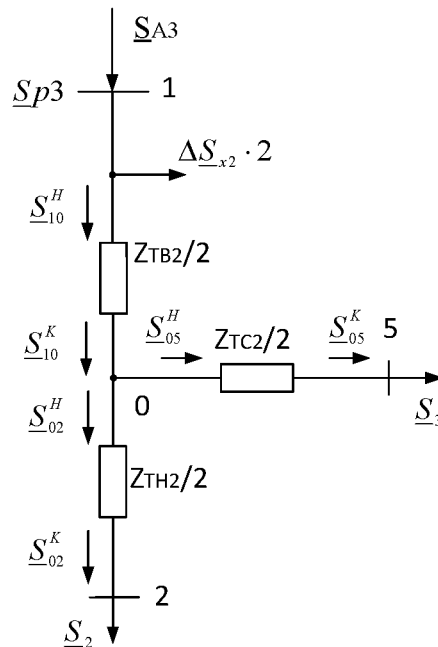


Рисунок 1.5 – Схема заміщення ПС-2

Знаходимо розподіл потоку потужностей:

$$\underline{S}_{05}^K = \underline{S}_3 = 35 + j15 \text{ МВА}$$

$$\underline{S}_{02}^K = \underline{S}_2 = 20 + j10 \text{ МВА}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{05}^H &= \underline{S}_{05}^K + \Delta \underline{S}_{05} = \underline{S}_{05}^K + \frac{(P_{05}^K)^2 + (Q_{05}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \left( \frac{R_{TC2} + jX_{TC2}}{2} \right) = \\ &= 35 + j15 + \frac{35^2 + 15^2}{220^2} \cdot \left( \frac{4.3 + j0}{2} \right) = 35.06 + j15 \text{ МВ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{02}^H &= \underline{S}_{02}^K + \Delta \underline{S}_{02} = \underline{S}_{02}^K + \frac{(P_{02}^K)^2 + (Q_{02}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \left( \frac{R_{TH2} + jX_{TH2}}{2} \right) = \\ &= 20 + j10 + \frac{20^2 + 10^2}{220^2} \cdot \left( \frac{4.3 + j92.4}{2} \right) = 20.02 + j10.56 \text{ МВА} \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{10}^K = \underline{S}_{02}^H + \underline{S}_{03}^H = 35.06 + j15 + 20.02 + j10.48 = 55.09 + j25.56 \text{ МВА}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{10}^H &= \underline{S}_{10}^K + \Delta \underline{S}_{10} = \underline{S}_{10}^K + \frac{(P_{10}^K)^2 + (Q_{10}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \left( \frac{R_{TB2} + jX_{TB2}}{2} \right) = \\ &= 55.09 + j25.56 + \frac{25.09^2 + 25.56^2}{220^2} \cdot \left( \frac{4.3 + j109.2}{2} \right) = \\ &= 55.25 + j29.08 \text{ МВ} \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{P3} = \underline{S}_{10}^H + \Delta \underline{S}_{X1} \cdot 255.25 + 29.08 + (0.091 + j0.63) \cdot 2 = 55.43 + j30.34 \text{ МВА}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Уточнюючий розрахунок

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\underline{S}_{p4} \cdot L_{A'3} + \underline{S}_{p3} \cdot L_{A'1}}{L_{A'A''}}$$

$$= \frac{(90.22 + j54) \cdot (8.26 - j28.35) + (55.43 + j30.34) \cdot (12.98 - j44.55)}{17.7 - j60.75}$$

$$= 82.75 + j47.45 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A3} = \frac{\underline{S}_{p4} \cdot L_{A''3} + \underline{S}_{p3} \cdot L_{A''1}}{L_{A'A''}}$$

$$= \frac{(90.22 + j54) \cdot (9.44 - j32.4) + (55.43 + j30.34) \cdot (4.72 - j16.2)}{17.7 - j60.75}$$

$$= 62.9 + j36.89 \text{ MVA}$$

Перевіряємо баланс потужності:

$$\underline{S}_{p4} + \underline{S}_{p3} = \underline{S}_{A'1} + \underline{S}_{A'3}$$

$$90.22 + 55.43 + j(30.34 + 54) = 62.9 + 82.75 + j(36.89 + 47.45)$$

$$145.65 + j84.34 = 145.65 + j84.34 \text{ MVA}$$

Баланс потужності зійшовся

Розраховуємо інші потужності

$$\underline{S}_{13} = \underline{S}_{A3} - \underline{S}_{p4} + \underline{S}_4 = 62.9 + j36.89 - 90.22 + j54 + 90 + j50$$

$$= 22.68 + j12.89 \text{ MB}$$

Розірвемо мережу з двостороннім живленням в точці 3 (точка потокорозділу) та проведемо розрахунок окремих мереж.

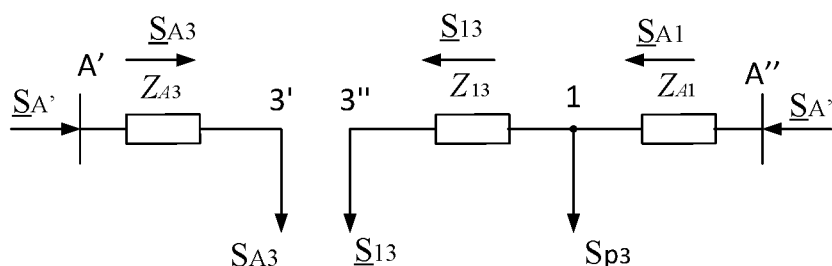


Рисунок 1.6 – Схема розімкненої мережі

Знаходимо розподіл потоку потужностей на ділянці A'3

$$\underline{S}_{A3}^K = \underline{S}_{A3} - jQ_{A1} = 62.9 + j36.89 - j4.76 = 62.9 + j32.13 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A3}^H = \underline{S}_{A3}^K + \Delta \underline{S}_{A3} = \underline{S}_{A3}^K + \frac{(P_{A3}^K)^2 + (Q_{A3}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{A3} + jX_{A3}) =$$

$$= 62.9 + j32.22 + \frac{62.9^2 + 32.22^2}{220^2} \cdot (8.26 + j28.35) =$$

$$= 63.75 + j35.05 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A'} = \underline{S}_{A3}^H - jQ_{A3} = 63.75 + j35.15 - j4.76 = 63.75 + j30.29 \text{ MVA}$$

Розраховуємо напругу вузла 3', прийнявши напругу джерела  $U_{A'} = 242 \text{ kV}$

$$U_{3'} = \sqrt{\left( U_{A'} - \frac{P_{A3}^H \cdot R_{A3} + Q_{A3}^H \cdot X_{A3}}{U_{A'}} \right)^2 + \left( \frac{P_{A3}^H \cdot X_{A3} - Q_{A3}^H \cdot R_{A3}}{U_{A'}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 242 - \frac{63.75 \cdot 8.26 + 35.05 \cdot 28.35}{242} \right)^2 + \left( \frac{63.75 \cdot 28.35 - 35.05 \cdot 8.26}{242} \right)^2}$$

$$= 236.45 \text{ kV}$$

Знаходимо розподіл потоку потужностей на ділянці А''3''

$$\underline{S}_{3''1}^K = \underline{S}_{13} - jQ_{13} = 22.68 + j12.98 - j2.72 = 22.68 + j10.17 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{3''1}^H = \underline{S}_{3''1}^K + \Delta \underline{S}_{3''1} = \underline{S}_{3''1}^K + \frac{(P_{3''1}^K)^2 + (Q_{3''1}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{13} + jX_{13}) =$$

$$= 22.68 + j10.17 + \frac{22.68^2 + 10.17^2}{220^2} \cdot (4.72 + j16.2)$$

$$= 22.74 + j10.38 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A''1}^K = \underline{S}_{3''1}^H + \underline{S}_{P3} - j(Q_{13} + Q_{A''1})$$

$$= 22.74 + j10.38 + 55.43 + j30.66 - j(2.72 + 2.72)$$

$$= 78.17 + j40.72 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A''}^H = \underline{S}_{A''1}^K + \Delta \underline{S}_{A''1} = \underline{S}_{A''1}^K + \frac{(P_{A''1}^K)^2 + (Q_{A''1}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{A''1} + jX_{A''1}) =$$

$$= 78.17 + j40.72 + \frac{78.17^2 + 40.72^2}{220^2} \cdot (4.72 + j16.2)$$

$$= 78.93 + j43.32 \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{A''} = \underline{S}_{A''}^H - jQ_{A1} = 78.93 + j43.32 - j4.76 = 78.93 + j40.6 \text{ MVA}$$

Розраховуємо напругу вузла 1' прийнявши напругу джерела  $U_{A'} = 242 \text{ kV}$

$$U_1 = \sqrt{\left( U_{A'} - \frac{P_{A2}^H \cdot R_{A2} + Q_{A2}^H \cdot X_{A2}}{U_{A'}} \right)^2 + \left( \frac{P_{A2}^H \cdot X_{A2} - Q_{A2}^H \cdot R_{A2}}{U_{A'}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 242 - \frac{78.93 \cdot 4.72 + 43.32 \cdot 16.2}{242} \right)^2 + \left( \frac{78.93 \cdot 16.2 - 43.32 \cdot 4.72}{242} \right)^2}$$

$$= 237.6 \text{ kV}$$

Розраховуємо напругу вузла 3''

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

$$U_{3''} = \sqrt{\left(U_1 - \frac{P_{3''1}^H \cdot R_{3''1} + Q_{3''1}^H \cdot X_{3''1}}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{P_{3''1}^H \cdot X_{3''1} - Q_{3''1}^H \cdot R_{3''1}}{U_1}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(237.6 - \frac{22.74 \cdot 4.72 + 10.38 \cdot 16.2}{237.6}\right)^2 + \left(\frac{22.74 \cdot 16.2 - 10.38 \cdot 4.72}{237.6}\right)^2}$$

$$= 236.36 \text{ kV}$$

Порівнюємо напругу в точці розриву:

$$U_{3'} = 236.45 \text{ kV} \neq U_{3''} = 236.36 \text{ kV}$$

Різниця між напругами становить 0,04%, то приймаємо середнє значення напруги в точці розриву:

$$U_{CP1} = \frac{U_{3''} + U_{3'}}{2} = \frac{236.45 + 236.36}{2} = 236.4 \text{ kV}$$

Тепер знайдемо напруги споживачів.

Визначення напруги споживача S<sub>1</sub> на ПС-1

$$U_4^B = \sqrt{\left(U_{CP1} - \frac{P_{34}^H \cdot \frac{R_{T1}}{2} + Q_{34}^H \cdot \frac{X_{T1}}{2}}{U_{CP1}}\right)^2 + \left(\frac{P_{34}^H \cdot \frac{X_{T1}}{2} - Q_{34}^H \cdot \frac{R_{T1}}{2}}{U_{CP1}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(236.4 - \frac{40.12 \cdot \frac{5.6}{2} + 23.28 \cdot \frac{158.7}{2}}{236.4}\right)^2 + \left(\frac{40.12 \cdot \frac{158.7}{2} - 23.28 \cdot \frac{5.6}{2}}{236.4}\right)^2}$$

$$= 228.5 \text{ kV}$$

$$U_4 = \frac{U_4^B}{U_B / U_H} = \frac{228.5}{230 / 11} = 10.93 \text{ kV}$$

Перевіримо отримане значення напруги на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_4|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|10 - 10.93|}{10} \cdot 100\% = 9,28 \%$$

Напруга в точці 4 споживача S<sub>1</sub> перевищує допустиме відхилення

Прийемо міри по регулюванню за допомогою РПН

$$U_4 = U_4 + U_4 \cdot (-6 \cdot 1.5\%) = 10.93 + 10.93 \cdot (-6 \cdot 1.5\%) = 9.94 \text{ kV}$$

Перевіримо отримане значення напруги на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_4|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|10 - 9,94|}{10} \cdot 100\% = 0.6 \%$$

Визначимо напругу споживача S<sub>2</sub> і S<sub>3</sub> на ПС-2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------



$$U_0 = \sqrt{\left( U_{CP1} - \frac{P_{10}^H \cdot R_{TB2} + Q_{10}^H \cdot X_{TB2}}{U_{CP1}} \right)^2 + \left( \frac{P_{10}^H \cdot X_{TB2} - Q_{10}^H \cdot R_{TB2}}{U_{CP1}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 236.4 - \frac{55.24 \cdot \frac{4.3}{2} + 29.4 \cdot \frac{109.2}{2}}{236.4} \right)^2 + \left( \frac{55.24 \cdot \frac{109.2}{2} - 29.4 \cdot \frac{4.3}{2}}{236.4} \right)^2}$$

$$= 226.72 \text{ kV}$$

$$U_5^B = \sqrt{\left( U_0 - \frac{P_{05}^H \cdot R_{TC2} + Q_{05}^H \cdot X_{TC2}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{05}^H \cdot X_{TC2} - Q_{05}^H \cdot R_{TC2}}{U_0} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 226.72 - \frac{35.06 \cdot \frac{4.3}{2} + 15 \cdot \frac{0}{2}}{226.72} \right)^2 + \left( \frac{35.06 \cdot \frac{0}{2} - 15 \cdot \frac{4.3}{2}}{226.72} \right)^2}$$

$$= 221.37 \text{ kV}$$

$$U_2^B = \sqrt{\left( U_0 - \frac{P_{02}^H \cdot R_{TH2} + Q_{02}^H \cdot X_{TH2}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{02}^H \cdot X_{TH2} - Q_{02}^H \cdot R_{TH2}}{U_0} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 226.72 - \frac{20.02 \cdot \frac{4.3}{2} + 10.48 \cdot \frac{92.4}{2}}{226.72} \right)^2 + \left( \frac{20.02 \cdot \frac{92.4}{2} - 10.48 \cdot \frac{4.3}{2}}{226.72} \right)^2}$$

$$= 222.88 \text{ kV}$$

$$U_5 = \frac{U_5^B}{U_B/U_H} = \frac{221.37}{230/38.5} = 37.05 \text{ kV} \quad U_2 = \frac{U_2^B}{U_B/U_H} = \frac{222.88}{230/6.6} = 6.4 \text{ kV}$$

Перевіримо отримане значення напруги  $U_5$  на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_5|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|35 - 37.05|}{35} \cdot 100\% = 6.6\%$$

Напруга в точці 5 споживача S3 перевищує допустиме відхилення  
Прийmemo міри по регулюванню за допомогою РПН

$$U_5 = U_5 + U_5 \cdot (-6 \cdot 1.0\%) = 37.05 + 37.05 \cdot (-6 \cdot 1.0\%) = 34.83 \text{ kV}$$

Перевіримо отримане напруга на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_5|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|35 - 34.83|}{35} \cdot 100\% = 0.49\%$$

Перевіримо отримане значення напруги  $U_2$  на відхилення від  $U_{НОМ}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

$$\frac{|U_{НОМ} - U_2|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|6 - 6.4|}{6} \cdot 100\% = 6.6\%$$

Напруга в точці 2 споживача S2 перевищує допустиме відхилення  
Приймемо міри по регулюванню за допомогою РПН

$$U_2 = U_2 + U_2 \cdot (-6 \cdot 1.0\%) = 6.4 + 6.4 \cdot (-6 \cdot 1.0\%) = 6.01 \text{ кВ}$$

Перевіримо отриману напругу на відхилення від номіналу

$$\frac{|U_{НОМ} - U_2|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|6 - 6.01|}{6} \cdot 100\% = 0.17\%$$

Результати розрахунку запишемо в таблицю 1.7

Таблиця 1.7

Вузол	A	1	2	3	4	5
Напруга до РПН, кВ	242	239.45	6.4	239.34	10.93	37.05
Відхилення від $U_{НОМ}$ , %			6.6		9.28	6.6
Ступінь РПН			-6		-6	-6
Напруга після РПН, кВ			6.01		9.94	34.85
Відхилення від після РПН $U_{НОМ}$ , %			0.17		0.6	0.49

#### 1.4 Розрахунок мінімального режиму електричної мережі

Розрахунок навантаження вузла 3:

Схема заміщення ПС-1 зображена на рис.1.4.

Знаходимо розподіл потоку потужностей:

$$\underline{S}_{34}^K = \underline{S}_1 = 20 + j10 \text{ МВА}$$

$$\underline{S}_4 = 25 + j15 \text{ МВА}$$

Потужність у вузлі 3 з урахуванням втрат в трансформаторі:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{34}^H &= \underline{S}_{34}^K + \Delta \underline{S}_{34} = \underline{S}_{34}^K + \frac{(P_{34}^K)^2 + (Q_{34}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \left( \frac{R_{T1} + jX_{T1}}{2} \right) = \\ &= 20 + j10 + \frac{20^2 + 10^2}{220^2} \cdot \left( \frac{5.6 + j158.7}{2} \right) = 20.03 + j10.82 \text{ МВА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{P4} &= \underline{S}_{34}^H + \underline{S}_4 + \Delta \underline{S}_{X1} \cdot 2 = 20.03 + j10.82 + 25 + j15 + (0.050 + j0.36) \cdot 2 \\ &= 45.13 + j26.54 \text{ МВА} \end{aligned}$$

Розрахунок навантаження вузла 1:

Схема заміщення ПС-2 зображена на рис.1.5.

Знаходимо розподіл потоку потужностей:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{05}^K &= \underline{S}_3 = 17.5 + j7.5 \text{ MBA} \\ \underline{S}_{02}^K &= \underline{S}_2 = 10 + j5 \text{ MBA} \\ \underline{S}_{05}^H &= \underline{S}_{05}^K + \Delta \underline{S}_{05} = \underline{S}_{05}^K + \frac{(P_{05}^K)^2 + (Q_{05}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \left( \frac{R_{\text{TC2}} + jX_{\text{TC2}}}{2} \right) = \\ &= 17.5 + j7.5 + \frac{17.5^2 + 7.5^2}{220^2} \cdot \left( \frac{4.3 + j0}{2} \right) = 17.52 + j7.5 \text{ MBA} \\ \underline{S}_{02}^H &= \underline{S}_{02}^K + \Delta \underline{S}_{02} = \underline{S}_{02}^K + \frac{(P_{02}^K)^2 + (Q_{02}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \left( \frac{R_{\text{TH2}} + jX_{\text{TH2}}}{2} \right) = \\ &= 10 + j5 + \frac{10^2 + 5^2}{220^2} \cdot \left( \frac{4.3 + j92.4}{2} \right) = 10.01 + j5.12 \text{ MBA} \\ \underline{S}_{10}^K &= \underline{S}_{02}^H + \underline{S}_{03}^H = 17.52 + j7.5 + 10.01 + j5.12 = 27.53 + j12.62 \text{ MBA} \\ \underline{S}_{10}^H &= \underline{S}_{10}^K + \Delta \underline{S}_{10} = \underline{S}_{10}^K + \frac{(P_{10}^K)^2 + (Q_{10}^K)^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot \left( \frac{R_{\text{TB2}} + jX_{\text{TB2}}}{2} \right) = \\ &= 27.53 + j12.62 + \frac{27.53^2 + 12.62^2}{220^2} \cdot \left( \frac{4.3 + j109.2}{2} \right) = \\ &= 27.57 + j13.52 \text{ MBA} \\ \underline{S}_{\text{P3}} &= \underline{S}_{10}^H + \Delta \underline{S}_{\text{X1}} \cdot 2 = 27.57 + j13.52 + (0.091 + j0.63) \cdot 2 \\ &= 27.74 + j14.78 \text{ MBA} \end{aligned}$$

Уточнюючий розрахунок

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{A1}} &= \frac{\underline{S}_{\text{p4}} \cdot L_{\text{A}^{\text{``3}}} + \underline{S}_{\text{p3}} \cdot L_{\text{A}^{\text{``1}}}}{L_{\text{A}^{\text{``}}}} \\ &= \frac{(45.13 + j26.54) \cdot (8.26 - j28.35) + (27.74 + j14.78) \cdot (12.98 - j44.55)}{17.7 - j60.75} \end{aligned}$$

$$= 41.41 + j23.22 \text{ MBA}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{A3}} &= \frac{\underline{S}_{\text{p4}} \cdot L_{\text{A}^{\text{``3}}} + \underline{S}_{\text{p3}} \cdot L_{\text{A}^{\text{``1}}}}{L_{\text{A}^{\text{``}}}} \\ &= \frac{(45.13 + j26.54) \cdot (9.44 - j32.4) + (27.74 + j14.78) \cdot (4.72 - j16.2)}{17.7 - j60.75} \end{aligned}$$

$$= 31.47 + j18.09 \text{ MBA}$$

Перевіряємо баланс потужності:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{p4}} + \underline{S}_{\text{p3}} &= \underline{S}_{\text{A}^{\text{``1}}} + \underline{S}_{\text{A}^{\text{``3}}} \\ 45.13 + 27.74 + j(14.78 + 26.54) &= 31.47 + 41.41 + j(18.09 + 23.22) \\ 72.87 + j41.32 &= 72.87 + j41.32 \text{ MBA} \end{aligned}$$

Баланс потужності зійшовся.

Знаходимо інші потужності

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$\begin{aligned}\underline{S}_{13} &= \underline{S}_{A3} - \underline{S}_{p4} + \underline{S}_4 = 31.47 + j18.09 - 45.13 + j26.54 + 45 + j25 \\ &= 11.34 + j6.56 \text{ MVA}\end{aligned}$$

Знаходимо розподіл потоку потужностей на ділянці А'3 (рис. 1.6):

$$\underline{S}_{A3}^K = \underline{S}_{A3} - jQ_{A1} = 31.47 + j18.09 - j4.76 = 31.47 + j13.33 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{A3}^H &= \underline{S}_{A3}^K + \Delta\underline{S}_{A3} = \underline{S}_{A3}^K + \frac{(P_{A3}^K)^2 + (Q_{A3}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{A3} + jX_{A3}) = \\ &= 31.47 + j13.33 + \frac{31.47^2 + 13.33^2}{220^2} \cdot (8.26 + j28.35) = \\ &= 31.67 + j14.02 \text{ MVA}\end{aligned}$$

$$\underline{S}_{A'} = \underline{S}_{A3}^H - jQ_{A3} = 31.67 + j14.02 - j4.76 = 31.67 + j9.26 \text{ MVA}$$

Розраховуємо напругу вузла 3' прийнявши напругу джерела  $U_{A'} = 242 \text{ kV}$

$$\begin{aligned}U_{3'} &= \sqrt{\left( U_{A'} - \frac{P_{A3}^H \cdot R_{A3} + Q_{A3}^H \cdot X_{A3}}{U_{A'}} \right)^2 + \left( \frac{P_{A3}^H \cdot X_{A3} - Q_{A3}^H \cdot R_{A3}}{U_{A'}} \right)^2} \\ &= \sqrt{\left( 242 - \frac{31.67 \cdot 8.26 + 9.26 \cdot 28.35}{242} \right)^2 + \left( \frac{31.67 \cdot 28.35 - 9.26 \cdot 8.26}{242} \right)^2} \\ &= 239.86 \text{ kV}\end{aligned}$$

Знаходимо розподіл потоку потужностей на ділянці А''3''

$$\underline{S}_{3''1}^K = \underline{S}_{13} - jQ_{13} = 11.34 + j6.56 - j2.72 = 11.34 + j3.84 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{3''1}^H &= \underline{S}_{3''1}^K + \Delta\underline{S}_{3''1} = \underline{S}_{3''1}^K + \frac{(P_{3''1}^K)^2 + (Q_{3''1}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{13} + jX_{13}) = \\ &= 11.34 + j3.84 + \frac{11.34^2 + 3.84^2}{220^2} \cdot (4.72 + j16.2) \\ &= 11.35 + j3.88 \text{ MVA}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{A''1}^K &= \underline{S}_{3''1}^H + \underline{S}_{p3} - j(Q_{13} + Q_{A''1}) \\ &= 11.35 + j3.88 + 27.74 + j14.78 - j(2.72 + 2.72) \\ &= 39.1 + j18.66 \text{ MVA}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{A''}^H &= \underline{S}_{A''1}^K + \Delta\underline{S}_{A''1} = \underline{S}_{A''1}^K + \frac{(P_{A''1}^K)^2 + (Q_{A''1}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{A''1} + jX_{A''1}) = \\ &= 39.1 + j18.66 + \frac{39.1^2 + 18.66^2}{220^2} \cdot (4.72 + j16.2) \\ &= 39.28 + j19.29 \text{ MVA}\end{aligned}$$

$$\underline{S}_{A''} = \underline{S}_{A''}^H - jQ_{A1} = 39.28 + j19.29 - j4.76 = 39.28 + j16.57 \text{ MVA}$$

Розраховуємо напругу вузла 1' прийнявши напругу джерела  $U_{A'} = 242 \text{ kV}$

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \sqrt{\left( U_{A'} - \frac{P_{A2}^H \cdot R_{A2} + Q_{A2}^H \cdot X_{A2}}{U_{A'}} \right)^2 + \left( \frac{P_{A2}^H \cdot X_{A2} - Q_{A2}^H \cdot R_{A2}}{U_{A'}} \right)^2} \\
 &= \sqrt{\left( 242 - \frac{39.28 \cdot 4.72 + 16.57 \cdot 16.2}{242} \right)^2 + \left( \frac{39.28 \cdot 16.2 - 16.57 \cdot 4.72}{242} \right)^2} \\
 &= 239.95 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Розрахуємо напругу вузла 3''

$$\begin{aligned}
 U_{3''} &= \sqrt{\left( U_1 - \frac{P_{3''1}^H \cdot R_{3''1} + Q_{3''1}^H \cdot X_{3''1}}{U_1} \right)^2 + \left( \frac{P_{3''1}^H \cdot X_{3''1} - Q_{3''1}^H \cdot R_{3''1}}{U_1} \right)^2} \\
 &= \sqrt{\left( 239.95 - \frac{11.35 \cdot 4.72 + 3.88 \cdot 16.2}{239.95} \right)^2 + \left( \frac{11.35 \cdot 16.2 - 3.88 \cdot 4.72}{239.95} \right)^2} \\
 &= 239.47 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Порівнюємо напруги в точці розриву:

$$U_{3'} = 239.86 \text{ kV} \neq U_{3''} = 239.47 \text{ kV}$$

Різниця між напругами становить 0.16%, тому приймаємо середнє значення напруги в точці розриву:

$$U_{CP1} = \frac{U_{3''} + U_{3'}}{2} = \frac{239.86 + 239.47}{2} = 239.66 \text{ kV}$$

Розрахуємо напругу споживача  $\underline{S}_1$  на ПС-1

$$\begin{aligned}
 U_4^B &= \sqrt{\left( U_{CP1} - \frac{P_{34}^H \cdot \frac{R_{T1}}{2} + Q_{34}^H \cdot \frac{X_{T1}}{2}}{U_{CP1}} \right)^2 + \left( \frac{P_{34}^H \cdot \frac{X_{T1}}{2} - Q_{34}^H \cdot \frac{R_{T1}}{2}}{U_{CP1}} \right)^2} \\
 &= \sqrt{\left( 239.66 - \frac{20.03 \cdot \frac{5.6}{2} + 10.82 \cdot \frac{158.7}{2}}{239.66} \right)^2 + \left( \frac{20.03 \cdot \frac{158.7}{2} - 10.82 \cdot \frac{5.6}{2}}{239.66} \right)^2} \\
 &= 235.94 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

$$U_4 = \frac{U_4^B}{U_B / U_H} = \frac{235.94}{230 / 11} = 11.28 \text{ kV}$$

Перевіримо отриману напругу на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_4|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|10 - 11.28|}{10} \cdot 100\% = 12.84\%$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Напряга в точці 4 споживача  $S_1$  перевищує припустиме відхилення  $\pm 5\%$   
 Прийемо заходи з регулювання за допомогою РПН

$$U_4 = U_4 + U_4 \cdot (-7 \cdot 1.5\%) = 11.28 + 11.28 \cdot (-7 \cdot 1.5\%) = 10.1 \text{ kV}$$

Перевіримо отриману напругу на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_4|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|10 - 10.1|}{10} \cdot 100\% = 1\%$$

Визначимо напругу споживача  $S_2$  и  $S_3$  на ПС-2

$$U_0 = \sqrt{\left( U_{СП1} - \frac{P_{10}^H \cdot R_{ТВ2} + Q_{10}^H \cdot X_{ТВ2}}{U_{СП1}} \right)^2 + \left( \frac{P_{10}^H \cdot X_{ТВ2} - Q_{10}^H \cdot R_{ТВ2}}{U_{СП1}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 239.66 - \frac{27.57 \cdot \frac{4.3}{2} + 13.52 \cdot \frac{109.2}{2}}{239.66} \right)^2 + \left( \frac{27.57 \cdot \frac{109.2}{2} - 13.52 \cdot \frac{4.3}{2}}{239.66} \right)^2}$$

$$= 235.04 \text{ kV}$$

$$U_5^B = \sqrt{\left( U_0 - \frac{P_{05}^H \cdot R_{ТЦ2} + Q_{05}^H \cdot X_{ТЦ2}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{05}^H \cdot X_{ТЦ2} - Q_{05}^H \cdot R_{ТЦ2}}{U_0} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 239.66 - \frac{17.52 \cdot \frac{4.3}{2} + 7.5 \cdot \frac{0}{2}}{239.66} \right)^2 + \left( \frac{17.52 \cdot \frac{0}{2} - 7.5 \cdot \frac{4.3}{2}}{239.66} \right)^2}$$

$$= 232.37 \text{ kV}$$

$$U_2^B = \sqrt{\left( U_0 - \frac{P_{02}^H \cdot R_{ТН2} + Q_{02}^H \cdot X_{ТН2}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{02}^H \cdot X_{ТН2} - Q_{02}^H \cdot R_{ТН2}}{U_0} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 239.66 - \frac{10.01 \cdot \frac{4.3}{2} + 5.12 \cdot \frac{92.4}{2}}{239.66} \right)^2 + \left( \frac{10.01 \cdot \frac{92.4}{2} - 5.12 \cdot \frac{4.3}{2}}{239.66} \right)^2}$$

$$= 233.21 \text{ kV}$$

$$U_5 = \frac{U_5^B}{U_B / U_H} = \frac{232.37}{230 / 38.5} = 38.9 \text{ kV}$$

$$U_2 = \frac{U_2^B}{U_B / U_H} = \frac{233.21}{230 / 6.6} = 6.7 \text{ kV}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Перевіримо отримане напруг  $U_5$  на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_5|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|35 - 38.9|}{35} \cdot 100\% = 11.13 \%$$

Напруга в точці 5 споживача  $S_3$  перевищує припустиме відхилення  $\pm 5\%$

Прийmemo заходи з регулювання за допомогою РПН

$$U_5 = U_5 + U_5 \cdot (-9 \cdot 1.0\%) = 38.9 + 38.9 \cdot (-9 \cdot 1.0\%) = 35.4 \text{ кВ}$$

Перевіримо отриману напругу на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_5|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|35 - 35.4|}{35} \cdot 100\% = 1.14 \%$$

Перевіримо напругу  $U_2$  на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_2|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|6 - 6.7|}{6} \cdot 100\% = 6.7 \%$$

Напруга в точці 2 споживача  $S_2$  перевищує припустиме відхилення  $\pm 5\%$

Прийmemo заходи з регулювання за допомогою РПН

$$U_2 = U_2 + U_2 \cdot (-10 \cdot 1.0\%) = 6.7 + 6.7 \cdot (-10 \cdot 1.0\%) = 6.02 \text{ кВ}$$

Перевіримо отриману напругу на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_2|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|6 - 6.02|}{6} \cdot 100\% = 0.33 \%$$

Результати розрахунку запишемо в таблицю 1.8.

Таблиця 1.8

Вузол	A	1	2	3	4	5
Напруга до РПН, кВ	242	239.9 5	6.7	239.6 6	11,28	38,9
Відхилення від $U_{НОМ}$ , %			6.7		12,84	11,13
Ступінь РПН			-10		-7	-9
Напруга після РПН, кВ			6.02		10,1	35,4
Відхилення від $U_{НОМ}$ , % після РПН			0.33		1	1,14

### 1.5 Розрахунок аварійного режиму мережі

Розрахуємо напругу у вузлах навантаження при відключеній лінії L-1

Схема заміщення для аварійного режиму зображена на рис. 1.7.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

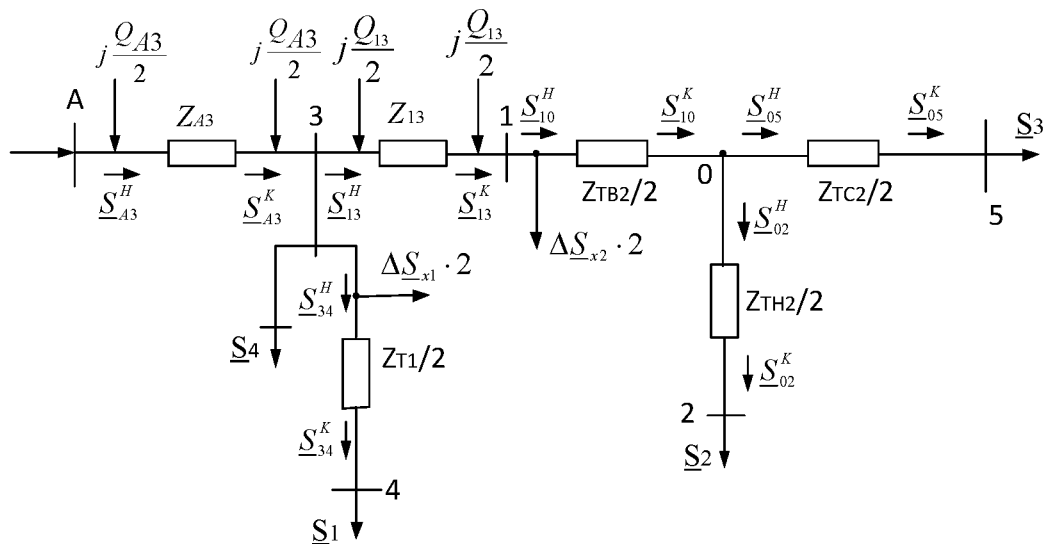


Рисунок 1.7 – Схема аварійного режиму

Знайдемо потужність  $\underline{S}_{13}^K$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{13}^K &= \underline{S}_{10}^H + \Delta \underline{S}_{x2} \cdot 2 - jQ_{13} = \underline{S}_{10}^H + (\Delta P_{x2} + j\Delta Q_{x2}) \cdot 2 - jQ_{13} \\ &= 55.25 + j29.08 + (0.091 + j0.63) \cdot 2 - j2.72 \\ &= 55.26 + j24.02 \text{ MVA}\end{aligned}$$

Знайдемо потужність  $\underline{S}_{13}^H$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{13}^H &= \underline{S}_{13}^K + \Delta \underline{S}_{13} = \underline{S}_{13}^K + \frac{(P_{13}^K)^2 + (Q_{13}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{13} + jX_{13}) \\ &= 55.26 + j24.02 + \frac{55.26^2 + 24.02^2}{220^2} \cdot (4.72 + j16.2) \\ &= 55.61 + j25.24 \text{ MVA}\end{aligned}$$

Знайдемо потужність  $\underline{S}_{A3}^K$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{A3}^K &= \underline{S}_{13}^H + \underline{S}_{P4} + \Delta \underline{S}_{x2} \cdot 2 - j(Q_{13} + Q_{A3}) \\ &= 55.61 + j25.24 + 90.22 + j54 + (0.050 + j0.36) \cdot 2 - j(2.75 + 4.76) \\ &= 195.83 + j107.2 \text{ MVA}\end{aligned}$$

Знайдемо потужність  $\underline{S}_A$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{A3}^H &= \underline{S}_{A3}^K + \Delta \underline{S}_{A3} = \underline{S}_{A3}^K + \frac{(P_{A3}^K)^2 + (Q_{A3}^K)^2}{U_{НОМ}^2} \cdot (R_{A3} + jX_{A3}) \\ &= 195.83 + j107.2 + \frac{195.83^2 + 107.2^2}{220^2} \cdot (8.26 + j28.35) \\ &= 204.34 + j136.39 \text{ MVA} \\ \underline{S}_A &= \underline{S}_{A3}^H - jQ_{A3} = 204.34 + j136.39 - j4.76 = 204.34 + j131.63 \text{ MVA}\end{aligned}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------



Розраховуємо напругу вузла 3, прийнявши напругу джерела  $U_{A'} = 242 \text{ кВ}$

$$U_3 = \sqrt{\left( U_{A'} - \frac{P_{A3}^H \cdot R_{A3} + Q_{A3}^H \cdot X_{A3}}{U_{A'}} \right)^2 + \left( \frac{P_{A3}^H \cdot X_{A3} - Q_{A3}^H \cdot R_{A3}}{U_{A'}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 242 - \frac{204.34 \cdot 8.26 + 136.39 \cdot 28.35}{242} \right)^2 + \left( \frac{204.34 \cdot 28.35 - 136.39 \cdot 8.26}{242} \right)^2}$$

$$= 219.89 \text{ кВ}$$

Розраховуємо напругу вузла 1

$$U_1 = \sqrt{\left( U_3 - \frac{P_{A3}^K \cdot R_{13} + Q_{A3}^K \cdot X_{13}}{U_3} \right)^2 + \left( \frac{P_{A3}^K \cdot X_{13} - Q_{A3}^K \cdot R_{13}}{U_3} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 219.89 - \frac{195.83 \cdot 4.72 + 107.2 \cdot 16.2}{219.89} \right)^2 + \left( \frac{195.83 \cdot 16.2 - 107.2 \cdot 4.72}{219.89} \right)^2}$$

$$= 208.2 \text{ кВ}$$

Визначимо напругу споживача  $S_1$  на ПС-1

$$U_4^B = \sqrt{\left( U_3 - \frac{P_{34}^H \cdot \frac{R_{T1}}{2} + Q_{34}^H \cdot \frac{X_{T1}}{2}}{U_3} \right)^2 + \left( \frac{P_{34}^H \cdot \frac{X_{T1}}{2} - Q_{34}^H \cdot \frac{R_{T1}}{2}}{U_3} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 219.89 - \frac{40.12 \cdot \frac{5.6}{2} + 23.28 \cdot \frac{158.7}{2}}{219.89} \right)^2 + \left( \frac{20.03 \cdot \frac{158.7}{2} - 10.82 \cdot \frac{5.6}{2}}{219.89} \right)^2}$$

$$= 211.5 \text{ кВ}$$

$$U_4 = \frac{U_4^B}{U_B / U_H} = \frac{211.5}{230 / 11} = 10.1 \text{ кВ}$$

Перевіримо отриману напругу на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_4|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|10 - 10.1|}{10} \cdot 100\% = 1\%$$

Напруга в точці 4 споживача  $S_1$  не перевищує припустиме відхилення  $\pm 5\%$

Визначимо напругу споживача  $S_2$  и  $S_3$  на ПС-2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$U_0 = \sqrt{\left( U_1 - \frac{P_{10}^H \cdot R_{TB2} + Q_{10}^H \cdot X_{TB2}}{U_1} \right)^2 + \left( \frac{P_{10}^H \cdot X_{TB2} - Q_{10}^H \cdot R_{TB2}}{U_1} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 208.2 - \frac{55.24 \cdot \frac{4.3}{2} + 29.4 \cdot \frac{109.2}{2}}{208.2} \right)^2 + \left( \frac{55.24 \cdot \frac{109.2}{2} - 29.4 \cdot \frac{4.3}{2}}{208.2} \right)^2}$$

$$= 200.4 \text{ kV}$$

$$U_5^B = \sqrt{\left( U_0 - \frac{P_{05}^H \cdot R_{TC2} + Q_{05}^H \cdot X_{TC2}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{05}^H \cdot X_{TC2} - Q_{05}^H \cdot R_{TC2}}{U_0} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 200.4 - \frac{35.06 \cdot \frac{4.3}{2} + 15 \cdot \frac{0}{2}}{200.4} \right)^2 + \left( \frac{35.06 \cdot \frac{0}{2} - 15 \cdot \frac{4.3}{2}}{200.4} \right)^2}$$

$$= 200 \text{ kV}$$

$$U_2^B = \sqrt{\left( U_0 - \frac{P_{02}^H \cdot R_{TH2} + Q_{02}^H \cdot X_{TH2}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{02}^H \cdot X_{TH2} - Q_{02}^H \cdot R_{TH2}}{U_0} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( 200.4 - \frac{20.02 \cdot \frac{4.3}{2} + 10.48 \cdot \frac{92.4}{2}}{200.4} \right)^2 + \left( \frac{20.02 \cdot \frac{92.4}{2} - 10.48 \cdot \frac{4.3}{2}}{200.4} \right)^2}$$

$$= 197.8 \text{ kV}$$

$$U_5 = \frac{U_5^B}{U_B / U_H} = \frac{200}{230 / 38.5} = 33.4 \text{ kV} \quad U_2 = \frac{U_2^B}{U_B / U_H} = \frac{197.8}{230 / 6.6} = 5.6 \text{ kV}$$

Перевіримо отриману напругу  $U_5$  на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_5|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|35 - 33.4|}{35} \cdot 100\% = 4.5\%$$

Напруга в точці 5 споживача  $S_3$  не перевищує припустиме відхилення  $\pm 5\%$

Перевіримо отриману напругу  $U_2$  на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_2|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|6 - 5.6|}{6} \cdot 100\% = 6.6\%$$

Напруга в точці 2 споживача  $S_2$  перевищує припустиме відхилення  $\pm 5\%$ .

Прийmemo заходи з регулювання за допомогою РПН

$$U_2 = U_2 + U_2 \cdot (-6 \cdot 1.0\%) = 5.6 + 5.6 \cdot (7 \cdot 1.0\%) = 6 \text{ kV}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Перевіримо отриману напругу на відхилення від  $U_{НОМ}$

$$\frac{|U_{НОМ} - U_2|}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{|6 - 6|}{6} \cdot 100\% = 0\%$$

Результати розрахунку запишемо в таблицю 1.9.

Таблиця 1.9. – Результати розрахунку напруг

Вузол	А	1	2	3	4	5
Напруга до РПН, кВ	242	239.45	5,6	239.34	10,1	33,4
Відхилення від $U_{НОМ}$ , %			6.6		1	4,5
Ступінь РПН			7			
Напруга після РПН, кВ			6			
Відхилення від $U_{НОМ}$ , % після РПН			0			

## 2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ПІДСТАНЦІЇ

### 2.1 Перевірка потужності силових трансформаторів

Розраховуємо двотрансформаторну підстанцію ПС-1, до якої підключене навантаження потужністю  $S_1 = 40 + j20$  МВА.

На підстанції встановлені 2 трансформатори типу ТРДН-40000/220. Визначаємо номінальну потужність встановлених трансформаторів:

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{40^2 + 20^2} = 44.7 \text{ МВА}$$

Проводимо перевірку обраного трансформатора ТРДЦН 40000/220 на здатність без пошкоджень витримати заданий графік навантажень.

Тип трансформатора ТРДЦН 40000/220  
Потужність трансформатора  $S=40$  МВА

Таблиця 2.1 – Навантаження споживачів протягом доби.

ГОДИНИ	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
Scп%	50	40	60	90	80	75	75	90	100	125	150	102
Scп, МВА	22.3	17.8	26.8	40.2	35.7	33.5	33.5	40.2	44.7	55.8	67.05	45.6

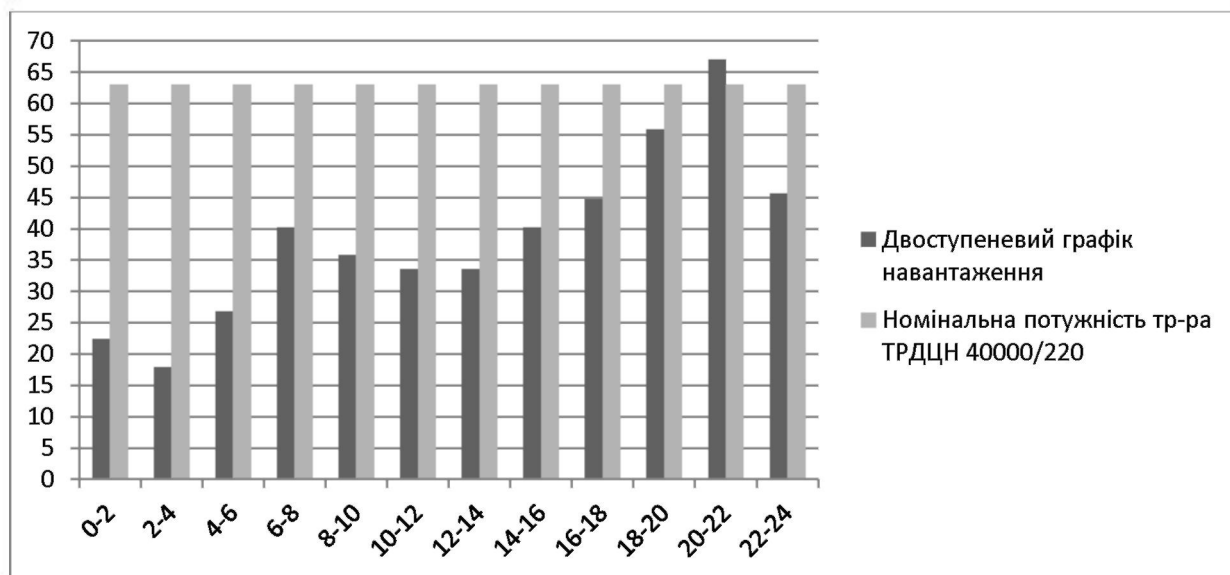


Рисунок 2.1 – Графік навантаження тр-ра підстанції в аварійному режимі.

Для перевірки правильності вибору трансформатора реальний графік навантаження перетворимо в двоступінчастий. Початкове навантаження еквівалентного графіка визначається за формулою:

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot t_1 + S_2^2 \cdot t_2 + \dots + S_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

де  $S_1, S_2, \dots, S_n$  - власне навантаження першого, другого, n-го ступеня графіка навантаження, розташованого нижче лінії номінальної потужності трансформатора.

$t_1, t_2, \dots, t_n$  - тривалість ступеня, годин.

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot t_1 + S_2^2 \cdot t_2 + \dots + S_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} =$$

$$= \frac{1}{40} \sqrt{\frac{(22.3^2 + 17.8^2 + 26.8^2 + 35.7^2) \cdot 2 + (33.5^2 + 33.5^2) \cdot 4}{12}} = 0,87$$

Аналогічно визначається другий ступінь еквівалентного графіка, але при цьому беруться ступені, розташовані вище лінії номінальної потужності трансформатора:

$$K_2 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot t_1 + S_2^2 \cdot t_2 + \dots + S_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

де  $S_1, S_2, \dots, S_n$  - навантаження вище лінії номінальної потужності трансформатора.

$$K_2 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot t_1 + S_2^2 \cdot t_2 + \dots + S_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} =$$

$$= \frac{1}{40} \sqrt{\frac{(2 \cdot 40.2^2 + 45.6^2 + 44.7^2 + 55.8^2 + 67.05^2) \cdot 2}{12}} = 1,37$$

Максимальне перевантаження трансформатора становить

$$K_{\text{max}} = \frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{67.05}{40} = 1.67$$

де  $S_{\text{MAX}}$  - максимальне навантаження трансформатора за графіком навантаження.

Попереднє значення  $K_2$  необхідно порівняти зі значенням  $K_{\text{max}}$ ,

і якщо  $K_2 < 0,9 \cdot K_{\text{max}} \rightarrow$  приймаємо  $K'_2 = 0,9 \cdot K_{\text{max}}$

Так як  $K_2 = 1,37 < 0,9 \cdot 1.67 \rightarrow 1,5 < 1,37 \rightarrow K'_2 = 1,5$  час перенавантаження  $t_{\text{год}} = 12$  годин.

За ДОСТ 14209-85 з урахуванням еквівалентної температури зимового періода (+20°C) та часу перевантаження  $t_{\text{год}}$  знаходимо значення  $K_2$ . Порівнюємо значення  $K_2$  за ДОСТом та реальне. Якщо значення  $K_2$  по ДОСТу

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР 5.6.141.812 ПЗ

Лист

27

менше, ніж реальне, значить трансформатор обрано неправильно тому необхідно узяти трансформатор, більшої потужності.

Можемо зробити висновок:

Так як за ДОСТом 14209-85  $K_{2\text{табл}} = 1,4 < 1,5$  – трансформатор обрано неправильно. Обираємо потужніший трансформатор ТРДЦН 63000/220.

Таблиця 2.2 – Навантаження споживачів протягом доби.

Години	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
Scп%	50	40	60	90	80	75	75	90	100	125	150	102
Scп, МВА	22.3	17.8	26.8	40.2	35.7	33.5	33.5	40.2	44.7	55.8	67.05	45.6

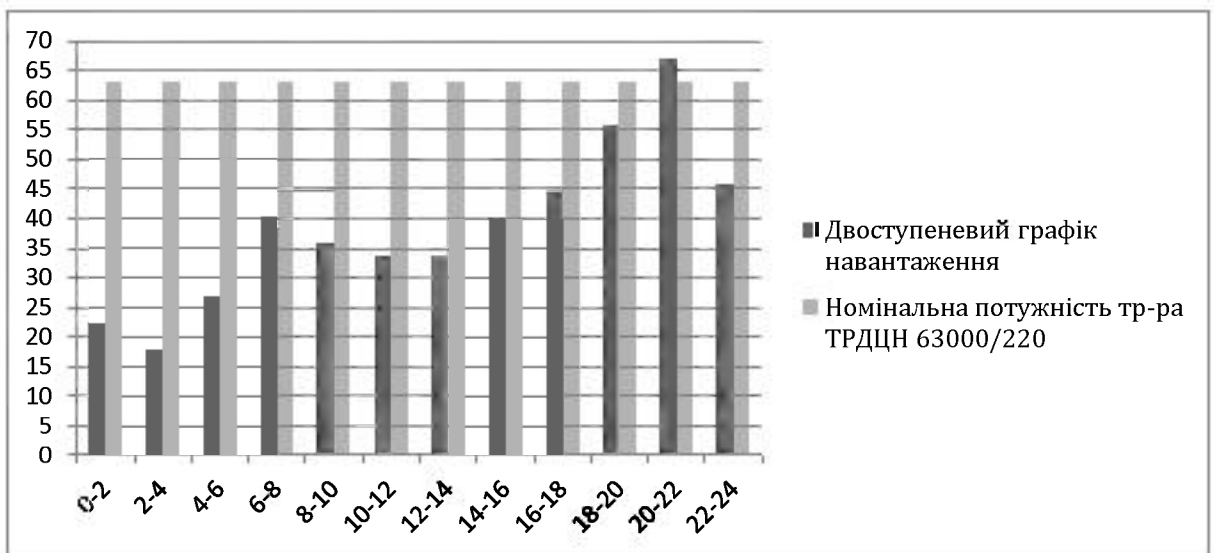


Рисунок 2.2 – Графік навантаження тр-ра підстанції в аварійному режимі.

Для перевірки правильності вибору трансформатора реальний графік навантаження перетворимо в двоступінчастий.

$$K_1 = \frac{1}{63} \sqrt{\frac{41902.22}{22}} = 0,7$$

$$K_2 = \frac{1}{63} \sqrt{\frac{67,05^2 \cdot 2}{2}} = 1,06$$

Максимальне перевантаження трансформатора становить

$$K_{max} = \frac{S_{max}}{S_{ном}} = \frac{67.05}{63} = 1.06$$

Так як  $K_2 = 1,06 < 0,9 \cdot 1,06 \rightarrow 0,95 < 1,06 \rightarrow K'_2 = 1,06$ , час

перенавантаження  $t_{\text{год}} = 2$  години.

Можемо зробити висновок: так як за ДСТом 14209-85  $K_{2\text{табл}} = 1,5 > 1,06$  – трансформатор обрано правильно.

2.2 Розрахунок струмів короткого замикання та вибір високовольтних апаратів.

Таблиця 2.3 - Вихідні дані.

Тип	S, МВА	U, кВ	$X_{T/2}$ , Ом	$X_{л1}$ , Ом	$X_{л2}$ , Ом	$S_c$ , кВА
ТРДЦН 63000/220	44.7	220	46.6	28.35	16.2	3200

Значення струмів короткого замикання необхідні для правильного вибору устаткування на стороні 220 кВ і 10 кВ. Схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання наведена на рис. 2.3.

Розрахунок струмів короткого замикання виконаємо в іменованій системі одиниць.

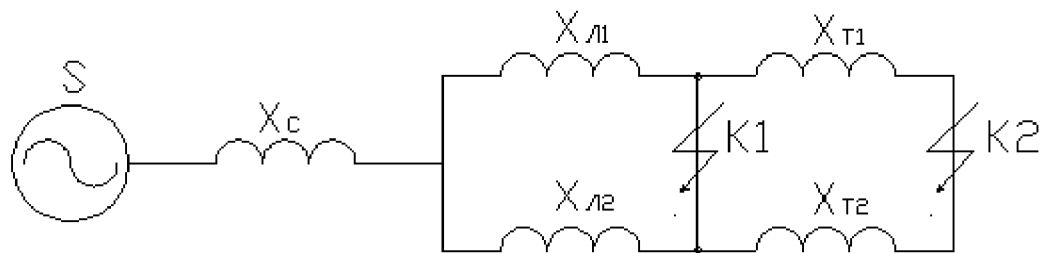


Рисунок 2.3 – Схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання

Опір працюючої лінії  $X_{л} = 10,3$  Ом; трансформаторів  $X_{T/2} = 46,6$  Ом.; опір системи  $X_c = 19,36$  Ом

Періодична складова СКЗ у точці  $K_1$

$$I_{K1} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot (X_c + X_{л})} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot (19,36 + 10,3)} = 4,282 \text{ кА}$$

Періодична складова СКЗ  $K_2$  приведена до напруги вищої сторони

$$I_{K2}^B = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot (X_c + X_{л} + X_T)} = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot (19,36 + 10,3 + 46,6)} = 1,665 \text{ кА}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

реальний ТКЗ у точці  $K_2$

$$I_{k2} = I_{k2}^B \cdot \frac{220}{10} = 1,665 \cdot \frac{220}{10} = 36,63 \text{ кА}$$

Ударний струм

- у точці  $K_1$ :  $i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot I_{k1} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot 4,282 = 9,75 \text{ кА}$ .

- у точці  $K_2$ :  $i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot I_{k2} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot 36,63 = 83,40 \text{ кА}$ .

Допустимо, що амплітуда ЕДС і періодична складова СКЗ незмінні за часом, тому через час, який дорівнює часу відключення

$$I_{пт1} = I_{k1} = 4,282 \text{ кА для точки } K_1.$$

$$I_{пт2} = I_{k2} = 36,63 \text{ кА для точки } K_2.$$

Аперіодична складова СКЗ до моменту розбіжності контактів вимикача

$$i_a = \sqrt{2} \cdot I_{kn} \cdot e^{-\frac{t}{Ta}}$$

$$i_{a1} = \sqrt{2} \cdot I_{k1} \cdot e^{-\frac{t_1}{Ta1}} = \sqrt{2} \cdot 4,282 \cdot e^{-\frac{0,06}{0,025}} = 0,545 \text{ кА}$$

$$i_{a2} = \sqrt{2} \cdot I_{k2} \cdot e^{-\frac{t_2}{Ta2}} = \sqrt{2} \cdot 36,63 \cdot e^{-\frac{0,1}{0,05}} = 6,993 \text{ кА}$$

де  $Ta$  - постійна часу загасання аперіодичної складової.

Для  $K_1$ :  $Ta = 0,025 \text{ с}$ , для  $K_2$ :  $Ta = 0,05 \text{ с}$ .

Інтеграл Джоуля :

$$W_{k1} = I_{k1}^2 \cdot (t + Ta) = 4,282^2 \cdot (0,06 + 0,025) = 1,55 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$W_{k2} = I_{k2}^2 \cdot (t + Ta) = 36,63^2 \cdot (0,1 + 0,05) = 201,26 \text{ кА}^2\text{с}$$

Таблиця 2.4 – Значення струмів короткого замикання.

Струми КЗ	СКЗ у початковий момент часу	Ударний СКЗ, $i_y$	СКЗ у момент розмикання контактів вимикача,	Аперіод. складова ТКЗ, $i_a$	Інтеграл Джоуля $W_k$
Шини 220 кВ ( $K_1$ )	4,282 кА	9,75 кА	4,282 кА	0,545 кА	1,55 (кА) <sup>2</sup> с
Шини 10 кВ ( $K_2$ )	36,63 кА	83,40 кА	36,63 кА	6,993 кА	201,26 (кА) <sup>2</sup> с

Високовольтні електричні апарати вибираються за умовою тривалого режиму роботи і перевіряються за умовами коротких замикань. При цьому для апаратів виконується:

- 1) вибір за напругою;



- 2) вибір за нагріванням при тривалих струмах;
- 3) перевірка на електродинамічну стійкість;
- 4) перевірка на термічну стійкість;

Вибору підлягають:

- вимикачі на боці вищої напруги;
- вступні вимикачі на боці 10 кВ;
- секційні вимикачі на боці 10 кВ;
- вимикачі ліній, що відходять, 10 кВ; роз'єднувачі вищої напруги;
- трансформатори струму і напруги 220 кВ і 10 кВ;
- ошиновка розподільних пристроїв 220 кВ і 10 кВ.

Для вибору апаратів і струмоведучих частин необхідно визначити струми нормального і післяаварійного режимів. Визначення струмів виконується для випадку установки на підстанції силового трансформатора. Розрахованого відповідно до графіка навантаження підстанції.

Струм на боці 220 кВ :

$$I_{\text{мах}}^{\text{ВН}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{1,4 \cdot 63}{\sqrt{3} \cdot 220} = 0,231 \text{ кА.}$$

Струм у колі вступних вимикачів на боці 10 кВ :

$$I_{\text{мах}}^{\text{НН}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{1,4 \cdot 63}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,092 \text{ кА.}$$

Струм у колі секційного вимикача :

$$I_{\text{мах}}^{\text{С.В.}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}} \cdot 2} = \frac{0,7 \cdot 63}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2,546 \text{ кА.}$$

Струм у колі лінії, що відходить :

$$I_{\text{мах}}^{\text{Л.В.}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}} \cdot 10} = \frac{1,4 \cdot 63}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10} = 509,2 \text{ А.}$$

Таблиця 2.5 – Вибір вимикача на боці 220 кВ.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_c \leq U_H$	220 кВ	220 кВ
$I_{\text{расч}} \leq I_{\text{ном}}$	0,231 кА	2 кА
$I_{\text{ПО}} \leq I_{\text{прСКВ}}$	4,282 кА	40 кА
$I_{\text{уд}} \leq I_{\text{СКВ}}$	9,75 кА	102 кА
$I_{\eta\tau} \leq I_{\text{откНОМ}}$	4,282 кА	31,5 кА
$I_{\text{ат}} \leq I_{\text{а ном}}$	0,545 кА	10,245 кА
$B_k \leq I_r^2 t_r$	1,55 (кА) <sup>2</sup> с	4800 (кА) <sup>2</sup> с

Рекомендується установка повітряних вимикачів ВВБ-220Б-31,5/2000У1

Таблиця 2.6 - Вибір вимикачів у колі трансформатора на боці 10 кВ.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	5,092 кА	9,5 кА
$I_{ПО} \leq I_{прСКВ}$	36,63 кА	105 кА
$I_{y\delta} \leq I_{СКВ}$	83,40 кА	300 кА
$I_{\eta\tau} \leq I_{откном}$	36,63 кА	90 кА
$I_{ат} \leq I_{аном}$	6,993 кА	25,5 кА
$B_K \leq I_T^2 t_r$	201,26 (кА) <sup>2</sup> с	32400 (кА) <sup>2</sup> с

Рекомендується установка мало масляних вимикачів МГУ-20-90/9500У3

Таблиця 2.7 - Вибір секційного вимикача на боці 10 кВ.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	2,546 кА	4 кА
$I_{ПО} \leq I_{прСКВ}$	36,63 кА	45 кА
$i_y \leq I_{прСКВ}$	83,40 кА	120 кА
$I_{\eta\tau} \leq I_{откном}$	36,63 кА	45 кА
$I_{ат} \leq I_{аном}$	6,993 кА	-
$B_K \leq I_T^2 t_r$	201,26 (кА) <sup>2</sup> с	8100 (кА) <sup>2</sup> с

Рекомендується установка мало масляного вимикача МГГ-10-4000-45У3

Таблиця 2.8 - Вибір роз'єднувачів 220 кВ.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	220 кВ	220 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	0,231 кА	0,63 кА
$i_{y\delta} \leq I_{прСКВ}$	9,75 кА	100 кА
$B_K \leq I_T^2 t_r$	1,55 (кА) <sup>2</sup> с	4800 (кА) <sup>2</sup> с

Рекомендується установка роз'єднувачів РНД-220/630Т1

Таблиця 2.9 - Вибір вимикачів на лінію, що відходить, 10 кВ.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_c \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	0,509 кА	3,1 кА
$I_{пю} \leq I_{прСКВ}$	36,63 кА	45 кА
$i_y \leq I_{прСКВ}$	83,40 кА	120 кА
$I_{\eta\tau} \leq I_{откном}$	36,63 кА	45
$I_{ат} \leq I_{аном}$	6,993 кА	-
$B_k \leq I_r^2 t_r$	201,26 (кА) <sup>2</sup> с	8100 (кА) <sup>2</sup> с

Рекомендується установка мало масляних вимикачів МГГ-10-3150-45УЗ

### 2.3. Вибір ошиновки розподільних пристроїв:

Ошиновку в РП 220 кВ виконують, як правило, сталевалюмінієвими проводами марки АС, при цьому перетин шин повинен бути не менше 240мм<sup>2</sup> (за умовами коронування). Вибір перетину здійснюється за довгостроково допустимим струмом та економічною щільністю струму.

$$F_e = \frac{I_{\max}^{\text{ВН}}}{j_e} = \frac{231}{1,1} = 210 \text{ мм}^2$$

Вибираємо провід АС 240/32, ( $I_{\text{доп}}=605 \text{ А} > 231 \text{ А}$ )

Мінімальний перетин (виходячи з умови термічної стійкості) визначається за формулою :

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{1,55 \cdot 10^6}}{91} = 13,051 \text{ мм}^2$$

Перетин 240 мм<sup>2</sup> підходить і за термічною стійкістю.

За режимом КЗ згідно з ПУЕ повинні перевірятися повітряні лінії електропередач при  $i_{уд1} > 50 \text{ кА}$  для попередження сплітання проводів при динамічній дії струмів КЗ. Так як  $i_{уд1} = 9,75 \text{ кА}$ , то перевірку на динамічну стійкість не виконуємо.

Ошиновка закритих РП 10 кВ виконується твердими шинами. Вибір перетину також виконується за допустимим струмом.

Вибираємо коробчасті шини 200x90x10,  $I_{\text{доп}}=7550 \text{ А}$ ,  $J=4220 \text{ см}^4$ ,  $W_{yoy0}=422 \text{ см}$ ,  $W_{yу}=40 \text{ см}$ ,  $q=3435 \text{ мм}^2$ ,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР 5.6.141.812 ПЗ

Лист

33

$$v_{\text{доп}} = 70^{\circ}\text{C}, v_{\text{факт}} = 30^{\circ}\text{C}, v_{\text{норм}} = 25^{\circ}\text{C}.$$

Де  $J$ - момент інерції поперечного перерізу шини щодо осі, перпендикулярної до напрямку згинаючої сили,  $\text{см}^4$ ;

$q$ - поперечний переріз шини,  $\text{см}^2$ ;

$W_{y_0y_0}$  – момент опору двох зрощених шин,  $\text{см}$ ;

$W_{yy}$  – момент опору однієї шини,  $\text{см}$ .

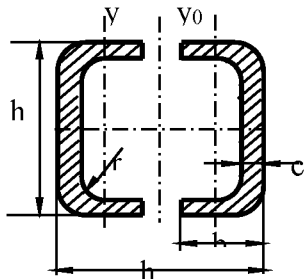


Рисунок 2.4 – Шини коробчастого перерізу

З урахуванням температури навколишнього середовища вводиться поправка на  $I_{\text{доп}}$  :

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \cdot \sqrt{\frac{v_{\text{доп}} - v_{\text{факт}}}{v_{\text{доп}} - v_{\text{норм}}}} = 7550 \cdot \sqrt{\frac{70 - 30}{70 - 25}} = 7,097 \text{ кА}$$

Тверді шини повинні бути перевірені на динамічні дії струмів КЗ і на можливість виникнення резонансних явищ. Зазначені явища не виникають при КЗ, якщо власна частота коливань шини менше 30 і більше 200 Гц. Частота власних коливань для алюмінієвих шин визначається за формулою

$$f_0 = \frac{173.2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}} = \frac{173.2}{1,5^2} \sqrt{\frac{4220}{2 \cdot 3435 \cdot 10^{-2}}} = 603,3 \text{ Гц}, > 200 \text{ Гц}$$

де  $l$ - довжина прольоту між ізоляторами  $l=1,5$  м;

Умовою механічної міцності шин є

$$\sigma_{\text{расч}} \leq \sigma_{\text{доп}}$$

де  $\sigma_{\text{расч}}$  - розрахунковий механічний напрумок у матеріалі шин, МПА,

$\sigma_{\text{доп}} = 82,3$  МПА - допустима механічна напруга в матеріалі шин для алюмінію марки АТ, А1.

Визначимо розрахункову механічну напругу за формулою :

$$\sigma_{\text{расч}} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{i_y^2 l^2}{W_{y_0y_0} \cdot a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{(83,40 \cdot 10^3)^2 1,5^2}{422 \cdot 0,8} = 0,802 \text{ МПа}$$

де  $a = 0,8$  м - відстань між фазами.

Визначимо силу взаємодії між швелерами :

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

$$f_n = \frac{0,5 \cdot i_y^2 \cdot 10^{-7}}{h \cdot 10^{-3}} = \frac{0,5 \cdot (83,40 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-7}}{200 \cdot 10^{-3}} = 1738,9 \text{ Н/м}$$

Визначаємо максимальну відстань між місцями зварювання швелерів :

$$l_{\text{пмах}} = \sqrt{\frac{12(\sigma_{\text{доп}} - \sigma_{\text{расч}}) \cdot W_{yy}}{f_n}} = \sqrt{\frac{12(82,3 - 0,802) \cdot 40}{1738,9}} = 4,74 \text{ м}$$

Зварювання не потрібне, так як відстань між опорними ізоляторами набагато менша максимальної відстані між місцями зварювання швелерів.

#### 2.4. Вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Для ввімкнення електровимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту необхідна установка трансформаторів струму і напруги. У даному проекті релейний захист детально не розробляється, тому перевірку трансформаторів за вторинним навантаженням виконуємо з урахуванням ввімкнення тільки вимірювальних приладів.

У колі силового трансформатора з боку нижчої напруги встановлюється амперметр, вольтметр, варметр, лічильники активної і реактивної енергії, на шинах 220 кВ – вольтметр із перемикачем для виміру трьох міжфазових напруг, на секційному вимикачі 10 кВ – амперметр, на лініях, що відходять, 10 кВ – амперметр, лічильники активної і реактивної енергій. Розрахунок вторинного навантаження трансформатора струму наведений у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Розрахунок вторинного навантаження тр-ра струму.

Прилад	Тип	Клас	Навантаження по фазах		
			А	В	С
Амперметр	Э-335	1	0,5	0,5	0,5
Ваттметр	Д350	1,5	0,5	-	0,5
Варметр	Д345	1,5	0,5	-	0,5
Лічильник активної енергії	СА3	1	2,5	-	2,5
Лічильник реактивної енергії	СР-4	1,5	2,5	-	2,5
Сумарне навантаження струму в колі силового тр-ра з боку НН			6,5	0,5	6,5
Сумарне навантаження струму в колі секц. вимикача на НН			0,5	0,5	0,5
Сумарне навантаження струму в колі силового тр-ра на боці ВН			0,5	0,5	0,5
Сумарне навантаження струму в колі відхідної лінії			0,5	0,5	0,5

Вибір трансформаторів струму наведений у таблицях 2.11-2.13.

Таблиця 2.11 – Вибір трансформатора струму в колі силового трансформатора на боці вищої напруги (220 кВ) :

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_c \leq U_H$	220 кВ	220 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	0,231 кА	0,5 кА
$i_y \leq I_{прСКВ}$	9,75 кА	25 кА
$B_k \leq I_T^2 t_r$	1,55 (кА) <sup>2</sup> с	288 (кА) <sup>2</sup> с
$Z_H \leq Z_{H.ном}$	0,83 Ом	1,2 Ом

Для перевірки за вторинним навантаженням визначаємо опір приладів

$$Z_{прил} = \frac{S_{прил}}{I^2} = \frac{0,5}{5^2} = 0,02 \text{ Ом}$$

Тоді опір сполучних проводів може бути

$$Z_{пр} = Z_{ном} - Z_{прил} - Z_k$$

де:  $Z_{пр}$  – номінальний опір навантаження, Ом;

$Z_{прил}$  – опір приладів, Ом;

$Z_k$  – опір контактів, Ом.

$$Z_{пр} = 1,2 - 0,02 - 0,1 = 1,08 \text{ Ом.}$$

Перетин сполучних проводів за умовами механічної міцності повинний бути не менше ніж 4 мм<sup>2</sup> для алюмінієвих жил.

Перетин жил при довжині кабеля  $l = 100 \text{ м}$

$$Z_{пр} = \rho \frac{l}{F}$$

де:  $\rho$  – питомий опір алюмінію,  $0,0283, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$  ,

$F$  – перетин жил,  $\text{мм}^2$  ,

$$Z_{пр} = 0,0283 \cdot \frac{100}{4} = 0,71 \text{ Ом}$$

Загальний опір струмового кола

$$Z_H = Z_{прил} + Z_k + Z_{пр} = 0,02 + 0,1 + 0,71 = 0,83 \text{ Ом}$$

що менше ніж 1,2 Ом, припустимих при роботі трансформатора в класі точності 0,5.

Трансформатор струму ТФЗМ-220Б-III відповідає умовам вибору.

Таблиця 2.12 – Вибір трансформатора струму у колі трансформатора на боці 10 кВ:

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	5,092 кА	5 кА
$i_y \leq i_{дин}$	83,40 кА	-
$B_K \leq I_T^2 t_r$	201,26 (кА) <sup>2</sup> с	3675 (кА) <sup>2</sup> с
$Z_H \leq Z_{H.ном}$	0,643	1,2

Для перевірки за вторинним навантаженням визначаємо опір приладів

$$Z_{прил} = \frac{S_{прил}}{I^2} = \frac{6,5}{5^2} = 0,26 \text{ Ом}$$

Тоді опір сполучних проводів може бути

$$Z_{пр} = Z_{ном} - Z_{прил} - Z_K$$

де:  $Z_{пр}$  – номінальний опір навантаження, Ом;

$Z_{прил}$  – опір приладів, Ом;

$Z_K$  – опір контактів, Ом.

$$Z_{пр} = 1,2 - 0,26 - 0,1 = 0,84 \text{ Ом.}$$

Перетин сполучних проводів за умовами механічної міцності повинний бути не менше ніж 4 мм<sup>2</sup> для алюмінієвих жил.

Перетин жил при довжині кабеля  $l = 40$  м

$$Z_{пр} = \rho \frac{l}{F}$$

де:  $\rho$ - питомий опір алюмінію,  $0,0283, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$ ,

$F$ - перетин жил,  $\text{мм}^2$ ,

$$Z_{пр} = 0,0283 \cdot \frac{40}{4} = 0,283 \text{ Ом}$$

Загальний опір струмового кола

$$Z_H = Z_{прил} + Z_K + Z_{пр} = 0,26 + 0,1 + 0,283 = 0,643 \text{ Ом}$$

що менше ніж 1,2 Ом, припустимих при роботі трансформатора в класі точності 0,5.

Рекомендується вибрати трансформатор ТШЛ-10.

Таблиця 2.13 – Вибір трансформатора струму на лінії, що відходить

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{расч} \leq I_{ном}$	0,509 кА	0,8 кА
$i_y \leq i_{дин}$	83,40 кА	100 кА
$B_K \leq I_T^2 t_r$	201,26 (кА) <sup>2</sup> с	992,5 (кА) <sup>2</sup> с
$Z_H \leq Z_{H.ном}$	0,1483 Ом	0,4 Ом

Для перевірки за вторинним навантаженням визначаємо опір приладів

$$Z_{\text{прил}} = \frac{S_{\text{прил}}}{I^2} = \frac{0,5}{5^2} = 0,02 \text{ Ом}$$

Тоді опір сполучних проводів може бути

$$Z_{\text{пр}} = Z_{\text{ном}} - Z_{\text{прил}} - Z_K$$

де:  $Z_{\text{пр}}$  – номінальний опір навантаження, Ом;

$Z_{\text{прил}}$  – опір приладів, Ом;

$Z_K$  – опір контактів, Ом.

$$Z_{\text{пр}} = 1,2 - 0,02 - 0,1 = 1,08 \text{ Ом.}$$

Перетин сполучних проводів за умовами механічної міцності повинний бути не менше ніж  $4 \text{ мм}^2$  для алюмінієвих жил.

Перетин жил при довжині кабеля  $l = 4 \text{ м}$

$$Z_{\text{пр}} = \rho \frac{l}{F}$$

де:  $\rho$ - питомий опір алюмінію,  $0,0283, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$  ,

$F$ - перетин жил,  $\text{мм}^2$  ,

$$Z_{\text{пр}} = 0,0283 \cdot \frac{4}{4} = 0,0283 \text{ Ом}$$

Загальний опір струмового кола

$$Z_H = Z_{\text{прил}} + Z_K + Z_{\text{пр}} = 0,02 + 0,1 + 0,0283 = 0,1483 \text{ Ом}$$

що менше ніж 1,2 Ом, припустимих при роботі трансформатора в класі



точності 0,5.

Беремо до установки трансформатор струму ТОЛ-10.

Вибір трансформаторів напруги

Вибір трансформаторів напруги проводиться по напрузі та потужності.

Таблиця 2.14 – Вибір трансформатора напруги з боку ВН

Тип	Клас напруги	Номінальна напруга обмоток, В			Номінальна потужність у класі, ВА	Гранична потужність, ВА	Схема з'єднання.
		Первинна	Основна вторинна	Додаткова вторинна			
НКФ-220-58У1	220	$150000/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$	100	400	2000	1/1/1-0-0

Таблиця 2.15 – Вибір трансформатора напруги з боку НН

Тип	$U_{ном}$	$U_{max}$	Номінальна напруга обмоток, В			$S_{ном}$ , ВА	$S_{ном}$ додаткова, ВА	$S_{max}$	Схема з'єднання
			Первинна	Вторинна	Дод. вторинна				
НОЛ.09-10.02	10	12	$\frac{10000}{\sqrt{3}}$	$\frac{100}{\sqrt{3}}$	100	75	300	630	1/1/1-0-0

## 2.5. Обґрунтування схеми електричних з'єднань підстанції.

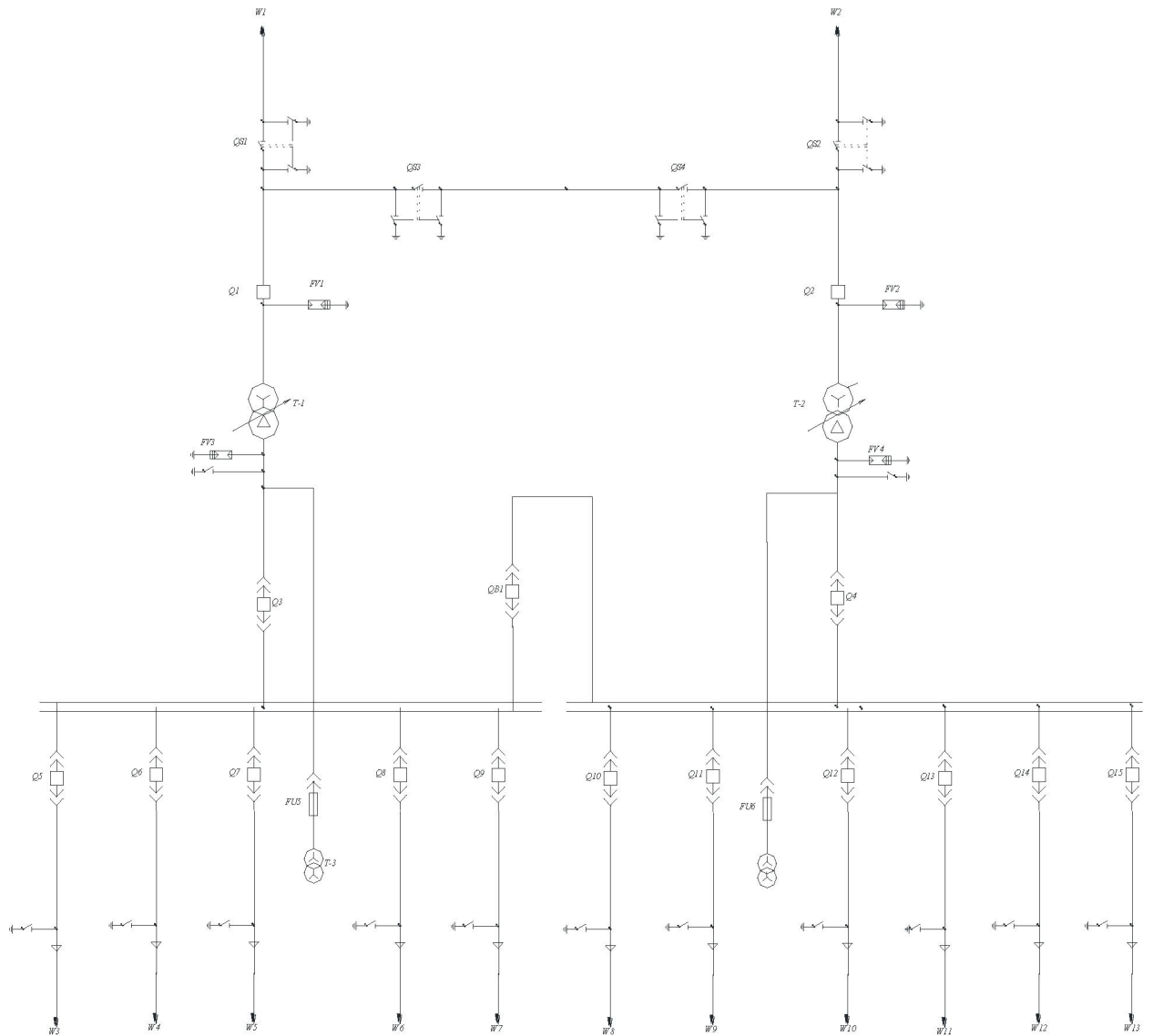


Рисунок 2.5 – Схема електричних з'єднань підстанції.

Використання даного типу схем електричних з'єднань підстанції зумовлене в першу чергу надійністю в порівнянні зі схемами з однією секцією шин та меншою вартістю проектування у порівнянні зі схемами, де використовується дві секції шин з декількома смугами збірних шин на секцію. Даний тип схеми дозволяє рівномірно розподілити навантаження на трансформаторну підстанцію, а також забезпечити безперебійне живлення споживачів у випадках аварійних вимкнень живлення на підстанції завдяки наявності секційного вимикача QВ1. В даній схемі живлення споживачів відбувається від двотрансформаторної підстанції по двом лініям марки проводів

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

БР 5.6.141.812 ПЗ

Лист

40

АС-240/32. Комутація ліній з боку вищої напруги відбувається завдяки вимикачам Q1 та Q2. З боку низької напруги комутація відбувається завдяки вимикачам автоматичним Q3 та Q4. Роз'єднувачі QS разом із короткозамикачами дозволяють відімкнути лінію у разі необхідності, а також шляхом створення штучного КЗ. Секційний вимикач з боку низької напруги дозволяє здійснити живлення споживачів обох секцій одночасно від одного трансформатора у випадку ремонту іншого.

Розглянемо випадок, коли на підстанції відбулося КЗ. Для цієї схеми, у нормальному режимі секційний вимикач розімкнений. Якщо КЗ відбулося на шині низької напруги на секції та, що зліва, мають спрацювати автоматичні вимикачі Q3 та всі вимикачі на лініях, що відходять. Також може спрацювати запобіжник на лінії трансформатора напруги та трансформатора власних потреб, якщо струм перевищить встановлене значення струму плавкої вставки запобіжника. При КЗ на шині з боку високої напруги спрацює вимикач на лінії до трансформатора.

Якщо ж необхідно вивести у ремонт одну із ліній, що живлять споживачів, то потрібно замкнути секційний вимикач, і живлення всіх споживачів відбудеться через один трансформатор. У разі виникнення КЗ у лінії що відходить спрацює вимикач тільки в цій лінії.

## 2.6. Вибір трансформаторів власних потреб

Приймачами власних потреб є:

- оперативні кола;
- електродвигуни, системи охолодження силових трансформаторів, висвітлення і електроопалення приміщень;
- електропідігрівання комутаційної апаратури і т.д.

Сумарна розрахункова потужність приймача власних потреб визначається з урахуванням коефіцієнтів попиту. Розрахунок потужності приймача власних потреб наведений у табл. 16.

На підстанції передбачається установка 2 трансформаторів власних потреб. Номінальна потужність вибирається з умов  $S_{ТСН} \geq S_{СН}$ ,

де  $S_{ТСН}$  - потужність трансформатора власних потреб, кВА;

$S_{СН}$  - потужність споживачів власних потреб, кВА.

									Лист
									41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Таблиця 2.16 – Розрахунок потужності приймачів власних потреб

№ п/п	Найменування споживача	Установлена потужність		$\cos \varphi$	$tg \varphi$	Навантаження	
		Одиниці, кВт кількість	Всього, кВт			$P_{уст},$ кВт	$Q_{уст},$ кВАр
1	Охолодження трансформаторі в ТД 63000/220	2x29,6	59,2	0,85	0,62	59,2	36,7
2	Підігрів високовольтних вимикачів зовнішньої установки	2x3,6	7,2	1	-	7,2	-
3	Підігрів приводів роз'єднувачів зовнішньої установки	4x0,6	2,4	1	-	2,4	-
4	Опалення, освітлення, вентиляція закритого РУ	5	5	1	-	5	-
5	Освітлення РУ	5	5	1	-	5	-
	Всього					78,8	36,7

Розрахункове навантаження

$$S_{уст} = K_C \cdot \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2}$$

$K_C$  – коефіцієнт попиту. Приймаємо рівним 0,8

$$S_{уст} = 0,8 \cdot \sqrt{78,8^2 + 36,7^2} = 69,54 \text{ кВА}$$

Під час ввімкнення цього навантаження на один трансформатор допускається його перевантаження на 20%. Потужність трансформатора для забезпечення живлення навантаження власних потреб з урахуванням ремонтних навантажень. Ремонтне навантаження на підстанції можна брати таким, що дорівнює  $S_{ТСР}$  20 – 25 кВА.

$$S_{ТСН} = \frac{S_{ТСР} + S_{СН}}{1,2} = \frac{69,54 + 20}{1,2} = 74,61 \text{ кВА.}$$

Беремо стандартну потужність трансформатора  $S_{ТСН} = 100$  кВА. Остаточну

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

для живлення споживача власних потреб беремо два трансформатори стандартної потужності: ТМ-100/10.

## 2.7. Компонування розподільних пристроїв на боці 220 кВ.

Підстанції (ПС) 220 кВ споруджують, як правило, відкритими.

Спорудження закритих ПС напругою 220 кВ, допускається в таких випадках: розміщення ПС із трансформаторами 16 МВА і вище на службовій території міст, розміщення ПС на території міст, коли це допускається містобудівним міркуванням.

На ПС електропостачання промислових підприємств передбачається водяне опалення, приєднане до теплових мереж підприємств.

Будинки ЗРУ (закритих РУ) допускається виконувати як окремо розміщені, так і зблокованими з будинками РПУ в тому числі і по вертикалі.

Трансформатори 220 кВ варто установлювати відкритими, а у районах із забрудненою атмосферою з посиленою ізоляцією.

Схеми для напруг 220 кВ і вище повинні складатися з урахуванням таких вимог: ремонт вимикачів 110 кВ і вище виконується без відключення приєднань: повітряні лінії відключаються від РП не більше ніж двома вимикачами, трансформатори блоків відключаються не більше ніж трьома вимикачами і т.ін.

При відключеннях вимикачів у нормальному режимі РП не повинне відключати більше одного блока, у ремонтному - не більше двох блоків.

Для РП 35-220 кВ при числі приєднань 12-16 одну з двох систем секціонують, при числі приєднань більш ніж 16 -секціонують обидві системи шин.

## 2.8. Компонування розподільних пристроїв на боці 10 кВ.

РП 10 кВ входять до складу підстанцій як головні РП. До РП 10 кВ підстанцій підключаються понижуючі трансформатори, синхронні компенсатори та ін.

Схеми РП 10 кВ повинні задовольняти наступним вимогам: неспрацювання вимикача не повинне приводити до припинення електропостачання відповідальних споживачів (1 категорія по ПУЭ),

					БР 5.6.141.812 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

розширення РП з ростом навантажень не повинне приводити до зміни схеми і значних будівельних і монтажних робіт.

Секціювання збірних шин дозволяє задовольнити вимоги надійності. Розширення РП здійснюється заповненням резервних осередків або введенням нової секції.

РУ 10 кВ для комплектних трансформаторів ПС виконується у вигляді КРУН або КРУ, встановлюваних у закритих приміщеннях. У ЗРУ 10 кВ рекомендується встановлювати шафи КРУ заводського виготовлення.

## 2.9. Заземлюючі пристрої підстанції.

Усі електричні частини електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою, але здатні виявитися під ним через ушкодження ізоляції, повинні надійно з'єднуватися із землею. Таке заземлення називається захисним.

Заземлення, призначене для створень нормальних умов роботи апарата або електроустановки, називається робочим.

Для захисту устаткування від ушкодження ударом блискавки застосовується грозозахист за допомогою розрядників, стрижневих і тросових блискавководів, що приєднуються до грозозахисного заземлення. На підстанціях використовується один загальний пристрій, що заземлює.

					БР 5.6.141.812 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

### 3 РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Визначення параметрів, необхідних для розрахунку захисту трансформаторів

Згідно завдання, необхідно виконати розрахунок захисту для трансформатора типу ТРДЦН-63000/220. Трансформатор отримує живлення від енергосистеми з параметрами  $x_{с.макс} = 12 \text{ Ом}$ ;  $x_{с.мин} = 18 \text{ Ом}$  (опір наведено до  $U_{ср.ном} = 230 \text{ кВ}$ ).

1. Для складання схеми заміщення (рис. 3.1) розрахуємо опір трансформатора:

а) загальне індуктивний опір:

$$X_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном}^2}{S_H} = \frac{12}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 100.8 \text{ Ом}$$

б) опір обмотки вищої напруги:

$$X_B = 0.125 \cdot X_T = 0.125 \cdot 100.8 = 12.6 \text{ Ом}$$

в) опір обмотки нижчої напруги:

$$X_H = 1.75 \cdot X_T = 1.75 \cdot 100.8 = 176.3 \text{ Ом}$$

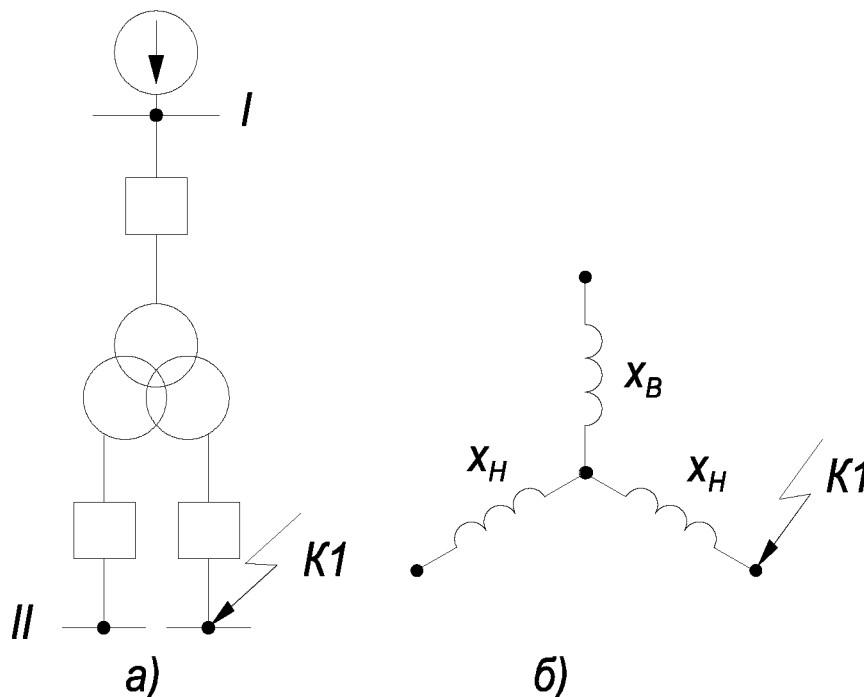


Рисунок 3.1. – Схема (а) і схема заміщення (б) трансформатора з розщепленою обмоткою.

2. При розрахунках струмів КЗ для захистів трансформаторів з РПН слід врахувати зміну опору за рахунок регулювання напруги. Для трансформаторів 220 кВ наближено можна прийняти:

$$x_{н.мин} = x_{н.ном} \cdot (1 - \Delta U)^2 = 12.6 \cdot (1 - 0.12)^2 = 9.8 \text{ Ом}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР 5.6.141.812 ПЗ

Лист

45

$$x_{н.маx} = x_{н.ном} \cdot (1 + \Delta U)^2 = 12.6 \cdot (1 + 0.12)^2 = 15.8 \text{ Ом}$$

Тоді

$$x_{в.мин} = x_{в.ном} \cdot (1 - \Delta U)^2 = 176.3 \cdot (1 - 0.12)^2 = 136.6 \text{ Ом}$$

$$x_{в.маx} = x_{в.ном} \cdot (1 + \Delta U)^2 = 176.3 \cdot (1 + 0.12)^2 = 221.2 \text{ Ом}$$

3. Струм короткого замикання на шинах нижчої напруги (точка К1, рис. 3.1):

$$I_{к.маx}^{(3)} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \cdot (x_{с.маx} + x_{в.мин} + x_{н.мин})} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot (12 + 136.6 + 9.8)} = 839 \text{ А}$$

$$I_{к.мин}^{(2)} = \frac{U_{ср.ном}}{2 \cdot (x_{с.мин} + x_{в.маx} + x_{н.маx})} = \frac{230}{2 \cdot (18 + 221.2 + 15.8)} = 451 \text{ А}$$

3.2 Подовжній диференціальний струмовий захист.

1. Струм спрацьовування захисту визначається за більшим з двох розрахункових умов: а) відбудова від кидка струму намагнічування, що виникає при включенні трансформатора на холостий хід або при відновленні напруги після відключення КЗ, а також від перехідних струмів небалансу при зовнішніх КЗ:

$$I_{с.з} = k_{отс} \cdot I_{ном}$$

де  $k_{отс}$  - коефіцієнт відбудови, для реле типу РНТ  $k_{отс} = 1,3$ ;  $I_{ном}$  - номінальний струм тієї сторони трансформатора, напруга якої прийнято в якості розрахункової;

$$I_{ном} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.ном}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 230} = 158 \text{ А}$$

$$I_{с.з} = 1.3 \cdot 158 = 206 \text{ А}$$

б) відбудова від максимального періодичного струму небалансу, що виникає при зовнішніх КЗ:

$$I_{с.з} \geq k_з \cdot I_{нб.расч}$$

де  $k_з = 1,3$  - коефіцієнт запасу по вибірковості;  $I_{нб.расч}$  - максимальний розрахунковий струм небалансу, який визначається як сума трьох складових, пропорційних періодичної складової струму КЗ,

$$I_{нб.расч} = I'_{нб.расч} + I''_{нб.расч} + I'''_{нб.расч}$$

складова струму  $I'_{нб.расч}$  обумовлена похибкою трансформатора струму:

$$I'_{нб.расч} = k_{одн} \cdot \varepsilon \cdot I_{к.маx}$$

де  $k_{одн} = 1,0$ ;  $\varepsilon = 0,1$ ;  $I_{к.маx}$  - максимальний струм зовнішнього КЗ, приведений до розрахункової ступені напруги.

Складова  $I''_{нб.расч}$  обумовлена регулюванням коефіцієнта трансформації

										Лист
										46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						



силового трансформатора (автотрансформатора) після того, як захист був збалансований на середній відпайці. Це складова визначається як сума струмів небалансу на сторонах, де є регулювання:

$$I''_{\text{нб.расч}} = \sum_{n=1}^{III} \Delta U_n \cdot I_{\text{к.мах.н}}$$

де  $\Delta U_n$  - відносна похибка регулювання напруги, приймається рівною половині діапазону регулювання боку  $n$  трансформатора (якщо регулювання  $\pm 10\%$ , то  $\Delta U_n = 0,1$ );  $I_{\text{к.мах.н}}$  - максимальний періодичний струм, що протікає по стороні  $n$  трансформатора. Складова  $I'''_{\text{нб.расч}}$  обумовлена неточністю установки на реле розрахункових чисел витків:

$$I'''_{\text{нб.расч}} = \sum_{n=1}^{III} \Delta w_n \cdot I_{\text{к.мах.н}}$$

де  $\Delta w_n = \frac{w_{n.\text{расч}} - w_n}{w_n}$  - похибка вирівнювання для сторони  $n$

трансформатора.

З урахуванням наведених виразів виконуємо розрахунок струму спрацьовування захисту по умові налагодження від струму небалансу:  $I_{\text{с.з}} = k_3 \cdot (k_{\text{одн}} \cdot \varepsilon + \Delta U_I) \cdot I_{\text{к.мах}}^{(3)} = 1.3 \cdot (1.0 \cdot 0.1 + 0.12) \cdot 839 = 240 \text{ А}$

Приймаємо більше значення  $I_{\text{с.з}} = 240 \text{ А}$ .

2. Вибір типу реле виробляється на основі оцінки чутливості захисту, яку визначаємо наближено, вважаючи, що весь струм ушкодження (приведений до вторинної сторони) потрапляє в реле. Попередня перевірка чутливості проводиться по первинному току при двофазному КЗ на стороні НН, при цьому повинна виконуватися умова:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}^{(2)}}{I_{\text{с.з}}} \geq 2.0$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{451}{240} = 1.88 < 2$$

3. Оскільки захист з реле типу РНТ не забезпечує чутливості, то застосовуємо реле типу ДЗТ-11, для якого струм спрацьовування захисту вибирається за умовами:

а) відбудова від кидка намагнічує струму

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном}} = 1.5 \cdot 158 = 237$$

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном}} = 1.5 \cdot 316 = 474,4 \text{ А}$$

б) відбудова від струму небалансу при КЗ на низькій стороні

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$I_{c.з} = k_з \cdot (k_{одн} \cdot \varepsilon + \Delta U_I) \cdot I_{к.мах}^{(3)} = 1.5 \cdot (1.0 \cdot 0.1 + 0.12) \cdot 839 = 277 \text{ А}$$

Струм спрацьовування захисту приймаємо по більшому з умов

$$I_{c.з} = 277 \text{ А.}$$

4. Визначаємо чутливість захисту при КЗ на стороні НН при мінімальному регулюванні:

$$k_ч = \frac{I_{к.мин}^{(2)}}{I_{c.з}} = \frac{451}{277} = 1.63$$

Це значення  $k_ч$  дещо менше нормованого, проте, вже при номінальному коефіцієнті трансформації трансформатора струм КЗ складе:

$$I_{к.мин}^{(2)} = \frac{U_{ср.ном}}{2 \cdot (x_{с.мин} + x_B + x_H)} = \frac{230}{2 \cdot (18 + 12.6 + 176.3)} = 556 \text{ А}$$

і необхідний коефіцієнт чутливості забезпечується

$$k_ч = \frac{556}{277} = 2.01$$

Тому захист з реле ДЗТ-11 може бути застосований.

Тепер проведемо вибір уставок реле типу ДЗТ-11

1. Визначаємо первинні номінальні струми для двох сторін захищається за формулою:

$$I_{ном.н} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.н}}$$

де  $S_{ном}$  - номінальна потужність трансформатора;

$U_{ном.н}$  - номінальну напругу боку захищається.

Для сторони високої напруги 230 кВ:

$$I_{ном.н} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 158 \text{ А}$$

Для сторони низької напруги 10,5 кВ:

$$I_{ном.н} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 3464 \text{ А}$$

2. Визначаємо вторинні номінальні струми плечей захисту:

$$I_{в.ном.н} = \frac{I_{ном.н} \cdot k_{сх.н}}{K_{I.n}}$$

де  $k_{сх.н}$  - коефіцієнт схеми з'єднання вторинних обмоток трансформатора на захищається стороні об'єкта (при з'єднанні обмоток в зірку  $k_{сх} = 1,0$ ; при з'єднанні обмоток в трикутник  $k_{сх} = \sqrt{3}$ );

$K_{I.n}$  - коефіцієнт трансформації трансформатора, прийнятий на захищається стороні об'єкта (при виборі коефіцієнта ТТ треба враховувати, щоб

										Лист
										48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

вторинні номінальні струми істотно не перевищували паспортні значення струмів 5 А або 1 А). Сторона з найбільшим вторинним струмом приймається як основний, що забезпечує найменшу похибку вирівнювання для реле.

Для сторони високого напруги 230 кВ:

$$I_{в.ном.н} = \frac{158 \cdot \sqrt{3}}{300/5} = 4.57 \text{ А}$$

Для сторони низької напруги 10,5 кВ

$$I_{в.ном.н} = \frac{3464}{4000/5} = 4.33 \text{ А}$$

Враховуючи, що обмотка низької напруги трансформатора виконана розщепленою, отримане значення струму необхідно подвоїти -  $I_{в.ном.н} = 8,66 \text{ А}$ .

Отримані розрахункові дані наводимо в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Розрахунок первинних та вторинних струмів сторін трансформатора

позначення параметрів	I – ВН- 230 кВ	II - НН- 10,5 кВ
$I_{ном.н}, \text{ А}$	158	3464
$K_{In}$	300/5	4000/5
Схема з'єднання трансформатора	трикутник	зірка
$I_{в.ном.н}, \text{ А}$	4,57	8,66

З таблиці 3.1 випливає, що в якості основної слід взяти сторону низької напруги (10,5 кВ), що має більший вторинний номінальний струм.

3. Струм спрацьовування реле для основної сторони трансформатора визначаємо за виразом:

$$I_{с.р.н} = \frac{I_{с.з} \cdot k_{сх} \cdot \left( \frac{U_{ном.расч}}{U_{ном.н}} \right)}{K_{I,n}}$$

де  $U_{ном.расч}$  - номінальна напруга з боку, відповідної розрахункової ступені напруги.

$$I_{с.р.н} = \frac{277 \cdot 1 \cdot \frac{230}{10,5}}{4000/5} = 7.58 \text{ А}$$

4. Розрахункове число витків робочої обмотки для основної сторони визначаємо за формулою:

$$w_{\text{осн.расч}} = \frac{F_{\text{ср}}}{I_{\text{с.р.осн}}} = \frac{100}{7.58} = 13.2 \text{ ВИТКОВ}$$

Приймаємо найближче менше ціле значення  $w_{\text{осн.расч}} = 13$  витків, що забезпечує запас по вибірковості. При цьому фактичний струм спрацьовування реле становить:

$$I_{\text{с.р.осн}} = \frac{100}{13} = 7.69 \text{ А}$$

5. Розрахунок числа витків для іншої сторони захисту вибираємо за умовами балансу на реле МДС захисту при зовнішньому КЗ або нормальному режимі (рис. 3.2):

$$I_{\text{В.НОМ I}} \cdot w_I = I_{\text{В.НОМ II}} \cdot w_{II}$$

Звідки

$$w_{\text{расч. n}} = w_{\text{осн}} \cdot \left( \frac{I_{\text{В.НОМ.ОСН}}}{I_{\text{В.НОМ. n}}} \right)$$

$$w_{\text{расч}} = 13 \cdot \frac{8.66}{4.57} = 24.6 \text{ ВИТКОВ}$$

Приймаємо найближче ціле значення, що забезпечує найменшу похибку вирівнювання  $w_I = 25$  витків.

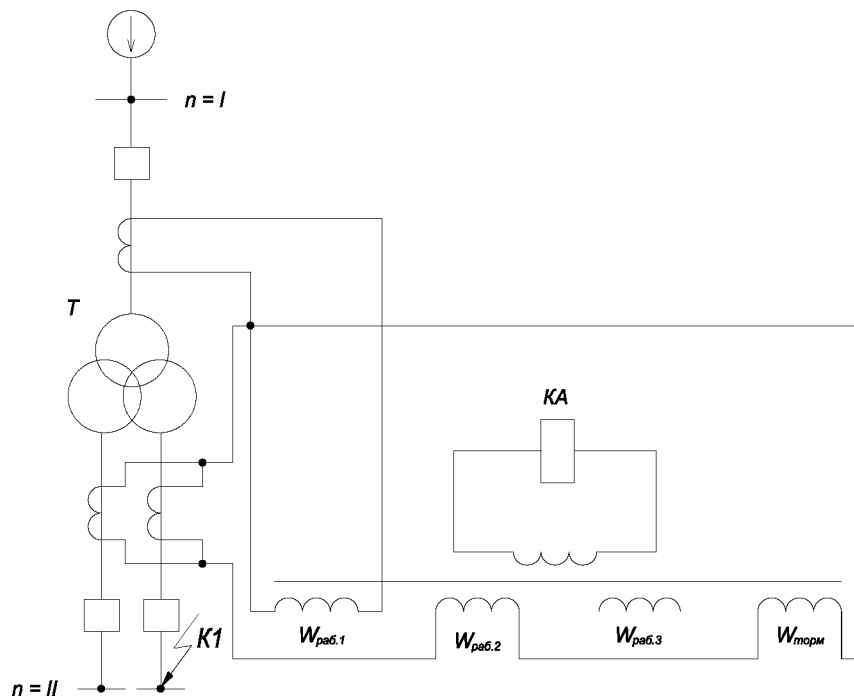


Рисунок 3.2 – Спрощена схема диференціального захисту з реле ДЗТ-11.

6. Уточнений струм спрацьовування захисту з урахуванням похибки вирівнювання знаходиться за виразами:

$$I_{c.з} = k_3(k_{одн} \cdot \varepsilon + \Delta U_I + \Delta w_I) \cdot I_{к.мах} = 1.5(1.0 \cdot 0.1 + 0.12 + 0.014) \cdot 839 = 294 \text{ A}$$

де

$$\Delta w_I = \frac{w_{расч} - w_I}{w_{расч}} = \frac{24.6 - 25}{24.6} = 0.014$$

7. Уточнений розрахунковий струм спрацьовування реле визначаємо за формулою:

$$I_{ср.осп} = \frac{I_{c.з} \cdot k_{сх} \cdot \left(\frac{U_{НОМ}}{U_{НОМ.II}}\right)}{K_{I.(II)}} = \frac{294 \cdot 1 \cdot \frac{230}{10.5}}{4000/5} = 8.05 \text{ A}$$

8. Розрахунковий струм небалансу захисту при КЗ на стороні НН, де передбачено гальмування, з урахуванням похибки вирівнювання знаходиться за виразами, наведеними в п. 3.2.1:

$$I_{нб.расч} = k_3(k_{пер} \cdot \varepsilon + \Delta U_I + \Delta w_{II}) \cdot I_{к.мах} = 1.5(1.0 \cdot 0.1 + 0.12 + 0.0147) \cdot 839 = 295 \text{ A}$$

де

$$\Delta w_I = \frac{w_{расч} - w_I}{w_{расч}} = \frac{13.2 - 13}{13.2} = 0.0147$$

9. Число витків гальмівний обмотки, що забезпечує надійну відбудову реле від струму небалансу при даному виді КЗ, визначається за виразом:

$$w_{торм.n} = \frac{k_3 \cdot I_{нб.расч} \cdot w_{раб.n}}{I_{торм.n} \cdot tg \alpha}$$

де  $k_3 = 1,5$ ;  $I_{торм.n}$  - первинний гальмовий струм на захищається стороні трансформатора, на якій включена гальмівна обмотка;  $tg \alpha = 0,75$  - тангенс кута нахилу дотичної проведеної з початку координат до нижньої розрахункової по вибірковості гальмівної характеристики (рис. 3.3).

$$w_{торм.n} = \frac{1.5 \cdot 295 \cdot 13}{839 \cdot 0.75} = 9.1 \approx 9 \text{ витков}$$

Таким чином, до установки на реле приймаються наступні витки:

$$w_I = 25 \text{ шт.}, w_{II} = 13 \text{ шт.}, w_{торм} = 9 \text{ шт.}$$

10. Чутливість захисту визначаємо наближено за первинними струмів при розрахунковому КЗ на стороні НН для випадків мінімального і нормального регулювання трансформатора:

$$k_ч = \frac{I_{к.мин}^{(2)}}{I_{c.з}}$$

де  $I_{c.з}$  – фактичний струм спрацьовування захисту, визначається з виразу

$$I_{c.p.n} = \frac{I_{c.з} \cdot k_{сх} \cdot \left( \frac{U_{ном.расч}}{U_{ном.n}} \right)}{K_{I.n}}$$

звідки

$$I_{c.з} = \frac{I_{c.p.n} \cdot K_{I.n}}{k_{сх} \cdot \left( \frac{U_{ном.расч}}{U_{ном.n}} \right)}$$

де  $I_{c.p.n} = I_{c.p.осн} = 7,58 \text{ А}$ .

$$I_{c.з} = \frac{7.58 \cdot 4000/5}{\frac{230}{10.5}} = 280.9 \text{ А}$$

Тоді визначаємо коефіцієнти чутливості:

$$k_{ч1} = \frac{451}{280.9} = 1.61 \quad k_{ч2} = \frac{556}{280.9} = 1.97$$

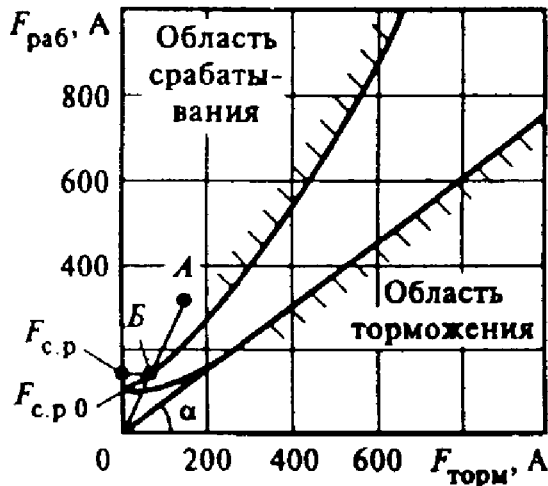


Рисунок 3.3. – Характеристика для визначення чутливості диференціального захисту з реле типу ДЗТ-11 при наявності гальмування.

Оскільки коефіцієнт чутливості захисту при нормальному регулюванні напруги практично відповідає нормованому, а при мінімальному регулюванні досить високий, то захист з реле ДЗТ-11 рекомендується до установки.

### 3.3 Максимальний струмовий захист

1. Для двообмоткових трансформаторів захист встановлюється на стороні живлення (ВН) і виконується дворелейним із з'єднанням трансформатора в трикутник для підвищення чутливості. Так як в даному випадку обмотка НН

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

розщеплена, то в колі кожного відгалуження встановлюється окремий МСЗ, як правило, з пуском по напрузі. Захист діє з двома витримками часу: з першої витримкою відключається вимикач відгалуження ПН, з другої - всі вимикачі об'єкта.

2. Спочатку визначаємо струм спрацьовування МСЗ без пуску по напрузі, який відбудовується від максимального струму навантаження з урахуванням самозапуску рухового навантаження:

$$I_{с.з} = \frac{k_3 \cdot k_c \cdot I_{нагр.мах}}{k_B}$$

де  $k_3=1,2$  - коефіцієнт запасу по вибірковості;  $k_B=0,8$  - коефіцієнт повернення реле РТ-40;  $k_c$  - коефіцієнт самозапуску, що враховує збільшення струму загальмованою рухового навантаження після відновлення напруги, приймаємо  $k_c=2,5$ ;  $I_{нагр.мах}$  - максимальний струм навантаження, приймаємо рівним номінального струму трансформатора.

$$I_{с.з} = \frac{1,2 \cdot 2,5 \cdot 158}{0,8} = 592,5 \text{ A}$$

3. Коефіцієнт чутливості захисту визначаємо при двофазному металевому КЗ в мінімальному режимі

$$k_{ч} = \frac{I_{к.мин}^{(2)}}{I_{с.з}} = \frac{451}{592,5} = 0,76 < 1,2$$

Оскільки чутливість МСЗ без пуску по напрузі виявляється недостатньою, застосуємо блокування по напрузі з боку НН трансформатора.

4. Струм спрацьовування МСЗ з пуском по напрузі відбудовується від номінального струму трансформатора  $I_{ном}$  на стороні, де встановлено захист:

$$I_{с.з} = \frac{k_3}{k_B} \cdot I_{нагр.мах}$$
$$I_{с.з} = \frac{1,2}{0,8} \cdot 158 = 237 \text{ A}$$

а чутливість захисту в тій же розрахунковій точці складе:

$$k_{ч} = \frac{451}{237} = 1,9$$

5. Напряга спрацьовування пускового органу мінімальної напруги, виконаного у вигляді реле, включеного на міжфазову напругу, визначаємо наближено за умовами відбудови від струмів самозапуску рухового навантаження при відновленні напруги:

$$U_{с.з} \leq \frac{U_{с.мин}}{k_B}$$

де  $k_6 = 1,2$  - коефіцієнт повернення для реле мінімальної напруги;  $U_{с.мин}$  - мінімальна міжфазова напруга в умовах самозапуска при відновленні напруги, приймаємо  $U_{с.мин} = 0,7U_{ном}$ .

$$U_{с.з} = \frac{0,7 \cdot 220}{1,2} = 128,3 \text{ кВ}$$

6. Напругу спрацьовування пускового органу по зворотній послідовності комбінованого пуску по напрузі приймаємо рівною мінімальній уставці фільтр-реле:

$$U_{2с.з} = 0,06 \cdot U_{с.з} = 0,06 \cdot 220 = 13,2 \text{ кВ}$$

7. Чутливість блокуючих органів перевіряється при КЗ на прийомних сторонах трансформатора, куди і підключені блокують реле, тобто  $U_{к.защ}^{(3)} = 0$ , а

$$U_{2к.защ} = \frac{U_{\phi}}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{220}{2 \cdot \sqrt{3}} = 63,5 \text{ кВ}$$

$$k_{ч} = \frac{U_{2к.защ}}{U_{2с.з}} = \frac{63,5}{13,2} = 4,81 > 1,5$$

Оскільки при КЗ на приймальній стороні трансформатора  $k_{ч} > 1,5$ , то диференціальну захист шини на цій стороні можна не встановлювати.

8. Струм спрацьовування захисту від симетричного перевантаження, що діє на сигнал, визначається за умовою налагодження від номінального струму трансформатора на стороні, де встановлено захист, за висловом

$$I_{с.з} = \frac{k_3}{k_B} \cdot I_{т.ном} = \frac{1,05}{0,8} \cdot 158 = 207,4 \text{ А}$$

9. Витримка часу МСЗ узгоджується з витримкою часу захисту лінії на стороні НН.



#### 4. ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ЗАСТОСУВАННЯ, МОНТАЖУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВЕНТИЛЬНИХ РОЗРЯДНИКІВ

Вентильні розрядники (ВР) призначені для захисту ізоляції від грозових та короткочасних комутаційних перенапруг. ВР можуть експлуатуватися на відкритому повітрі на висоті до 1000 м над рівнем моря.

При новому будівництві та реконструкції електричних мереж використання ВР для захисту від перенапруг у мережах 35-750 кВ заборонено. За наявності технічного обґрунтування для захисту повітряних мереж 6-10 кВ дозволено встановлення ВР, якщо застосування інших засобів неможливо.

Кліматичне виконання та категорія розміщення ВР повинні відповідати нормальним значенням кліматичних чинників повітря в місці встановлення відповідно до вимог ГОСТ 15150-69 та чинних правил улаштування електроустановок.

Номінальна напруга ВР, їх пробивні та залишкові напруги повинні відповідати найбільшим робочим напругам і рівням електричної стійкості ізоляції електроустановки.

ВР мають застосовуватись відповідно до класу номінальної напруги мережі, типу виконання електрообладнання, яке захищається, та місця встановлення. Для захисту ізоляції електроустановки напругою до 1,0 кВ незалежно від режиму нейтралі мереж можуть застосовуватися розрядники серій РВН-0,5 і РВН-1. Для захисту РУ та трансформаторів 6-10 кВ від грозових перенапруг можуть застосовуватися розрядники серій РВП, РВО або РВМ, а також інші марки розрядників, придатних до використання при заданих режимах нейтралі мережі. РУ та трансформатори 15-35 кВ можуть захищатися розрядниками серії РВС або РВМ відповідно до номінальної напруги електроустановки.

ВР серій РВЕ-25М, РВ-25 і РВМЕ-25 застосовують для захисту ізоляції електроустановки від грозових і короткочасних внутрішніх перенапруг, під час експлуатації їх в умовах вібрацій (на корпусах електровозів, на кришках трансформаторів або автотрансформаторів тощо).

РУ 110, 150 та 220 кВ, а також силові трансформатори (АТ) 110, 150 та 220 кВ з внутрішньою ізоляцією, виконаною з випробними напругами, можуть захищатися від перенапруг розрядниками серії РВМГ відповідних класів напруги.

Трансформатори (АТ) з ізоляцією (ГОСТ 1516.1-76) можуть бути захищені за допомогою розрядників серій РВМГ 110, 150, 220, 330, 500 та 750 кВ (РВМК 330,

					<i>БР 5.6.141.812 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		55

500 та 750 кВ - для захисту від комутаційних перенапруг на приєднаннях шунтуючих реакторів) відповідно.

У РУ, які тимчасово експлуатують на зниженій напрузі щодо класу опорної та підвісної ізоляції, номінальна напруга ВР повинна відповідати номінальній напрузі силових і вимірювальних трансформаторів.

Для захисту ізоляції нейтралі обмоток трансформаторів напругою 110-220 кВ ВР повинні вибиратись відповідно до класу ізоляції нейтралі, найбільшого можливого значення напруги частоти 50 Гц між нейтраллю та землею в нормальних та аварійних режимах електроустановки, найбільшої припустимої напруги на ВР (напруги гасіння) та мінімального значення пробивної напруги цього розрядника при промисловій частоті 50 Гц з урахуванням координації випробувальних напруг ізоляції із залишковими напругами розрядників при найбільших можливих імпульсних струмах, але не більше ніж 1кА.

За умовами надійного гасіння дуги супровідного струму найбільша допустима напруга (напруга гасіння) розрядника повинна бути не менше:

- 110 % найбільшої робочої лінійної напруги мережі (  $U_{н.р.}$  ) - для мереж з ізолюваною нейтраллю або з компенсацією ємнісного струму замикання на землю;
- 100 %  $U_{н.р.}$  - для мереж напругою 35-110 кВ з ізолюваною нейтраллю;
- 80 %  $U_{н.р.}$  - для мереж напругою 110 кВ і вище з ефективно заземленою нейтраллю з коефіцієнтом заземлення не більше 0,8.

Напруга гасіння розрядника має бути не меншою, ніж максимальне можливе значення напруги промислової частоти в місці його установа.

У мережах 110 кВ і вище в разі виникнення нештатних ситуацій, при яких на ізоляції незаземленої нейтралі обмотки ВН трансформаторів виникає довготривала напруга із значеннями, наближеними до випробувальної однохвилинної напруги згідно з ГОСТ 1516-76, для захисту відповідної ізоляції нейтралі обмотки трансформаторів можна застосовувати таку комбінацію елементів розрядників серії РВС:

- на 110 кВ - РВС-35 + РВС-15;
- на 150 кВ - РВС-35 + РВС-35;
- на 220 кВ - РВС-110 + РВС-15.

У схемах електроустановок, де можливі неповнофазні спрацьовування комутаційних апаратів (повітряних вимикачів, відокремлювачів тощо), потрібно використовувати пристрої автоматичного заземлення нейтралі, які спрацьовують при досягненні на ній 75 % і більше фазної напруги. Ці пристрої запобігають

руйнуванню розрядників, установлених у нейтралі.

Однотипні елементи розрядників серії РВС або РВМГ різних груп дозволено застосовувати в одній фазі, якщо різниця їхніх опорів або струмів провідності не виходить за межі  $\pm 30\%$  нормованого значення, а значення пробивних напруг при промисловій частоті відповідають вимогам інструкцій підприємств-виробників. Для розрядників типу РВМГ 220 кВ і вище нижні елементи розрядника повинні мати підсилені фланці.

Основні характеристики ВР, визначені за каталогами підприємств-виробників, повинні відповідати умовам місця застосування.

ВР, у яких нижній край ізоляційного кожуха розташований над рівнем планування підстанції на висоті не менше 2500 мм, дозволяється встановлювати без постійних огорож.

ВР повинні бути встановлені у ВРУ, ЗРУ на спеціальних стояках або на огорожених фундаментах висотою не менше ніж 300 мм від рівня планування підстанції з урахуванням вимог захисту розрядників від зливових вод та висоти снігового покриву.

Відстані між фазами, на яких установлені ВР, або від ВР до заземлених або таких, що знаходяться під напругою інших елементів підстанцій, мають бути не менше значень, вказаних у чинних правилах улаштування електроустановок.

Ошиновку ВР у ВРУ та ЗРУ рекомендується виконувати жорсткими мідними або алюмінієвими шинами. Значення тяжіння в горизонтальному напрямку приєднаного до ВР проводу не повинне перевищувати значень, визначених підприємствами-виробниками.

ВР опорного типу повинні бути встановлені вертикально з допустимим відхиленням від вертикального положення згідно з технічною документацією підприємств-виробників. Їх ошиновка у ВРУ має бути виконана гнучким мідним, алюмінієвим або сталевим дротом, перетин якого слід приймати за умовами корони.

Струмоспуски до ВР мають кріпитися з розрахованою слабиною, щоб уникнути як небезпечного однобічного тяжіння, так і невиправданих розгойдувань проводів.

Установлені на ПЛ: ВР 3-6-10 кВ типів РВП і РВО повинні бути закріплені хомутами до спеціальної траверси; ВР 15-20-35-110-150 кВ типів РВС, РВМГ повинні бути закріплені на виносних кронштейнах-траверсах, які прикріплюються до опор, або на спеціальних майданчиках, змонтованих усередині АП-подібних дерев'яних опор, або на обгороджених стояках, розташованих безпосередньо біля

					<i>БР 5.6.141.812 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		57

опор.

Шина заземлення кожної фази ВР, установленого для захисту ізоляції трансформатора (АТ), приєднується до заземлювального контуру підстанції по найкоротшому шляху так, щоб місце її приєднання знаходилося між точками приєднання заземлювальних провідників порталів і трансформатора.

ВР має бути приєднаним до ошиновки підстанції залежно від місця його установлення таким чином:

- до збірних шин - через свої роз'єднувачі або загальні з трансформаторами напруги;

- до ошиновки трансформаторів (АТ) - глухими відгалуженнями без роз'єднувачів;

- незалежно від місця установки - спеціальними захватами, які дають змогу вмикати і вимикати засіб захисту за допомогою ізолювальної штанги, в електроустановках із забрудненою атмосферою.

Місце встановлення ВР у РУ має забезпечувати припустимі відстані до електрообладнання, що захищається, з урахуванням можливості зручного приєднання та безпечного обслуговування. Відстані від ВР мають відповідати значенням, наведеним у чинних правилах улаштування електроустановок.

Зміни в схемі установлення багатоеlementних ВР, що відрізняються від прийнятих за інструкціями підприємств-виробників, необхідно погоджувати з ними.

Після закінчення монтажу всі зовнішні металеві деталі апарата, крім паспортних щитків, а також цементні армувальні шви мають бути пофарбовані вологостійкою фарбою або емаллю.

Між АТ і ВР, які застосовуються для захисту їх ізоляції, не повинно бути комутаційних апаратів (роз'єднувачів, відокремлювачів, вимикачів).

Біля розрядників 330 кВ та вище типу РВМК у колах заземлення послідовно мають бути встановлені імітатори, призначені для контролю запасу пропускної спроможності нелінійних робочих резисторів.

## ВИСНОВКИ

В процесі виконання роботи було проведено розрахунок замкненої електричної мережі, конфігурація якої була визначена завданням роботи.

З урахуванням заданих потужностей кінцевих споживачів електричної мережі були вибрані відповідні типи трансформаторів на підстанціях, запас потужності яких здатний забезпечити безперебійне електропостачання споживачів як в нормальному так і в аварійному режимах.

Для існуючої конфігурації замкнутої мережі були розраховані параметри схеми заміщення ліній і трансформаторів, складена розрахункова схема заміщення мережі та визначено розрахункові навантаження вузлів мережі.

Регулювання напруги на вибраній схемі (за допомогою пристроїв РПН трансформаторів) показало, що ми можемо підтримувати допустиме в межах норми (+5%) значення напруги у кінцевого споживача.

У процесі розрахунку електричної частини підстанції ПС-2 була проведена перевірка правильності вибору номінальної потужності встановлених трансформаторів та здійснено вибір на підставі розрахунку струмів короткого замикання високовольтних апаратів РП, вимірювальних трансформаторів струму і напруги.

При виконанні розрахунку релейного захисту трансформатора підстанції ПС-2 був проведений розрахунок поздовжнього диференціального струмового захисту та максимального струмового захисту з комбінованим пуском по напрузі.

Для захисту від міжфазних коротких замикань запропоновано захист за допомогою реле типу ДЗТ-11, для якого був виконаний вибір уставок і розрахунок параметрів обмоток реле.

					БР 5.6.141.812 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Електричні системи та мережі : конспект лекцій / укладачі: І. Л. Лебединський, В. І. Романовський, Т. М. Загородня. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 214 с.
2. Бохмат В. С., Воротницький Ст. Е., Татаринів Е. П. Зниження комерційних втрат в електроенергетичних системах. - "Електричні станції", 1998, № 9.
3. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций.– 3- изд. - М.:Энергоатомиздат, 1987- 648 с.
4. Правила улаштування електроустановок (зі змінами та доповненнями). – К.: Форт, 2017 – 760с.
5. Дьяков А. Ф, Платонов С. С. Основи проектування релейного захисту електроенергетичних систем. Навчальний посібник. – М: Видавництво МЕІ, 2000.
6. Жуков С. Ф. Розрахунок захистів трансформаторів і автотрансформаторів. Навчальний посібник. – Маріуполь: 2001.
7. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. – Высшая школа, 1989, с. 496-512.
8. Куценко Г.Ф. Монтаж, експлуатація та ремонт електроустановок - Дизайн ПРО, 2003. - 272 с..
9. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему „Розрахунок замкнутої електричної мережі” з курсу „Електричні системи та мережі” / укладачі: І. Л. Лебединський, С. М. Лебедка, В. І. Романовський, В. В. Волохін. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 40 с.
10. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. - М.: Энергоатомиздат, 1986 - 640 с.
11. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання, станом на 21.08.2017).
12. Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 21 липня 2014 р. за № 842/25619).

					БР 5.6.141.812 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60