

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Лебединський І.Л.

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”  
освітньо-професійної програми “Електротехнічні системи електроспоживання”  
на тему: \_\_\_\_\_  
Розрахунок режимів роботи понижувальної підстанції та  
електричної мережі

здобувача групи ЕТдн-01К \_\_\_\_\_  
Голенка Олександра Олександровича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Олександр ГОЛЕНКО

(підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ ст. викл., к.т.н., Сергій ЛЕБЕДКА

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Сумський державний університет**

Факультет ЦЗДВН Кафедра електроенергетики  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедрою електроенергетики  
І.Л. Лебединський  
“ ” 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на кваліфікаційна робота бакалавра**

Голенка Олександра Олександровича

1. Тема роботи: «Розрахунок режимів роботи понижувальної підстанції та  
електричної мережі»

затверджена наказом по університету № від

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 10.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: конфігурація 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;

Висновки.

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

- схема заміщення електричної мережі;

- однолінійна схема первинних з'єднань підстанції.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розрахунок електричної мережі	01.03.2024 р.	
2	Розрахунок електричної частини підстанції	25.03.2024 р.	
3	Релейний захист трансформатора	10.04.2024 р.	
4	Оформлення графічного матеріалу	01.05.2024 р.	
5	Оформлення пояснювальної записки	01.06.2024 р.	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

**Бібліографічний опис:** Голенко О.О. Розрахунок режимів роботи понижувальної підстанції та електричної мережі: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра; спец.: 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / О.О. Голенко; керівник С.М. Лебедка. – Суми: СумДУ, 2024. – 48 с.

**Ключові слова:** електрична мережа, підстанція, лінія електропередачі, трансформатор;

электрическая сеть, подстанция, линия электропередачи, трансформатор;  
electric grid, substations, transmission lines, transformer.

**Короткий огляд** – Розроблено мережу електропостачання для споживачів електричної енергії різних категорій. Спроековано схему, розроблена однолінійна схема. Зроблено розрахунки всіх елементів мережі, перевірено розрахунком на міцність та витривалість елементів установок при повній завантаженості та аварійних режимах. Розглянуто основні питання охорони праці під час робіт зі спорудження електричної мережі.

## Зміст

Вступ	5
1. Розрахунок електричної мережі	6
2. Розрахунок електричної частини підстанції	17
3. Розрахунок релейного захисту трансформатора	34
4. Охорона праці	39
Висновки	44
Список літератури	45
Додатки	48

					<i>БР 5.6.141.243 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Голенко</i>				<i>Вибір обладнання високовольтної підстанції та розрахунок параметрів електричної мережі Пояснювальна записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Лебедка</i>						4	48
<i>Реценз.</i>						<i>СумДУ ЕТдн-01К</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>	<i>Лебединський</i>							

## Вступ

Мета даної роботи полягає в:

- систематизації, закріпленні та поглибленні теоретичних і практичних знань із загальнотехнічних і спеціальних дисциплін за напрямом професійної підготовки;
- формуванні навичок використання отриманих знань під час вирішення конкретних практичних і науково-технічних завдань;
- набуття досвіду виконання технічної документації – пояснювальної записки і креслень – у відповідності до умов діючих стандартів;
- набуття досвіду аналізу отриманих результатів, формування висновків і публічного захисту виконаної роботи.

Основним завданням даної роботи є розрахунок електричної мережі, а саме: визначення активних, реактивних і повних потужностей кіл мережі, втрат потужностей в колах мережі, розрахунок електричної частини підстанції, розрахунок релейного захисту трансформатора.

В процесі виконання роботи зроблено розрахунок електричної системи, яка містить: джерело живлення, лінії електропередач, трансформатори, приймачі електричної енергії.

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 Розрахунок електричної мережі

Вихідні дані до розрахунку електричної мережі приведено на рис. 1 та в табл. 1.1.

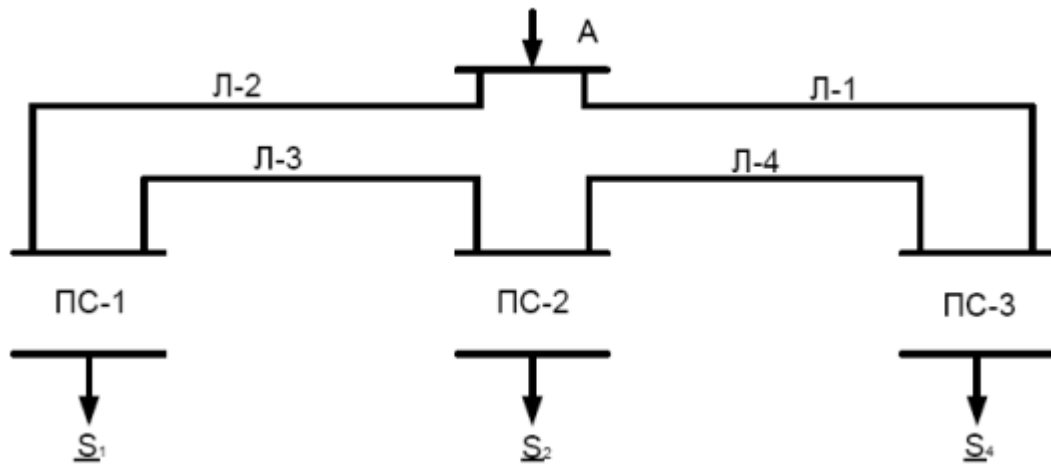


Рисунок 1 – Вихідна однолінійна схема заданої мережі

Таблиця 1.1 – Дані електричної мережі

Довжини ВЛ км				Потужність навантаження		
Л1	Л2	Л3	Л4	S1	S2	S3
40	50	40	30	60+j30	10+j10	60+j45

## 2. Розрахунок параметрів ліній і трансформаторів підстанцій.

Розриваємо замкнуте коло в точці А:

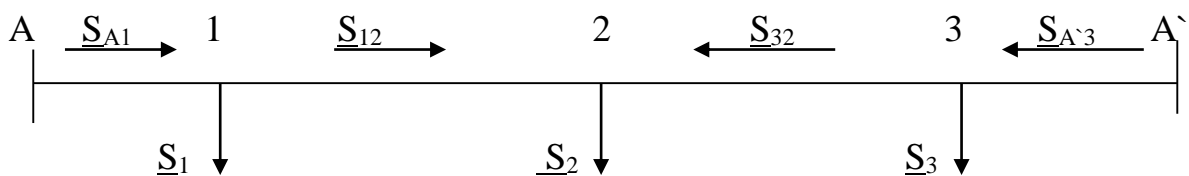


Рисунок 2 – Потокорозподілення без урахування втрат потужності

Знаходимо потужність A-1:

$$S_{A1} = \frac{S_1 * (L_3 + L_4 + L_1) + S_2 * (L_4 + L_1) + S_3 * L_1}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} =$$

$$\frac{(60 + j30) * (40 + 30 + 40) + (10 + j10) * (30 + 40) + (60 + j45) * 40}{160} = 60,63 + j35,25(MVA)$$

Знаходимо потужність A`-3:

$$S_{A'3} = \frac{S_3 * (L_4 + L_3 + L_2) + S_2 * (L_3 + L_4) + S_1 * L_2}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} = 69,38 + j48,75(MVA)$$

Складаємо баланс потужності.

$$S_{A'3} + S_{A1} = S_1 + S_2 + S_3 = 130 + j85 = 130 + j85 MVA$$

$$S_{A'3} + S_{A1} = (60,63 + j35,25) + (69,38 + j48,75) = 130 + j85 MVA$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 130 + j85 MVA$$

Баланс зійшовся.

Знаходимо потужність  $S_{12}$  за законом Кірхгофа

$$S_{12} = S_{A1} - S_1$$

$$S_{12} = (60,63 + j35) - (60 + j30) = 0,63 + j5 MVA$$

Знаходимо  $S_{23}$

$$S_{23} = (0,63 + j5) - (10 + j10) = -9,37 - j5 MVA$$

Знаходимо  $S_{32}$

$$S_{32} = S_{A'3} - S_3$$

$$S_{32} = (69,38 + j48,75) - (60 + j45) = 9,37 + j5 MVA$$

Точка 2 є точкою поточкорозділу, активної та реактивної потужності (рис.

3).

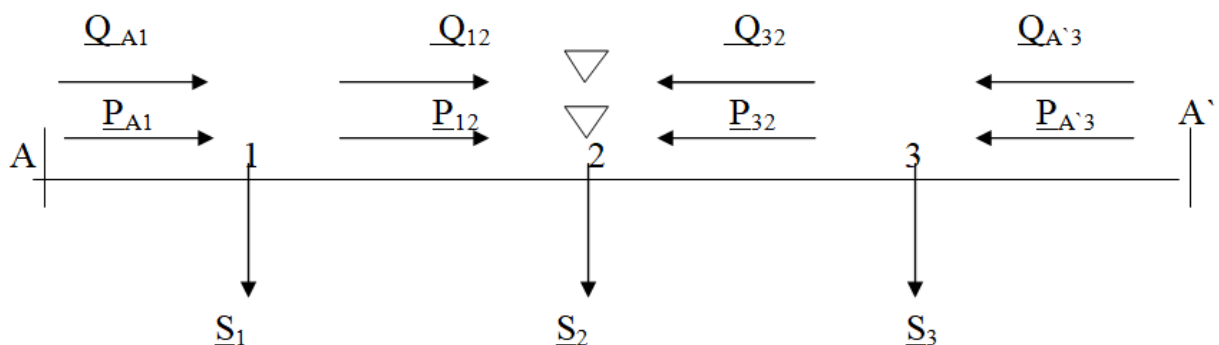


Рисунок 3 – Точка поточкорозподілення



Напругу у вузлах знаходимо за формулою Ілларіонова

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

Знаходимо напругу в вузлі 1

$$U_{A1} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L_{A1}} + \frac{2500}{P_{A1}}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{50} + \frac{2500}{60.63}}} = 139.86 \text{ кВ}$$

$$U_{12} = 15.85 \text{ кВ}$$

$$U_{23} = 63.25 \text{ кВ}$$

$$U_{A'3} = 143.54 \text{ кВ}$$

Беремо лінію напругою 110 кВ

Знаходимо струм для мережі 110 кВ

$$I_1 = \frac{S_{A1}}{\sqrt{3} * U_{нн0}} = \frac{\sqrt{60.63^2 + 35.25^2}}{1.73 * 110} * 10^3 = 368 \text{ А}$$

$$I_{12} = 26 \text{ А}$$

$$I_{32} = 55 \text{ А}$$

$$I_{A'3} = 446 \text{ А}$$

За струмом та напругою знаходимо провід. Беремо провід марки АС-150/24 (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Параметри проводу марки АС-150

Переріз проводу	Тривалий допустимий струм А	Діаметр проводу	R <sub>0</sub> Ом/км	X <sub>0</sub>	b <sub>0</sub> *10 <sup>-6</sup>
150/24	450	17.1	0.194	0.420	2.70

За напругою мережі та потужностями обираємо трансформатори.

Обираємо трансформатор для першого споживача 1 – I категорії . Обираємо два трансформатори, знаходимо максимальну потужність .

$$S_{max} = S_I = 60 + j30 \text{ МВА}$$

$$S_{лс1} = \frac{\sqrt{60^2 + 30^2}}{1.4} = 47.08 \text{ МВА}$$

Обираю трансформатор ТРДЦН 63000/110 (табл. 1.3).

Знаходимо коефіцієнт завантаження

$$K_3 = \frac{S_{н1}}{2 * S_{н}} = \frac{\sqrt{60^2 + 30^2}}{2 * 63} = 0.53$$

Таблиця 1.3 – Параметри трансформатора

Тип тр-а	S <sub>н</sub> МВА	ВН	НН	U <sub>к</sub> %	ΔP <sub>к</sub> кВт	ΔP <sub>х</sub> кВт	I <sub>х</sub> %	R <sub>t</sub> Ом	X <sub>t</sub> Ом	ΔQ <sub>х</sub> кВАр
ТРДЦН 63000/110	63	110	10	10,5	260	59	0,6	0,87	22	410

Знаходимо трансформатор для другого споживача 2-ї категорії. Обираємо 2-а трансформатори. Знаходимо максимальну потужність

$$S_{max} = S_2 = 10 + j10 \text{ МВА}$$

$$S_{лс2} = \frac{\sqrt{10^2 + 10^2}}{1.4} = 1 \text{ МВА}$$

Обираємо трансформатор ТМН 2500/110 (табл. 1.4)

Знаходимо коефіцієнт завантаження трансформатора

$$K_3 = \frac{S_{mma}}{S_{nn}} = \frac{\sqrt{10^2 + 10^2}}{25} = 0.56$$

Таблиця 1.4 – Параметри трансформатора

Тип тр-р	S <sub>н</sub> мВа	ВН	НН	U <sub>к</sub> %	ΔP <sub>к</sub> кВт	ΔP <sub>х</sub> кВт	I <sub>х</sub> %	R <sub>t</sub> Ом	X <sub>t</sub> Ом	ΔQ кВАр
ТМН 2500\110	25	110	10	10.5	22	5.5	1.5	42.6	508.2	37.5

Обираю трансформатор для третього споживача 3-ї категорії. Обираю один трансформатор.

$$S_{max} = S_3 = 60 + j45 \text{ МВА}$$

$$S_{лс3} = \frac{\sqrt{60^2 + 45^2}}{0.7} = 107.5 \text{ МВ}$$

Обираю трансформатор типу ТДЦ 125000\110 (табл. 1.5).

Знаходимо коефіцієнт завантаження

$$K_3 = \frac{S_{nn}}{1 * S_H} = \frac{\sqrt{60^2 + 45^2}}{125} = 0.6$$

Таблиця 1.5 – Параметри трансформатора

Тип тр-р	S <sub>H</sub> мВа	ВН	НН	U <sub>к</sub> %	ΔP <sub>к</sub> кВт	ΔP <sub>х</sub> кВт	I <sub>х</sub> %	R <sub>т</sub> Ом	X <sub>т</sub> Ом	ΔQ кВАр
ТДЦ 125000\110	125	110	10	10.5	400	120	0.55	0.37	12.3	37.5

Знаходимо параметри ліній (рис. 4):

$$Л2: R_{A1} = R_0 * L_{A1} = 0.194 * 50 = 9.7 (Ом)$$

$$Л3: R_{12} = 7.76 (Ом)$$

$$Л4: R_{23} = 5.82 (Ом)$$

$$Л1: R_{A'3} = 7.76 (Ом)$$

Реактивний опір ліній

$$Л2: X_{A1} = X_0 * L_{A1} = 0.420 * 50 = 21 (Ом)$$

$$Л3: X_{12} = 16.8 (Ом)$$

$$Л4: X_{23} = 12.6 (Ом)$$

$$Л1: X_{A'3} = 16.8 (Ом)$$

Знаходимо зарядну потужність ліній

$$Л2: Q_{A1} = \frac{b_0 * L_{A1}}{2} * U_{ном}^2 = \frac{2.70 * 10^{-6} * 50}{2} * 110^2 = 0.65 (МВАр)$$

$$Л3: Q_{12} = 0.65 (МВАр)$$

$$Л4: Q_{23} = 0.49 (МВАр)$$

$$Л1: Q_{A'3} = 0.659 (МВАр)$$

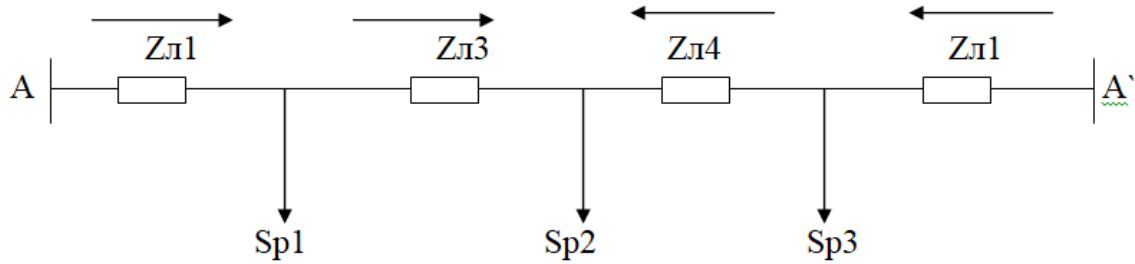


Рисунок 4 – Загальний опір ліній

Розраховуємо потужність з урахуванням втрат на 110 кВ

$$\Delta S_{mm} = \frac{S_{нб}^2}{U_{нб}^2} * Z_m \quad Z_m = R_m + X_m$$

$$S_{P1}^K = S1 = 60 + j30$$

$$S_{P1}^H = S_{P1}^K + \Delta S1 = 60 + j30 + \frac{60^2 + 30^2}{110^2} * (0.87 + j22) = 60.32 + j38.16(MVA)$$

$$S_{P2}^K = 10 + j10$$

$$S_{P2}^H = S_{P2}^K + \Delta S2 = 10 + j10 + \frac{10^2 + 10^2}{110^2} * (42.6 + j508.2) = 10.68 + j18.13(MVA)$$

$$S_{P3}^K = 60 + j45$$

$$S_{P3}^H = S_{P3}^K + \Delta S3 = 60 + j45 + \frac{60^2 + 45^2}{110^2} * (0.37 + j12.3) = 60.17 + j50.65(MVA)$$

$$\Delta S_{T1} = \Delta Q_{XT1} + \Delta P_{XT1} = 0.410 + j0.059(MVA)$$

$$\Delta S_{T2} = \Delta Q_{XT2} + \Delta P_{XT2} = 0.375 + j0.055(MVA)$$

$$\Delta S_{T3} = \Delta Q_{XT3} + \Delta P_{XT3} = 0.687 + j0.120(MVA)$$

$$S_{P1} = S_{P1}^H = (60.32 + j38.16) + 2 * (0.410 + j0.059) = 61.14 + j38.27(MVA)$$

$$S_{P2} = S_{P2}^H = (10.68 + j18.13) + 2 * (0.375 + j0.055) = 11.43 + j18.24(MVA)$$

$$S_{P3} = S_{P3}^H = (60.17 + j50.65) + (0.687 + j0.120) = 61.54 + j50.89(MVA)$$

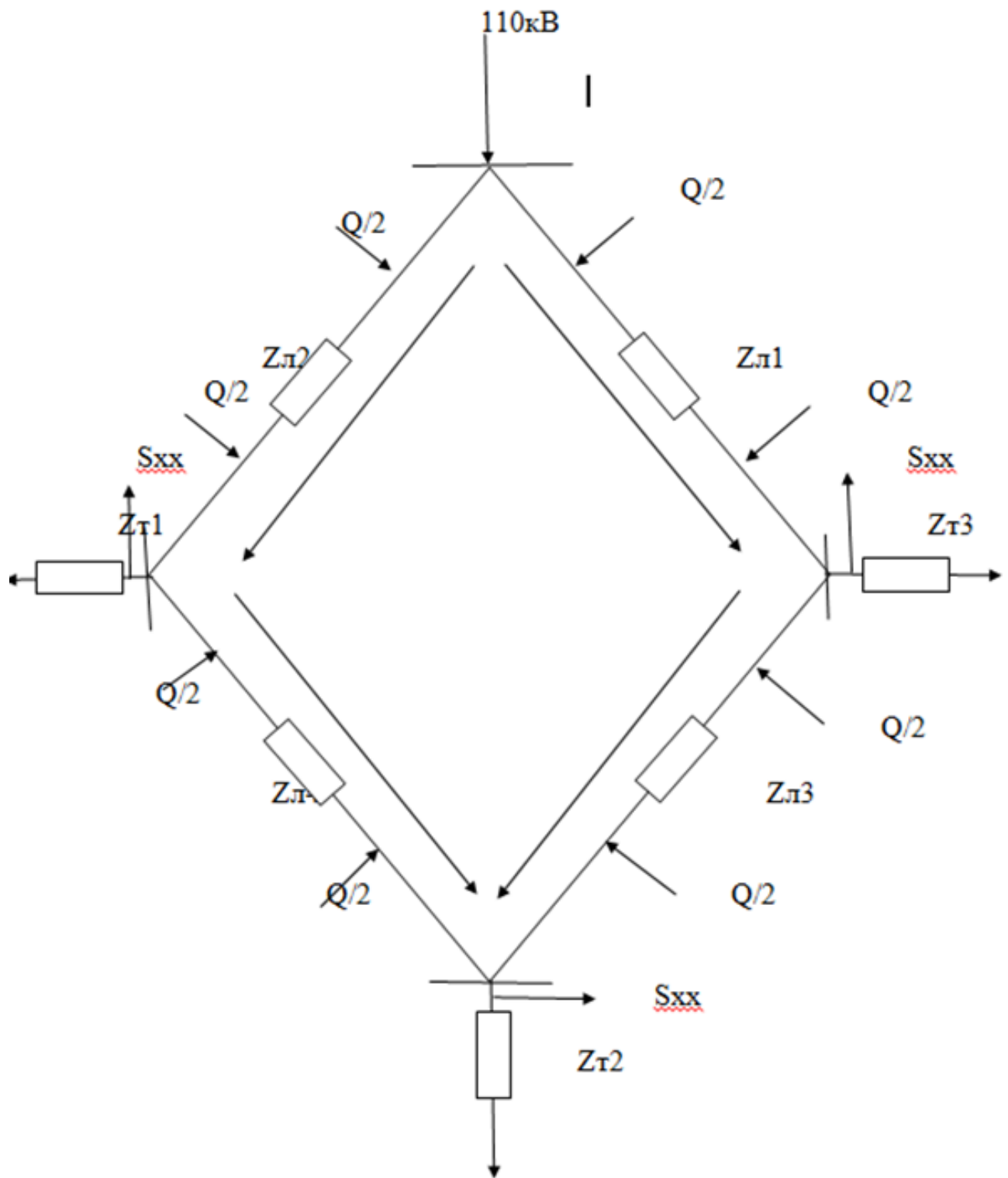


Рисунок 5- Потокорозподіл з урахуванням втрат потужності

Знаходимо потужність  $S_{A1}$

$$S_{A1} = \frac{S_{P1} * (L_3 + L_4 + L_1) + S_{P2} * (L_4 + L_1) + S_3 * L_1}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} =$$

$$\frac{(61.14 + j38.27) * (40 + 30 + 40) + (11.43 + j18.24) * (30 + 40) + (61.45 + j50.89) * 40}{160} =$$

$$62.41 + j47 \text{ (MVA)}$$

$$S_{A'3} = \frac{S_{P3} * (L_4 + L_3 + L_2) + S_{P2} * (L_3 + L_2) + S_{P1} * L_2}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} = 77.71 + j69.31 \text{ (MVA)}$$

Перевіряємо баланс

$$S_{A1} + S_{A'3} = S_{P1} + S_{P2} + S_{P3} = 140 + j107 = 140 + j107 \text{ MVA}$$

Баланс зійшовся.

Знаходимо  $S_{P12}$

$$S_{P12} = S_{A1} - S_{P1} = (62.41 + j47) - (61.14 + j38.27) = 1.27 + j8.73 \text{ MVA}$$

Знаходимо  $S_{P3}$

$$S_{P32} = S_{A'3} - S_{P3} = 16.77 + j9.5 \text{ MVA}$$

Зарядні потужності ліній

$$L1 = L3 = 0.65 \text{ (MVar)} \quad Z_{ЛA1} = 9.7 + j21$$

$$L2 = 0.81 \text{ (MVar)} \quad Z_{ЛA'3} = Z_{ЛA1} = 7.76 + j16.8$$

$$L4 = 0.49 \text{ (MVar)} \quad Z_{Л32} = 5.85 + j12.6$$

Уточнюємо точку поточкорозділу - точка 2

Зображуємо розрахункову схему в вигляді двох розімкнених ліній (рис. 6):

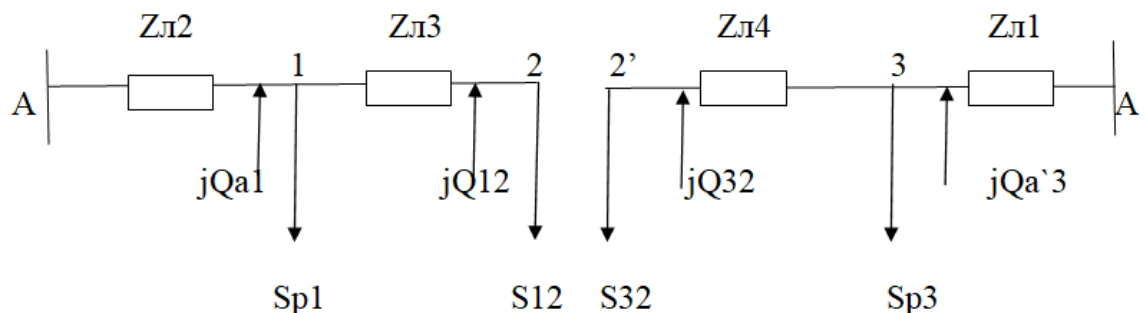


Рисунок 6 - Поточкорозподіл двох ліній

Знаходимо  $S_{12}^H$

$$S_{12}^H = S_{12}^K - JQ_{12} = 1.27 + j8.73 - j0.65 = 1.27 + j8.08(\text{MBA})$$

Далі  $S_{A1}^K$  – знаходимо за законом Кірхгофа

$$S_{A1}^K = S_{12}^H + S_{P1} = (1.27 + j8.08) + (61.14 + j38.27) = 62.41 + j40.35(\text{MBA})$$

$$S_{A1}^H = S_{A1}^K - JQ_{A1} = (62.61 + j40.35) - j0.81 = 62.41 + j39.54(\text{MBA})$$

Знаходимо  $S_{23}^H$

$$S_{23}^H = S_{23}^K - jQ_{23} = 16.16 + j95 - j0.49 = 16.17 + j9.1(\text{MBA})$$

Далі знаходимо  $S_{A3}^K$

$$S_{A3}^K = S_{23}^H + S_{P3} = (16.17 + j9.01) + (61.54 + j50.89) = 77.71 + j59.35(\text{MBA})$$

$$S_{A3}^H = S_{A3}^K - jQ_{A3} = (77.71 + j69) - j0.65 = 77.71 + j59.35(\text{MBA})$$

Знаходимо напругу в узлах навантажень

$$U_1 = U_A - \frac{P_{A1}^H * R_{A1} + Q_{A1} * X_{A1}}{U_A} = 115 - \frac{62.41 * 9.7 + 39.54 * 21}{115} = 102.8(\text{кВ})$$

$$U_2 = U_1 - \frac{P_{12}^H * R_{12} + Q_{12} * X_{12}}{U_1} = 102.8 - \frac{1.27 * 6.8 + 8.08 * 7.76}{102.8} = 101.57(\text{кВ})$$

$$U_3 = U_A - \frac{P_{A3}^H * R_{A3} + Q_{A3} * X_{A3}}{U_A} = 115 - \frac{77.71 * 7.76 + 59.35 * 16.8}{115} = 101.8(\text{кВ})$$

$$U_2 = U_3 - \frac{P_{A3}^H * R_{23} + Q_{23} * X_{23}}{U_3} = 101.8 - \frac{16.17 * 5.82 + 9.1 * 12.6}{101.08} = 99.01(\text{кВ})$$

За допомогою РПН збільшуємо напругу до потреб споживача (рис. 7).

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		14

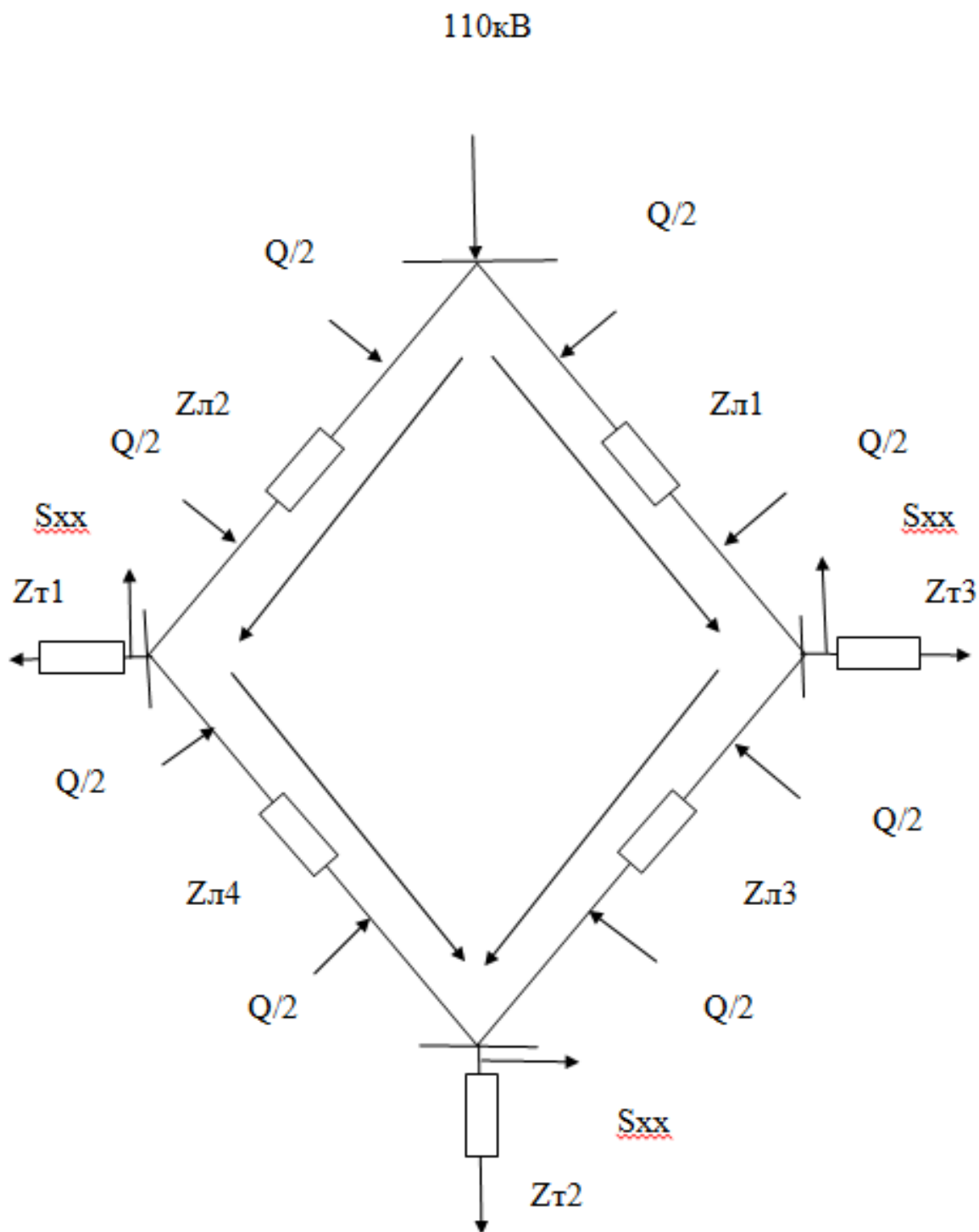


Рисунок 7 – Потокорозподілення з урахуванням втрат потужності



## 2 Розрахунок електричної частини підстанції

Згідно варіанту завдання задані данні про навантаження споживача, лінії, що йдуть від джерела живлення до підстанції та добовий графік споживання потужності споживача. Наведемо ці данні в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1 – Вихідні дані для проектування

№ з/п	$P_{\text{НОМ.НАВ}}$ , МВт	$\cos \varphi_{\text{НАВ}}$	$X_{L1}$ , Ом	$X_{L2}$ , Ом	$S_{\text{КЗ.С}}$ , МВА	$t$ , °С
13	12	0,88	46	16	2500	-10

Таблиця 2 – Добовий графік навантаження заданих споживачів

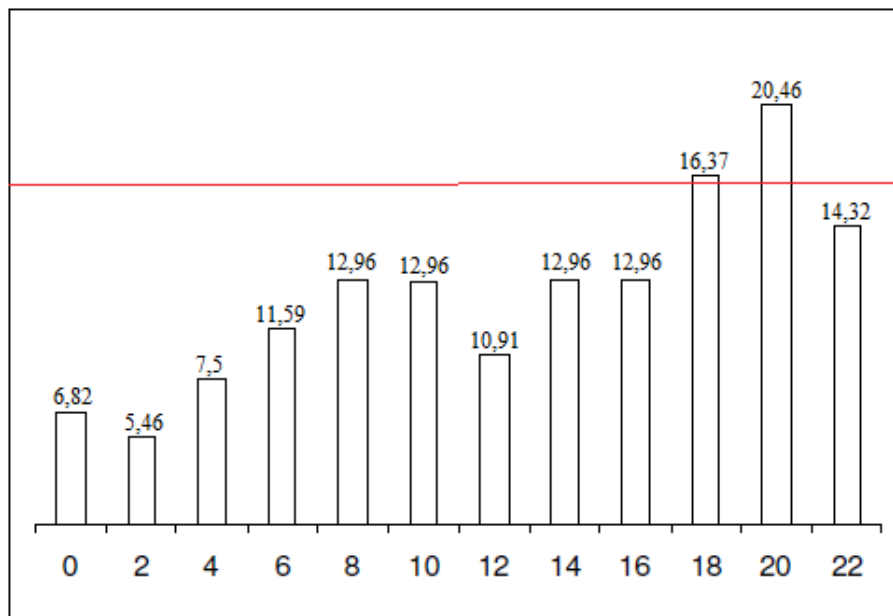
Номер варіанта / годин	Навантаження в % від номінальної потужності											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
13	50	40	55	85	95	95	80	95	95	120	150	105

### Вибір потужності силових трансформаторів

Для підстанції були обрані трансформатори потужністю 16 МВА типу ТДН.

Для більш точного вибору зобразимо графік навантаження підстанції, відмітивши червоною лінією лінію номінальної потужності трансформатора.

Номінальна повна потужність навантаження – 13,64 МВА



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

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

$$K_1 = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{2 * (6,82^2 + 5,46^2 + 7,5^2 + 11,59^2 + 10,91^2 + 14,32^2) + 12,96^2 * 8}{2 * 6 + 8}} = 0,7$$

Другий ступінь еквівалентного графіка:

$$K_2 = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{2 * (16,37^2 + 20,46^2)}{2 + 2}} = 1,158$$

Максимальне перевантаження трансформатора:

$$K_{\text{max}} = \frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{20,46}{16} = 1,27$$

$$K'_2 = 0,9 * 1,27 = 1,143$$

$K'_2 < K_2$ , отже за  $K_2$  беремо значення 1,158

Згідно з ДСТУ з урахуванням еквівалентної температури періоду (-10 °С) і часу перевантаження 4 годин, припустиме значення перевантаження  $K_2$  становить 1,56 для трансформаторів із системою охолодження Д. Реальне значення  $K_2$  менше, ніж за ДСТУ, отже трансформатор вибраний правильно.

### Розрахунок струмів короткого замикання

Для розрахунку даного пункту нам потрібні данні про трансформатор ТДН-16000/110 (наведені в таблиці 3) а також данні з таблиці 1. Також наведемо схему заміщення для розрахунків струмів КЗ

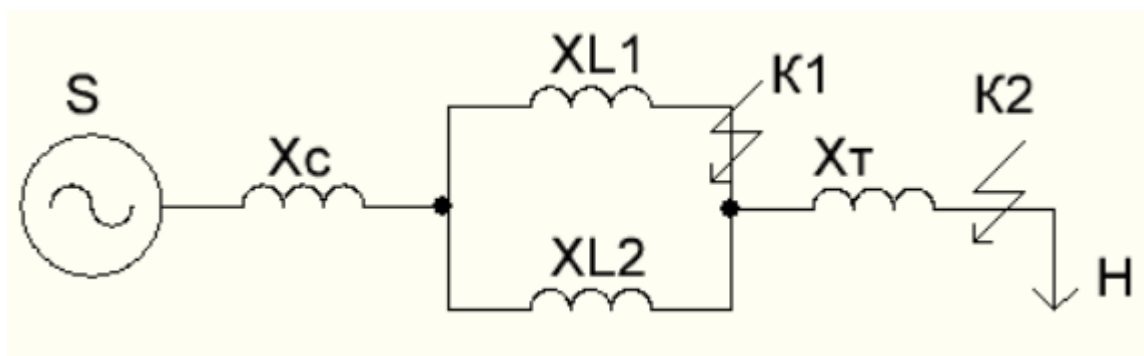


Рисунок 1 – Схема заміщення мережі

Таблиця 3 – Каталогні данні про трансформатор ТДН-16000/110.

Тип трансформатора	S <sub>н</sub> , МВА	Каталожні данні					
		U <sub>НОМ</sub> , кВ		U <sub>к</sub> , %	ΔP <sub>к</sub> , кВт	ΔP <sub>х</sub> , кВт	I <sub>х</sub> , %
		ВН	НН				
ТДН-16000/110	16	110	11	10,5	85	19	0,7

Опір системи, Ом:

$$X_C = \frac{U_{\text{Л}}^2}{S_C} = \frac{110^2}{2500} = 4,84$$

Еквівалентний опір ліній, Ом:

$$X_L = \frac{X_{L1} * X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} = \frac{46 * 16}{46 + 16} = 11,87$$

Опір трансформатора, Ом:

$$X_T = \frac{U_K * U_{\text{ВН}}^2}{100 * S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5 * 110^2}{100 * 16} = 79,41$$

Знайдемо періодичні складові струму КЗ, кА:

в точці К1:

$$I_{K1} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3} * (X_C + X_L)} = \frac{110}{\sqrt{3} * (4,84 + 11,87)} = 3,8$$

в точці К2:

$$I_{K2} = \frac{U_{\text{В}}}{\sqrt{3} * (X_C + X_L + X_T)} * \frac{U_{\text{В}}}{U_{\text{Н}}} = \frac{110}{\sqrt{3} * (4,84 + 11,87 + 79,41)} * \frac{110}{10} = 7,27$$

Обчислимо ударний струм, кА:

в точці К1 (k<sub>y</sub> = 1,608):

$$i_{\text{уд1}} = \sqrt{2} * k_y * I_{K1} = \sqrt{2} * 1,608 * 3,8 = 8,64$$

в точці К2 (k<sub>y</sub> = 1,862):

$$i_{\text{уд2}} = \sqrt{2} * k_y * I_{K2} = \sqrt{2} * 1,862 * 7,27 = 19,14$$

Будемо вважати, що амплітуда ЕРС та періодична складова струму КЗ на початку КЗ дорівнюють амплітуді та періодичній складовій в момент відключення. Тоді:

для точки К1:

$$I_{n\tau1} = I_{K1}$$

для точки К2:

$$I_{n\tau2} = I_{K2}$$

Аперіодична складова струму КЗ в момент розходження контактів вимикача, кА:

для точки К1 (t = 0,06; T<sub>α</sub> = 0,02):

$$i_{a1} = \sqrt{2} * I_{n\tau1} * e^{-\frac{t}{T_\alpha}} = \sqrt{2} * 3,8 * e^{-\frac{0,06}{0,02}} = 0,27$$

для точки К2 (t = 0,1; T<sub>α</sub> = 0,075):

$$i_{a2} = \sqrt{2} * I_{n\tau2} * e^{-\frac{t}{T_\alpha}} = \sqrt{2} * 7,27 * e^{-\frac{0,1}{0,075}} = 2,71$$

									Лист
									18
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

Визначимо інтеграл Джоуля (термічну стійкість),  $\text{kA}^2 \cdot \text{с}$ :

для точки К1 ( $t = 0,06$ ;  $T_\alpha = 0,02$ ):

$$B_{R1} = I_{K1}^2 * (t + T_\alpha) = 3,8^2 * (0,06 + 0,02) = 1,16$$

для точки К2 ( $t = 0,1$ ;  $T_\alpha = 0,075$ ):

$$B_{R2} = I_{K2}^2 * (t + T_\alpha) = 7,27^2 * (0,1 + 0,075) = 9,25$$

Запишемо всі отримані значення в таблицю 4:

Таблиця 4 – Результати розрахунків струмів КЗ.

Точка КЗ	Період. складова струму КЗ в поч. момент часу, кА	Ударний струм КЗ, кА	Період. складова струму КЗ в момент спрац. вимикача, кА	Аперіод. склад. струму КЗ, кА	Інтеграл Джоуля, $\text{kA}^2 \cdot \text{с}$
Шини 110кВ (К1)	3,8	8,64	3,8	0,27	1,16
Шини 10кВ (К2)	7,27	19,14	7,27	2,71	9,25

### 3 Вибір високовольтних електричних апаратів

У курсовому проекті вибору підлягають наступні апарати:

- вимикачі на боці вищої напруги;
- ввідні вимикачі на боці 10 кВ;
- секційний вимикач на боці 10 кВ;
- вимикачі ліній, що відходять від підстанції, 10 кВ;
- роз'єднувачі вищої напруги 110 кВ;
- роз'єднувачі нижчої напруги 10 кВ з боку нижчої напруги трансформатора, в колі секційного вимикача та в колі ліній, що відходять до споживачів (10 ліній).

Для вибору цих апаратів обчислимо максимальні струми нормального і післяаварійного режимів:

Максимальний струм на високій напрузі, А:

$$I_{\text{max}}^{\text{ВН}} = \frac{1,4 * S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * U_{\text{ВН}}} = \frac{1,4 * 16000}{\sqrt{3} * 110} = 117,57$$

Струм у колі ввідних вимикачів на низькій напрузі, А:

$$I_{max}^{HH} = \frac{1,4 * S_{НОМ}}{\sqrt{3} * U_{HH}} = \frac{1,4 * 16000}{\sqrt{3} * 10} = 1293,26$$

Струм у колі лінії, що відходить від підстанції (якщо від підстанції відходить 10 ліній), А:

$$I_{max}^{ЛВ} = \frac{1,4 * S_{НОМ}}{\sqrt{3} * U_{HH} * 10} = \frac{1,4 * 16000}{\sqrt{3} * 10 * 10} = 129,326$$

Перейдемо до вибору необхідних електричних апаратів. Результати кожного вибору будемо зводити в таблиць:

- вибір вимикача на напрузі 110 кВ:

Порівняємо розрахункові значення з каталожними значеннями вимикача ВВБМ – 110Б – 31,5/2000У1. Результати запишемо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вибір вимикачів на напрузі 110 кВ

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	110 кВ	110 кВ
$I_{розр} \leq I_{НОМ}$	117,57 А	2000 А
$I_{ПО} \leq I_{прСКВ}$	3,8 кА	40 кА
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	8,64 кА	102 кА
$I_{пв} \leq I_{ВідкНОМ}$	3,8 кА	31,5 кА
$I_{ас} \leq I_{аном}$	0,27 кА	10,8 кА (32% від $I_{ВідкНОМ}$ )
$B_K \leq I^2_{Тт}$	1,16 кА <sup>2</sup> *с	4800 кА <sup>2</sup> *с (40 <sup>2</sup> кА*3 с)

- вибір ввідного вимикача на боці нижчої напруги 10 кВ

Порівняємо розрахункові значення з каталожними значеннями вимикача МГГ–11–3500/1000ТЗ. Результати запишемо до таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Вибір вимикачів у колі трансформатора на напрузі 10 кВ

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	11 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	1293,26 А	3500 А
$I_{ПО} \leq I_{прСКВ}$	7,27 кА	64 кА
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	100 кА
$I_{пв} \leq I_{ВідкНом}$	7,27 кА	58 кА
$I_{ас} \leq I_{аном}$	2,71 кА	11,6кА (20%від $I_{ВідкНом}$ )
$B_K \leq I^2 t_T$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	16384 кА <sup>2</sup> *с (64 <sup>2</sup> кА*4с)

- вибір секційного вимикача на боці нижчої напруги 10 кВ:

Порівняємо розрахункові значення з каталожними значеннями вимикача МГГ–11–3500/1000ТЗ. Результати запишемо до таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Вибір секційного вимикача на напрузі 10 кВ

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	11 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	1293,26 А	3500 А
$I_{ПО} \leq I_{прСКВ}$	7,27 кА	64 кА
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	100 кА
$I_{пв} \leq I_{ВідкНом}$	7,27 кА	58 кА

$I_{ac} \leq I_{аном}$	2,71 кА	11,6кА (20% від $I_{ВідкНом}$ )
$B_K \leq I^2_{Тт}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	16384 кА <sup>2</sup> *с (64 <sup>2</sup> кА*4с)

- вибір лінійних вимикачів на напрузі 10 кВ:

Порівняємо розрахункові значення з каталожними значеннями вимикача ВВТП-10-20/630У2 . Результати запишемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Вибір лінійних вимикачів на напрузі 10 кВ

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	129,326 А	630 А
$I_{ПО} \leq I_{прСКВ}$	7,27 кА	20 кА
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	52 кА
$I_{пв} \leq I_{ВідкНом}$	7,27 кА	20 кА
$I_{ac} \leq I_{аном}$	2,71 кА	10кА (50% від $I_{ВідкНом}$ )
$B_K \leq I^2_{Тт}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	1200 кА <sup>2</sup> *с (20 <sup>2</sup> кА*3с)

- вибір роз'єднувачів на вищій напрузі 110 кВ:

Порівняємо розрахункові значення з каталожними значеннями роз'єднувача РНДЗ-1-110/630 ПІ. Результати запишемо до таблиці 5.5

Таблиця 5.5 – Вибір роз'єднувачів на напрузі 110 кВ

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	110 кВ	110 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	117,57 А	630 А

$i_{уд} \leq I_{прСКВ}$	8,64 кА	80 кА
$B_K \leq I^2_{Тт}$	1,16 кА <sup>2</sup> *с	3969 кА <sup>2</sup> *с (31,5 <sup>2</sup> кА*4 с)

- вибір роз'єднувачів на нижчій напрузі 10 кВ з боку нижчої сторони силового трансформатора

Порівняємо розрахункові значення з каталожними даними роз'єднувача РВР-III-10/2000 УЗ. Результати занесемо до таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Вибір роз'єднувачів на нижчій напрузі 10 кВ з боку нижчої сторони силового трансформатора

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	1293,26 А	2000 А
$i_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	85 кА
$B_K \leq I^2_{Тт}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	3969 кА <sup>2</sup> *с (31,5 <sup>2</sup> кА*4с)

- вибір роз'єднувачів на нижчій напрузі 10 кВ в колі секційного вимикача

Порівняємо розрахункові значення з каталожними даними роз'єднувача РВР-III-10/2000 УЗ. Результати занесемо до таблиці 5.7

Таблиця 5.7 – Вибір роз'єднувачів на нижчій напрузі 10 кВ в колі секційного вимикача

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	1293,26 А	2000 А
$i_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	85 кА
$B_K \leq I^2_{Тт}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	3969 кА <sup>2</sup> *с (31,5 <sup>2</sup> кА*4с)



- вибір лінійних роз'єднувачів на нижчій напрузі 10 кВ  
Порівняємо розрахункові значення з каталожними даними роз'єднувача РВ-11/400 Т2. Результати занесемо до таблиці 5.8

Таблиця 5.8 – Вибір лінійних роз'єднувачів на нижчій напрузі 10 кВ.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	11 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	129,326 А	400 А
$i_{уд} \leq I_{прСКВ}$	19,14 кА	41 кА
$B_K \leq I^2_{ТГ}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	1024 кА <sup>2</sup> *с (16 <sup>2</sup> кА*4с)

### Вибір трансформаторів власних потреб

ТВП необхідні для приєднання до їх низької сторони (380/220 В) споживачів власних потреб. Такими споживачами на проєктованій нами підстанції є:

- двигуни охолодження трансформаторів;
- підігрів високовольтних вимикачів (3 вимикача на стороні 110 кВ типу ВВБМ-110Б-31,5/2000У1) та приводів роз'єднувачів вищої напруги 110 кВ (4 роз'єднувача кВ типу РНДЗ-1-110/630 ТІ);
- компресорні установки;
- опалення, освітлення, вентиляція закритого РП;
- освітлення ВРП (при кількості комірок більше 3-х);

Данні про всіх споживачів занесемо до таблиці 6

Таблиця 6 – Данні про споживачів власних потреб

Вид споживача	Встановлена потужність		cosφ	tgφ	Навантаження	
	кВт*	всього, кВт			Р <sub>уст</sub> , кВт	Q <sub>уст</sub> , кВт
Охолодження	-	1,5	0,85	0,62	1,5	0,93

ТДН-16000/110						
Підігрів вимикачів 110 кВ	1,8*3	5,4	1	-	5,4	-
Підігрів приводів роз'єднувачів	4,4*4	17,6	1	-		-
Компресорні установки	30*3	90	0,82	0,7	90	63
Опалення, освітлення, вентиляція закритого РП	-	6	1	-	6	-
Освітлення ВРП	-	5	0,95	0,32	5	1,6
Загальна потужність, кВА					128,184	

Розрахункове навантаження при коефіцієнті попиту  $k_{\Pi} = 0,8$ , кВА

$$S_{\text{розр}} = k_{\Pi} * \sqrt{P_{\text{вст}}^2 + Q_{\text{вст}}^2} = 0,8 * 128,184 = 102,547$$

Потужність ТВП має бути обрана за такою умовою:

$$S_{\text{T}} \geq S_{\text{розр}}$$

Обираємо два трансформатора ТМ-100. При відключенні одного з них другий буде завантажений на:

$$\frac{102,547}{100} = 1,025 \approx 2,5\%$$

Що допустимо.

### Вибір електровимірювальних трансформаторів струму і напруги

Трансформатори струму та вимірювальні трансформатори напруги необхідні для ввімкнення електровимірювальних приладів.

Представимо в таблиці 7 данні про клас точності та навантаження по фазах приладів, які будуть підключатися до ТС.

Таблиця 7 – Данні про прилади, підключені до ТС

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
						25
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Прилад	Клас точності	Навантаження по фазах		
		А	В	С
Амперметр	1	0,5	0,5	0,5
Ваттметр	1,5	0,5	-	0,5
Варметр	1,5	0,5	-	0,5
Лічильник активної енергії	1	2,5	-	2,5
Лічильник реактивної енергії	1,5	2,5	-	2,5

Зведемо до таблиці 8 дані про місця встановлення та прилади, встановлені в цих місцях, а також сумарне навантаження фази А (так як ця фаза найбільш навантажена) з боку вторинної обмотки ТС.

Таблиця 8 – Перелік необхідних для встановлення електровимірювальних приладів.

Місце встановлення	Перелік приладів	Сумарне навантаження ТС, ВА	Сумарне навантаження ТН, ВА
Коло шин 220 кВ	Вольтметр із перемикачем для виміру трьох міжфазних напруг	-	2
Коло силового трансформатора з боку нижчої напруги	Амперметр, вольтметр, варметр, лічильники активної та реактивної енергії	6	64,8
Коло секційного вимикача	Амперметр	0,5	-
Коло лінії, що відходить до споживачів (при нарузі 10 кВ)	Амперметр, лічильники активної та реактивної енергії	5,5	62,8

Оберемо ТС для кожного місця встановлення:

- коло силового трансформатора з боку нижчої напруги:  
оберемо для установки ТС типу ТЛМ10-У3 та порівняємо з розрахунковими даними. Результат зведемо до таблиці 9.1

Таблиця 9.1 – Вибір ТС в колі силового трансформатора з боку нижчої напруги.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	1293,26 А	1500 А
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	100
$B_K \leq I^2_{Тг}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	2028 кА <sup>2</sup> *с (26 <sup>2</sup> *3)
$S_{Н.прил} \leq S_{Н.ном}$	6 ВА	10 ВА

- коло секційного вимикача:  
оберемо для установки ТС типу ТЛМ10-У3 та порівняємо з розрахунковими даними. Результат зведемо до таблиці 9.2

Таблиця 9.2 – Вибір ТС в колі секційного вимикача.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	1293,26 А	1500 А
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	100 кА
$B_K \leq I^2_{Тг}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	2028 кА <sup>2</sup> *с (26 <sup>2</sup> *3)

$S_{Н.прил} \leq S_{Н.ном}$	6 ВА	10 ВА
-----------------------------	------	-------

- коло лінії, що відходить до споживачів:

оберемо для установки ТС типу ТЛМ10-У3 та порівняємо з розрахунковими даними. Результат зведемо до таблиці 9.3

Таблиця 9.3 – Вибір ТС в колі лінії, що відходить до споживачів.

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_C \leq U_H$	10 кВ	10 кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	129,326 А	150 А
$I_{уд} \leq I_{СКВ}$	19,14 кА	100 кА
$B_K \leq I^2 t_{тг}$	9,25 кА <sup>2</sup> *с	2028 кА <sup>2</sup> *с (26 <sup>2</sup> *3)
$S_{Н.прил} \leq S_{Н.ном}$	5,5 ВА	10 ВА

Перед вибором ТН зведемо до таблиці 10 данні про прилади, що будуть підключатися до них.

Таблиця 10 – Данні про прилади, підключені до ТН.

Прилад	Тип	Потужність однієї обмотки, ВА	Кількість обмоток	Сумарна потужність приладу
Вольтметр	Е-335	2	1	2
Лічильник активної енергії	І-674	15,7	2	31,4

Лічильник реактивної енергії	I-673	15,7	2	31,4
------------------------------	-------	------	---	------

Занесемо до таблиці 8 сумарну потужність приладів для кожного місця встановлення. Обирати будемо ТН класу точності 0,5.

Для кола шин 110 кВ обираємо ТН типу НКФ-110-58, для всіх інших місць встановлень (кола силового трансформатора з боку нижчої напруги та лінії, що відходить до споживачів) оберемо ТН типу НОМ-10-66. Для з'єднання з цими ТН обираємо за умовою механічної міцності мідні жили перерізом 1,5 мм<sup>2</sup>.

### Вибір ошинковки РП

Ошинковка в РП 220 кВ виконується, як правило, стаеалюмінієвими проводами марки АС. Мінімальний перетин за умовою термічної стійкості, мм<sup>2</sup>:

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C} = \frac{\sqrt{9,25}}{91 * 10^{-3}} = 33,422$$

де  $C = 91 * 10^{-3}$  кАс/мм<sup>2</sup>

За умовою коронування для 110 кВ переріз проводів має бути не менше 70 мм<sup>2</sup>, тому для ошинковки обираємо підстанції обираємо провід АС-70/11, з максимальним струмом 265 А, що також задовільняє і умову по допустимому струму.

Ошинковка закритих РП 10 кВ виконується твердими шинами. Для даної підстанції будемо передбачати жорстке з'єднання шин по всій довжині. Спочатку проведемо вибір їх перетину за допустимим струмом, після чого перевіримо обрані шини на механічну міцність. Оберемо наступні мідні шини коробчастого перетину:

Таблиця 11 – Данні про обрані мідні шини для виконання ошинковки РП 10 кВ.

Розміри, мм				Переріз однієї шини, мм <sup>2</sup>	Момент опору двох шин, см <sup>3</sup> $W_{y0-y0}$	Момент інерції двох шин, см <sup>4</sup> $J_{y0-y0}$	Допустимий струм, А
h	b	c	r				
75	35	4	6	520	23,7	89	2730

Обраний тип шин буде механічно міцним при:

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$\sigma_{\text{розр}} = \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{с}} \leq \sigma_{\text{доп}}$$

де  $\sigma_{\text{доп}}$  – припустима механічна напруга в матеріалі шин (для міді марки МГМ складає 174,95 МПа);

$\sigma_{\text{с}}$  – механічна напруга в матеріалі шин від дії сили, МПа. Так як шини будуть з'єднані жорстко, то дана величина буде рівна 0;

$\sigma_{\text{ф}}$  – механічна напруга від взаємодії фаз, МПа.

$$\sigma_{\text{ф}} = \sqrt{3} * 10^{-8} * \frac{i_y^2 * l^2}{W_{y0-y0} * \alpha}$$

де  $\alpha$  відповідно до типових конструкцій РП 6-10 кВ приймемо 60 см

$l$  – довжина прольоту, приймемо 1,75 м

$$\sigma_{\text{ф}} = \sqrt{3} * 10^{-8} * \frac{(7,27 * 10^3)^2 * 1,75^2}{(23,7 * 10^{-6}) * 0,6} = 0,197 \text{ (МПа)}$$

$$\sigma_{\text{розр}} = 0,197 + 0 \leq 174,95$$

Умова виконується, отже шини механічно міцні, і можна обирати їх для встановлення.

### Компонування розподільчих пристроїв 220 кВ і конструктивна частина

Розподільчі пристрої (РП) 220 кВ на даній ПС будуть виконуватись відкритими.

Для сторони 220 кВ на проектованій підстанції оберемо типову схему «місток з вимикачами». Її типовий вигляд наведено на рис. 2.

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

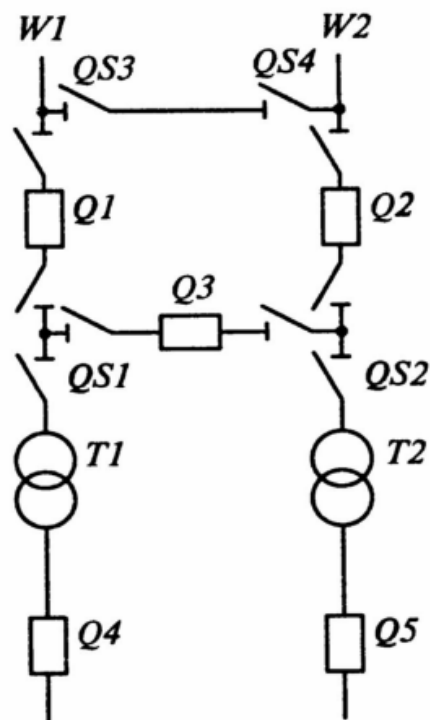


Рисунок 2 – Схема «місток з вимикачами»

### Компонування розподільчих пристроїв 10 кВ і конструктивна частина

РП 10 кВ в даному проекті підстанції будуть виконуватись закритими. Для їх компонування використаємо типову схему з однією системою збірних шин, секціонованою вимикачем. Її загальний вигляд наведено на рисунку 3.

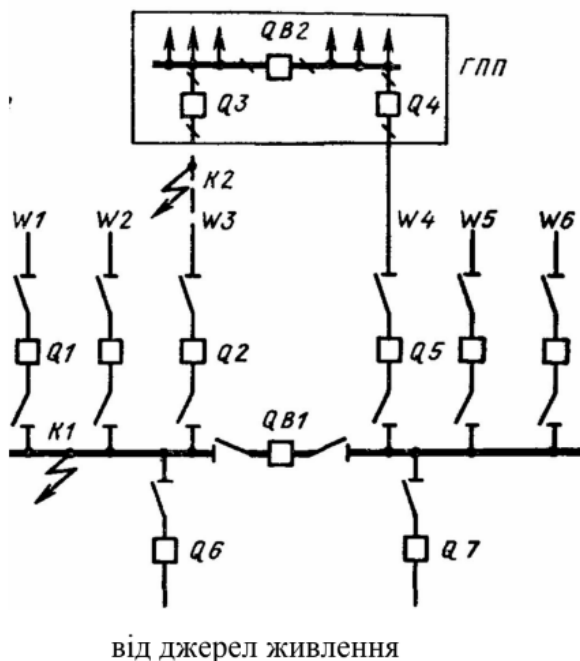


Рисунок 3 – Схема з однією системою збірних шин, секціонованою вимикачем.



### 3 Розрахунок релейного захисту

Необхідно вибрати робочі уставки захисту ПЛ-10 кВ. Схема лінії вибирається відповідно до вихідних даних: опір і ЕРС живильної системи (однакові для максимального й мінімального режимів), зведені до шин 10 кВ живильної підстанції; параметри ділянок основної лінії й відгалужень; параметри трансформаторів. ЕРС системи беруть такою, що дорівнює середній номінальній напрузі (10,5 кВ).

На ПЛ-10 кВ установлений максимальний струмовий захист, виконаний за двофазною дворелейною схемою з реле.

Розрахунок максимального захисту полягає у виборі:

1. Струму спрацьовування захисту (первинного).
2. Струму спрацьовування реле (для певної прийнятої схеми захисту й типу реле).
3. Часу спрацьовування реле часу (для захисту з незалежною характеристикою) або характеристики спрацьовування струмових реле (для захисту із залежною характеристикою).

Крім того, потрібна перевірка точності роботи трансформаторів струму, а також перевірка термічної стійкості елемента, що захищається, при обраному часі спрацьовування захисту.

1	2	3	4	5	6	7	Тип реле
АС-35	АС-35	А-25	АС-35	ПС-25	А-25	ПС-35	РС80М2 / нормальна

Тип запобіжника	Довжина ділянка, км						
	1	2	3	4	5	6	7
ПВТ-10	2,2	2,6	20	5	2	7	10

Споживана потужність, кВА					
S1	S2	S3	S4	S5	S6
80	90	50	65	25	25

## 2. Розрахунок уставок максимального струмового захисту ПЛ 10 кВ

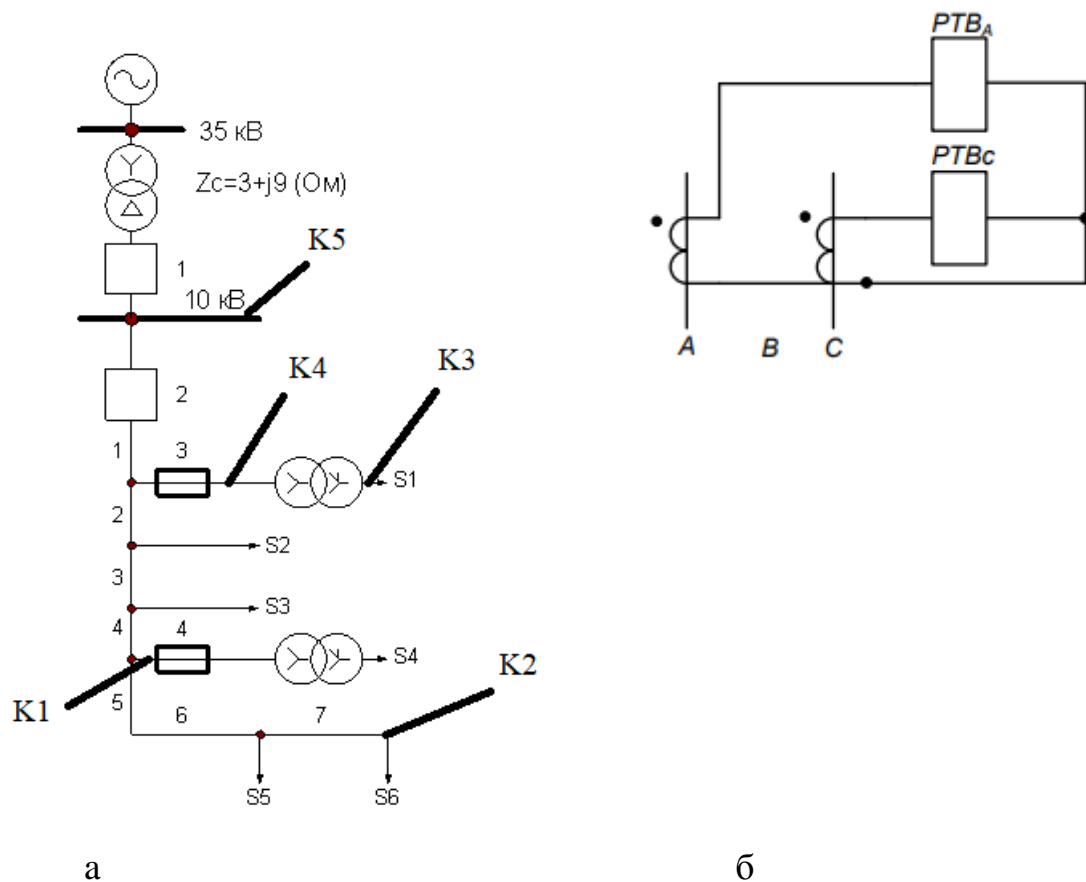


Рисунок 1. Розрахункова (а) схема ПЛ 10 кВ та принципова (б) схема максимального захисту лінії.

1. Розраховуються струми КЗ, для чого намічаються розрахункові точки КЗ, найбільш віддалені від живильної підстанції (точки К1 і К2). Визначаються опори ділянок ліній і відгалужень. Розрахунок зручно звести в таблицю. Значення опорів ( $r_{\text{ПІТ}}$ ,  $x_{\text{В.ПІТ}}$  і  $x_{\text{З.ПІТ}}$ ) наведені в додатку. Внутрішній індуктивний опір ( $x_{\text{В.ПІТ}}$ ) характерний тільки для сталевих проводів. Як відомо, цей опір залежить від значення струму в провіднику й тому точний розрахунок струмів КЗ для таких проводів є досить трудомістким. Для спрощення розрахунків струмів КЗ для ліній, у яких опір ділянок зі сталевими проводами становить незначну частину загального опору до точки КЗ, допускається брати 7 деякі середні значення  $x_{\text{В.ПІТ}}$ , що відповідають

									Лист
									33
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

струму КЗ приблизно 150 А. При більших струмах КЗ ці опори зменшуються. Таким чином, зазначене допущення створює деякий запас при розрахунку максимального струмового захисту лінії.

Ділянки лінії	Довжина, км	Марка провод	гпит, Ом/км	хв.пит, Ом/км	хз.пи, Ом/км	хв.пит+хз.пит Ом/км	г, Ом	Хв+Хз, Ом
1	2,2	АС-35	0,773	0	0,4	0,4	1,70	0,88
2	2,6	АС-35	0,773	0	0,4	0,4	2,01	1,04
3	20	А-25	1,14	0	0,4	0,4	22,8	8
4	5	АС-35	0,773	0	0,4	0,4	3,87	2
5	2	ПС-25	6,2	1,4	0,4	1,8	12,4	3,6
6	7	А-25	1,14	0	0,4	0,4	7,98	2,8
7	10	ПС-35	4,5	1,2	0,4	1,6	45	16

Визначаються сумарні активний та індуктивний опори (з урахуванням опору системи) до розрахункової точки КЗ:

Для К1:

$$r_{k1} = r_c + r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 33.38 \text{ Ом}$$

$$x_{k1} = x_c + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 20.92 \text{ Ом}$$

Повний опір до точки К1

$$z_{k1} = \sqrt{r_{k1}^2 + x_{k1}^2} = 39.394 \text{ Ом}$$

$$\text{Струм при трифазному КЗ у точці К1 } I_{K1}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot z_{k1}} = 153.887 \text{ А}$$

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		34

Для K1:

$$r_{k2} = r_c + r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_4 + r_6 + r_7 = 97.76 \text{ Ом}$$

$$x_{k2} = x_c + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 43.32 \text{ Ом}$$

Повний опір до точки K2

$$z_{k2} = \sqrt{r_{k2}^2 + x_{k2}^2} = 107.843 \text{ Ом}$$

$$\text{Струм при трифазному КЗ у точці K2 } I_{K2}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} * z_{k2}} = 56,213 \text{ А}$$

2. Розраховується струм спрацьовування максимального захисту лінії за виразом (1.4). Проведені дослідження й досвід експлуатації релейного захисту показують, що при розрахунку максимальних струмових захистів ліній 6 і 10 кВ у сільськогосподарських районах, як правило, можна брати сзп к таким, що дорівнює 1,2–1,3 за умови, що захист буде мати час спрацьовування не менше 0,5 с.

Максимальний робочий струм лінії ( $I_{\text{роб.макс}}$ ) за відсутності офіційних даних може бути визначений приблизно за максимальною сумарною потужністю силових трансформаторів, які можуть живитися від лінії, що захищається, у нормальному, ремонтному або післяаварійному режимах:

$$\sum I_{\text{ном.тр}} = \frac{\sum S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} * U_{\text{ном}}} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5}{\sqrt{3} * U_{\text{ном}}} = 17,898 \text{ А}$$

Струм спрацьовування захисту за умовою:

$$I_{\text{с.з}} \geq \frac{k_{\text{н}} * k_{\text{сзп}}}{k_{\text{пов}}} * I_{\text{роб.макс}} = \frac{1.1 * 1.25}{0.9} * 17.898 = 27,344 \text{ А}$$

Розраховується струм спрацьовування захисту реле РС80М2 і перевіряється чутливість захисту. Вибираємо первинний струм трансформатора струму. Попередньо вибравши  $n_T = \frac{15}{5}$

$$I_{\text{с.р}} = \frac{I_{\text{с.з}} * k_{\text{сх}}^{(3)}}{n_T} = \frac{27,344 * 1}{15/5} = 9,115 \text{ А}$$

Вибираємо найближчу більшу уставку реле РС80М2, що можлива для встановлення  $I_{\text{с.р}} = 9.12 \text{ А}$

						Лист
						35
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{c.з} = \frac{I_{c.p} * n_T}{k_{cx}^{(3)}} = \frac{9.12 * (15/5)}{1} = 27,36 \text{ A}$$

Коефіцієнт чутливості при КЗ в основній зоні дії захисту (точка К1 з найменшим струмом КЗ):

$$K_{ч.осн}^{(2)} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k1}^{(3)}}{I_{c.з}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} * 56,213}{27,36} = 1,779 > 1.5$$

Умова виконується, отже, за умовами релейного захисту секціонування не потрібно.

Визначається коефіцієнт чутливості в зоні резервування, тобто при КЗ на шинах нижчої напруги трансформаторів відгалужень (точка К3). Вибирається найближчий трансформатор 100 кВА, і визначається струм КЗ через захист при пошкодженні за цим трансформатором. Опір стандартного трансформатора такої потужності ТМ-100:

Опір стандартного трансформатора такої потужності дорівнює:

$$r_{TP} = \frac{\Delta P_{кз} * U_{ном.тр}^2}{S_{ном.тр}^2} = \frac{1970 * 10^2}{100^2} = 19,7 \text{ Ом}$$

$$z_{TP} = \frac{U_{k\%} * U_{ном.тр}^2}{S_{ном.тр}} = \frac{4.5 * 10^2}{100} = 45 \text{ Ом}$$

$$x_{TP} = \sqrt{z_{TP}^2 - r_{TP}^2} = 40,459 \text{ Ом}$$

Визначаються сумарні активний та індуктивний опори (з урахуванням опору системи) до розрахункової точки короткого замикання КЗ:

$$r_{кз} = r_c + r_1 + r_{TP} = 24,4 \text{ Ом}$$

$$x_{кз} = x_c + x_1 + x_{TP} = 50,339 \text{ Ом}$$

Повний опір до точки КЗ

$$z_{кз} = \sqrt{r_{кз}^2 + x_{кз}^2} = 55,941 \text{ Ом}$$

Струм при трифазному КЗ у точці КЗ

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} * z_{кз}} = \frac{10.5 * 10^3}{\sqrt{3} * 55.941} = 108,368 \text{ A}$$

						БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			36

При двофазному

$$I_{k2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{K3}^{(3)} = 93,85 \text{ А}$$

Коефіцієнт чутливості:

$$k_{ч.рез} = \frac{I_{K3}^{(3)} * \frac{\sqrt{3}}{2}}{I_{с.з}} = \frac{36.066 * \frac{\sqrt{3}}{2}}{18.347} = 3,342 > 1.2$$

Визначаються коефіцієнти чутливості при КЗ за наступним трансформатором відгалуження й т.д. Може виявитися, що максимальний захист не чутливий до пошкоджень за малопотужними та віддаленими трансформаторами відгалужень, що допускається ПУЕ.

3. Вибираються час спрацьовування й характеристика реле РС80М2 за умовами узгодження за струмом й часом з параметрами спрацьовування захисних пристроїв наступних і попередніх елементів. Попереднім розрахунковим елементом є найбільш потужний з трансформаторів – 100 кВА. Його захист здійснюється, як звичайно, плавкими запобіжниками. Номінальний струм змінного елемента запобіжників, що збігається за значенням з номінальним струмом запобіжника  $I_{ном}$ , вибирається за таблицею 2.

Таблиця 2 – Вибір номінального струму запобіжника

Потужність трансформатора, кВА	Номінальний струм, А					
	трансформатора на стороні			запобіжника на стороні		
	0,4 кВ	6 кВ	10 кВ	0,4 кВ	6 кВ	10 кВ
25	36	2,40	1,44	40	8	5
40	58	3,83	2,30	60	10	8
63	91	6,05	3,64	100	16	10
100	145	9,60	5,80	150	20	16
160	231	15,40	9,25	250	31,5	20
250	360	24,00	14,40	400	50	40 (31,5)

Потужність трансформатора, кВА	Номінальний струм, А					
	трансформатора на стороні			запобіжника на стороні		
	0,4 кВ	6 кВ	10 кВ	0,4 кВ	6 кВ	10 кВ
400	580	38,30	23,10	600	80	50
630	910	60,50	36,40	1000	160	80

Для розрахунку вибираємо запобіжник, призначений для захисту силових трансформаторів, з номінальною напругою 10 кВ, номінальним струмом  $I_{ном} = 16$  А (табл. 2). Умовне позначення обраного запобіжника НРС -10-16. 11 На карті селективності в осях струм-час будується типова захисна характеристика плавлення обраного запобіжника, що представляє залежність часу плавлення плавкого елемента від початку КЗ до моменту виникнення дуги ( $t_{пл}$ ) від діючого значення періодичної складової очікуваного струму КЗ.

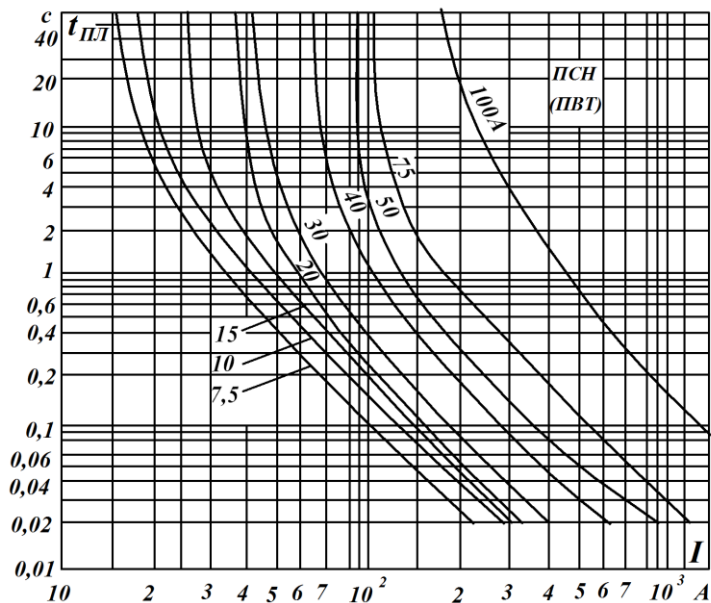


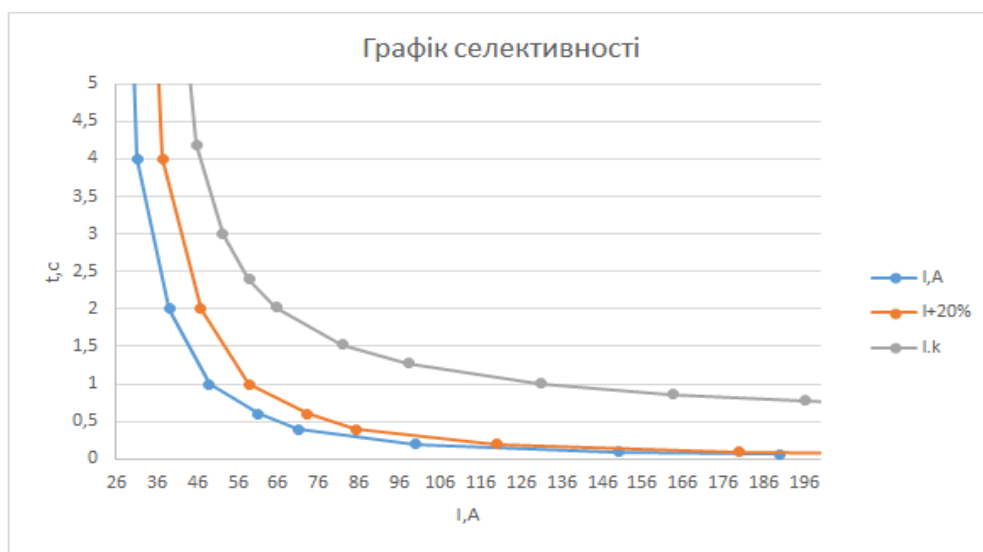
Рисунок 2 – Захисні характеристики плавких запобіжників типу ПВТ

Побудова здійснюється за такими точками типової характеристики при  $I = 16$  А (характеристика I,А, рис. 3):

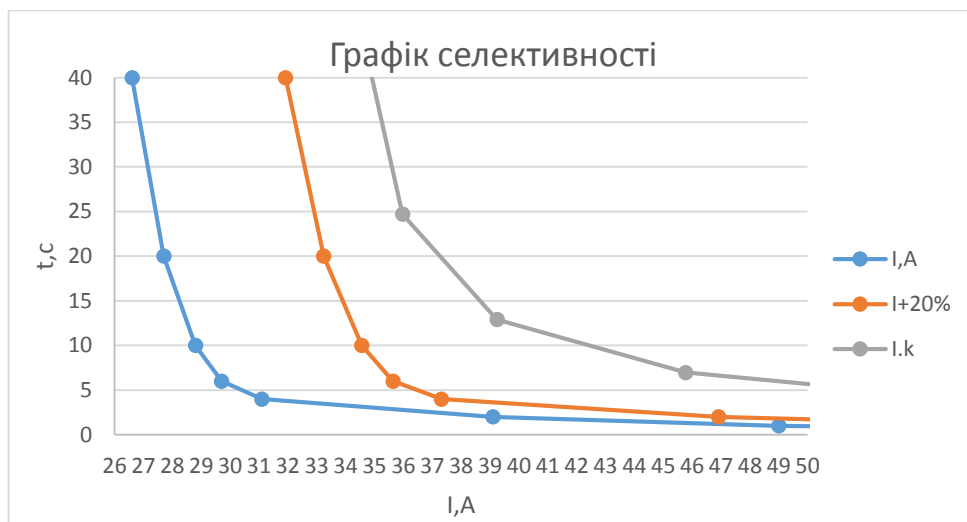
I <sub>k</sub> ,A	26,6	27,7	26,6	29,7	31,1	39,1	49	61	71	100	150	190
t,с	40	20	10	6	4	2	1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,06

Відхилення значення очікуваного струму КЗ при даному часі плавлення плавного елемента пл t від значення струму КЗ, отриманого за типовою часструмовою характеристикою плавлення, не повинне перевищувати  $\pm 20\%$ . Тому типова характеристика I,А (рис.3) повинна бути зміщена вправо на 20%. Побудова граничної час струмової характеристики I+20%:

I <sub>k</sub> ,A	31,92	33,24	34,56	35,64	37,32	46,92	58,8	73,2	85,2	120	180	228
t,с	40	20	10	6	4	2	1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,06



б



а

Рисунок 3 – Графік селективності

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата



Підбирається характеристика І.к максимального струмового захисту лінії (реле РС80М2), виходячи з таких умов:

Розрахункові дані мене не влаштовують, я підібрав свої значення часу уставки  $t_{yc} = 1 \text{ с}$  і струм спрацювання  $I_{c,p} = 10,9 \text{ А}$ .

а. Струм спрацювання захисту повинен бути не менш ніж на 10% більше від струму плавлення вставки запобіжника, що відповідає часу дії захисту в початковій частині характеристики (не менше 5 с).

Для цього визначається по графіку на рисунку 3.а струм  $I_{пл}$  при 40 с: 46,8 А. Обраний раніше струм спрацювання захисту (51 А) задовольняє цю умову.

б. Ступінь селективності 0,5 с між характеристиками захисту (І.к) і запобіжника (І+20%).

Для цього берем струм спрацювання 150 А і по графіку на рисунку 3. б бачимо що різниця між спрацювання реле і запобіжника  $1 - 0,5 = 0,5 \text{ с}$

в. Ступінь селективності між захистом живильного трансформатора і захистом ПЛ 10 кВ повинен бути приблизно 0,5 с при максимальному струмі КЗ на початку лінії (практично береться струм КЗ на шинах 10 кВ живильної підстанції). Очевидно, що обидва узгоджувані захисти працюють у незалежній частині характеристик.

Визначаються сумарні активний та індуктивний опори (з урахуванням опору системи) до розрахункової точки короткого замикання К4:

$$r_{k4} = r_c + r_1 = 4,7 \text{ Ом}$$

$$x_{k4} = x_c + x_1 = 9,88 \text{ Ом}$$

Повний опір до точки К4

$$z_{k4} = \sqrt{r_{k4}^2 + x_{k4}^2} = 10,941 \text{ Ом}$$

Струм при трифазному КЗ у точці К3

$$I_{K4}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} * z_{k4}} = \frac{10,5 * 10^3}{\sqrt{3} * 194,52} = 554,081 \text{ А}$$

При двофазному

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

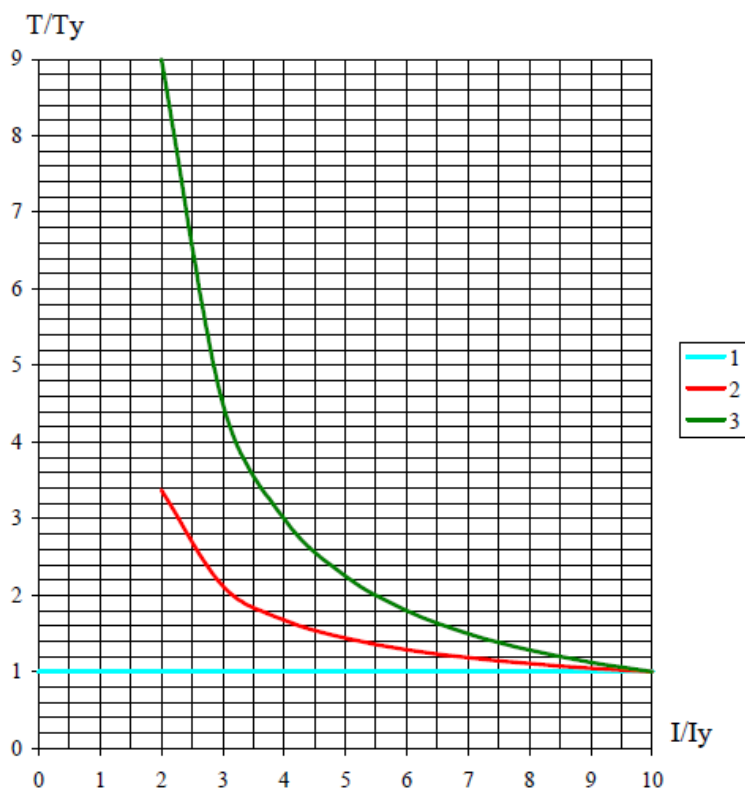
$$I_{k4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{K4}^{(3)} = 479,849 \text{ A}$$

При цьому струму визначається час плавлення плавкого запобіжника:  $t_{пл} = 1$ .

Приймаємо ступінь селективності  $\Delta t = 0.5 \text{ с}$  та визначаємо  $t_{с.з}$  :

$$t_{с.з} = t_{пл} + \Delta t = 1,5 \text{ с}$$

Беручи за основу типову нормальну характеристику реле РС80М2, визначаємо кілька точок потрібної характеристики, а потім перераховуємо абсциси цих то-



чок за обраним струмом спрацьовування захисту  $I_{с.з} = 16,2 \text{ A}$ .

Рисунок 4 – Час-струмові характеристики реле РС80М2

Струм  $I_k$  визначається за виразом:

$$I_k = \frac{k * I_{с.р} * n_T}{100 * k_{сх}^{(3)}}$$

Де:

$k$  – кратність  $I_p/I_{с.р}$ , одержана за типовою характеристикою, % (рис. 4);

$I_{c.p}$  – струм спрацьовування реле, А;

$n_T$  – коефіцієнт трансформації;

$k_{cx}^{(3)}$  – коефіцієнт схеми.

Як бачимо селективність МСЗ забезпечується у всьому діапазоні дії захисту.

Виконується перевірка струмового захисту (0,5 с) за умовами термічної стійкості проводів лінії, що захищається. Для практичних розрахунків на термічну стійкість проводів розподільних електричних мереж

$$S_{\text{мін}} = \sqrt{B/C}$$

Де:

$S_{\text{мін}}$  – мінімально допустимий перетин провода, мм<sup>2</sup> ;

$B = I_k^2 * t_{\text{вим}}$  – імпульс квадратичного струму від періодичної складової струму к І при трифазному КЗ на початку лінії, що захищається;

$C$  – постійна матеріалу (для алюмінієвих проводів та кабелів  $C = 69,5$ );

$t_{\text{вим}}$  – час від початку КЗ до його вимикання, що обчислює за виразом

$$t_{\text{вим}} = t_{c.3} + t_{в.в}$$

Де:

$t_{c.3}$  та  $t_{в.в}$  – час спрацьовування захисту й час вимикання вимикача, с; Вираз може бути наведений у більш простому вигляді:

$$S_{\text{мін}} = \frac{I_k}{C} \sqrt{t_{\text{вим}}}$$

У тих випадках, коли на лінії, що захищається, введено в роботу пристрій АПВ однократної дії, при розрахунку значення  $t_{\text{вим}}$  варто враховувати, що за час паузи без струму (як правило, близько 2 с) температура провідника істотно не зміниться. У цих випадках час проходження струму КЗ збільшується:

$$t_{\text{вим}} = t_{c.31} + t_{c.32} + 2t_{в.в}$$

Де

$t_{c.31}$  – час спрацьовування захисту з основним часом (до АПВ);  $t_{c.32}$  – час спрацьовування захисту із прискоренням після АПВ. Якщо прискорення захисту після АПВ не виконане, то значення с з  $t_{c.31} = t_{c.32}$ .

									Лист
									42
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

Струм трифазного короткого замикання на шинах 10 кВ (К5):

$$I_{K5}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} * Z_{K5}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} * \sqrt{r_c^2 + x_c^2}} = 639.01 \text{ А}$$

$$t_{\text{вим}} = 1 + 1 + 2 * 0.1 = 2.2 \text{ с}$$

$$S_{\text{мін}} = \frac{I_k}{C} \sqrt{t_{\text{вим}}} = 13.637 \text{ мм}^2$$

Що менше прийнято кабеля АС-35 на ділянці 1 (рис 1.).

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

## Висновки

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра були описані і вирішені поставлені задачі.

В розділі “Розрахунок електричної мережі” знайдені потоки потужності мережі при нормальних режимах роботи, втрати потужності в елементах мережі, визначені величини напруги в точках мережі з урахуванням поперечних складових.

В розділі “Розрахунок електричної частини станцій і підстанцій” запропонована схема з'єднань, що враховує можливість розширення, яка забезпечує надійність електропостачання в нормальному і аварійному режимах роботи та допускає можливість виконання ремонтних і експлуатаційних робіт на окремих елементах системи.

Вибрано основне обладнання підстанцій: вимикачі, роз'єднувачі, вимірювальні трансформатори струму та напруги, вказаний необхідний мінімальний набір вимірювальних приладів для встановлення на підстанціях.

В розділі “Розрахунок релейного захисту” проведені розрахунки релейного захисту лінії.

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
						44
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список використаної літератури

1. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: підручник. – Львів: Львівська політехніка, 2009. - 488 с.
2. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посіб. – К.: Знання, 2007. - 292 с.
3. Лежнюк П.Д., Лагутін В.М., Тептя В.В. Проектування електричної частини електричних станцій: навч. посіб. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 280 с.
4. Бардик Є.І., Лукаш М.П. Електрична частина електростанцій та підстанцій. Основне електрообладнання: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2011.
5. Василега П.О. Електропостачання: підручник. – Суми: СумДУ, 2019. – 521 с.
6. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: навч. посіб. – Суми: Університетська книга, 2006. – 163 с.
7. Рудницький В.Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Курсове проектування: навч. посіб. – Суми: Університетська книга, 2007. – 280 с.
8. Релейний захист і автоматика в системах електропостачання / П.П. Говоров та ін.: навч. посіб. – К.: ІЗМН, 1996. – 288 с.
9. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці: підручник. – К.: Знання, 2010. – 375 с.

					БР 5.6.141.243 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		45