

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет науки і технологій

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

ТЯГОВІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ
Методичні рекомендації до курсового проєкту

Електронний аналог
друкованого видання

Дніпро 2023

УДК 621.331

Т 99

Укладачі:

*Друбецька Тетяна Ігорівна
Бойко Антоніна Микитівна*

Рецензенти:

д.т.н., проф. О. В. Остапчук (КП)
к.т.н., доц. А. М. Афанасов (УДУНТ)

Рекомендовано МКФ УЕП (протокол № 3 від 15.11.2022)

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 585 від 19.12.2022)

Тягові та трансформаторні підстанції : методичні рекомендації до курсового проекту / уклад. Т. І. Друбецька, А. М. Бойко ; Український державний університет науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 44 с.

Методичні рекомендації призначені для використання студентами всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка під час проведення практичних занять з дисципліни «Тягові та трансформаторні підстанції» та їх самостійної роботи, можуть бути використані слухачами інституту післядипломної освіти.

Методичні рекомендації містять основні поняття про розрахунок робочих та аварійних струмів в характерних точках схеми головної комутації тягової підстанції методом відносних одиниць, критерії вибору силового електрообладнання.

© Друбецька Т. І, Бойко А. М,
укладання, 2023

© Україн. держ. ун-т науки і
технологій, оригінал-макет, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУ	4
2. ВИХІДНІ ДАНІ	4
3. ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМИ ГОЛОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ. ВИБІР ЧИСЛА ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ АГРЕГАТІВ (ТРАНСФОРМАТОРІВ І ВИПРЯМЯЧІВ).....	7
3.1. Тягові підстанції постійного струму	7
3.2. Тягові підстанції змінного струму	11
4. ОДНОЛІНІЙНА СХЕМА	13
5. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У СИСТЕМАХ ЗМІННОГО ТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	14
6. ОБЧИСЛЕННЯ МАКСИМАЛЬНИХ РОБОЧИХ СТРУМІВ	22
7. ВИБІР СТРУМОВЕДУЧИХ ЧАСТИН І ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ..	26
7.1. Шини РП	26
7.1.1. Шини ВРП.....	26
7.1.2. Шини ЗРП	28
7.1.3. Кабелі РП	29
7.2. Ізолятори	29
7.3. Високовольтні вимикачі змінного струму.....	30
7.4. Швидкодіючі автоматичні вимикачі постійного струму 3,3 кВ	31
7.5. Роз'єднувачі. Віддільники. Короткозамикачі	31
7.6. Вимірювальні трансформатори	32
7.6.1. Трансформатори струму.....	32
7.6.2. Трансформатори напруги.....	33
8. ВИБІР АПАРАТУРИ ТА СХЕМ ЖИВЛЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ПІДС- ТАНЦІЇ	34
8.1. Вибір акумуляторної батареї	34
8.2. Вибір зарядно-підзарядного пристрою (ЗПП)	36
9. СКЛАДАННЯ ВІДОМОСТІ ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ	37
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	37
ДОДАТОК А. Схеми зовнішнього електропостачання тягових підстанцій	38
ДОДАТОК Б. Добові графіки навантажень районних споживачів	39
ДОДАТОК В. Приклад розрахунку струмів к.з. в точці К-1	41

ВСТУП

Дисципліна «Тягові та трансформаторні підстанції» відноситься до обов'язкової компоненти освітньої програми Електротехнічні системи електроспоживання.

Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту сприяють досягненню наступних очікуваних результатів навчання – порівняння різних типів силового обладнання підстанції; розробки однолінійної схеми підстанції; проєктування тягової підстанції.

1. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУ

Під час виконання курсової роботи для розрахункової підстанції необхідно:

1. Обґрунтувати схеми головних електричних кіл.
2. Вибрати число, тип і потужність тягових агрегатів (трансформаторів і випрямлячів).
3. Скласти однолінійну схему.
4. Розрахувати струми короткого замикання у характерних точках однолінійної схеми.
5. Визначити максимальні робочі струми елементів тягової підстанції.
6. Вибрати струмоведучі частини та ізолятори.
7. Вибрати комутаційні апарати та вимірювальні трансформатори.
8. Вибрати апарати та схеми живлення власних потреб.
9. Розрахувати контур заземлення.
10. Розрахувати блискавкозахист.
11. Скласти відомість основного обладнання.

При розробці схематичних рішень та виборі електротехнічного обладнання тягової підстанції повинні використовуватися проєктна нормативна-технологічна документація та довідкова література.

2. ВИХІДНІ ДАНІ

Схеми зовнішнього електропостачання тягових підстанцій змінного та постійного струму надані в двох варіантах (дод. А). Згідно з трьома цифрами шифру з таблиці 2.1 вибрати вихідні дані (номер, рід струму розрахункової тягової підстанції та потужність к.з. системи №1 і №2. З таблиці 2.3 вибрати довжину ліній електропередач. З таблиці 2.2 вибрати потужність тягового навантаження. З таблиці 2.4 разом з (дод. В) вибрати потужність районних споживачів, а з таблиці 2.5 додаткові вихідні дані.

Таблиця 2.1

Дані розрахункової підстанції

Остання цифра шифру	Рід струму	Номер розрахункової п/ст	Потужність Sk1	Потужність Sk2
0	Постійний	1	2700	3000
1	Змінний	1	2500	2800
2	Постійний	2	2300	2600
3	Змінний	2	3200	3100
4	Постійний	3	2600	2900
5	Змінний	3	2300	2500
6	Постійний	4	2700	2400
7	Змінний	4	3300	2700
8	Постійний	5	2900	2400
9	Змінний	5	3400	2900

Таблиця 2.2

Дані районних споживачів

Передостання цифра шифру	Найменування споживача	Напруга споживача кВ	cosφ	Потужність фідера ПЭ/ДПР, кВА/км	Довжина лінії, км	
					Повітряна	Кабельна
0	РС-1, РС-8	10	0,85	50/25		6
	РС-5, РС-10	35	0,83		18	
1	РС-4, РС-6	10	0,85			5
	РС-5, РС-8	35	0,83		20	
2	РС-8, РС-11	10	0,84			2
	РС-3, РС-12	35	0,85		15	
3	РС-9, РС-10	10	0,82			3
	РС-2, РС-4	35	0,83		22	
4	РС-2, РС-11	10	0,84			4
	РС-3, РС-9	35	0,85		17	
5	РС-10, РС-11	10	0,83			6
	РС-7, РС-9	35	0,82		20	
6	РС-1, РС-12	10	0,84			3
	РС-4, РС-9	35	0,85		15	
7	РС-8, РС-1	10	0,83			5
	РС-6, РС-5	35	0,83		25	
8	РС-1, РС-11	10	0,84		4	
	РС-3, РС-7	35	0,85	18		
9	РС-4, РС-10	10	0,82		2	
	РС-2, РС-6	35	0,84	19		

Таблиця 2.3

Дані довжин ліній електропередач

Довжина ПЛ-110кВ, км	Цифра, що вказує сотні									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L1	22/46	25/47	19/48	20/52	25/49	19/50	23/47	21/51	20/52	24/48
L2	21/45	20/52	22/53	23/48	19/46	20/50	22/51	23/47	24/50	22/46
L3	25/49	23/50	19/52	21/46	20/49	24/52	20/53	18/50	25/46	21/45
L4	40/53	42/48	44/52	48/53	43/50	45/49	46/46	47/47	41/49	23/51
L5	30/50	35/45	25/30	40/35	20/40	25/55	30/60	40/45	35/50	45/30
L6	35/45	40/50	20/30	45/35	30/40	25/60	30/30	35/55	40/60	30/45

Примітка: у чисельнику вказана довжина лінії для підстанцій постійного струму, у знаменнику – для підстанцій змінного струму.

Таблиця 2.4

Потужність тягового навантаження

Цифра, що вказує сотні		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Підстанція змінного струму, МВт	праве плече	8,6	7,0	7,9	8,0	8,5	8,5	6,7	8,5	6,5	9,3
	ліве плече	7,5	6,8	8,4	7,6	8,9	7,9	6,9	8,0	6,8	8,6
Підстанція постійного струму, МВт		8,0	9,0	5,0	7,5	5,3	10,0	5,2	9,5	5,4	8,5

Таблиця 2.5

Додаткові дані

Передостання цифра шифру		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Опір ґрунту, Ом м		100	40	50	60	70	80	90	100	90	60
Розміри п/ст., м	довжина	130/ 100	120/ 110	90/ 100	100/ 130	125/ 115	90/ 110	135/ 120	100/ 110	90/ 115	130/ 150
	ширина	115/ 120	110/ 110	100/ 115	110/ 120	100/ 125	120/ 130	130/ 140	120/ 135	100/ 120	95/ 115
Струм акумуляторної батареї, А	постійне навантаження	15/10									
	аварійний розряд	10/8									
	Включення приводу	50									

Примітка: у чисельнику вказані дані для підстанцій постійного струму, у знаменнику – для підстанцій змінного струму.

3. ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМИ ГОЛОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ. ВИБІР ЧИСЛА, ТИПА ТА ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ АГРЕГАТІВ (ТРАНСФОРМАТОРІВ І ВИПРЯМЛЯЧІВ)

Для обґрунтування схем головних електричних підстанцій необхідно знати рівень напруг на всіх розподільчих пристроях, тип підключення тягової підстанції до схеми електропостачання, число фідерів тягового та районного навантаження.

При описі схеми необхідно обґрунтувати схемні рішення кожного розподільчого пристрою, користуючись описом типових схем підстанцій.

3.1. Тягові підстанції постійного струму

Для тягової підстанції постійного струму типовим рішенням являється подвійна трансформація напруги з первинної 110 кВ (рідше 150, 220 кВ) на напругу, необхідну для живлення районного навантаження: зазвичай 10 і 35 кВ за допомогою триобмоткового знижувального трансформатора, а потім до напруги 3,3 кВ постійного струму за допомогою перетворювального агрегату, який включає тяговий трансформатор і випрямну установку. Тому розрахункова потужність для вибору триобмоткового знижувального трансформатора з первинною напругою 110 (150, 220) кВ та вторинною – 10 і 35 кВ визначається за формулою

$$S_{\text{розрах.мах}} = (S_{\text{ш.мах}10} + S_{\text{ш.мах}35})k_p, \quad (3.1)$$

де $S_{\text{ш.мах}10}$ – максимальна потужність на шинах 10 кВ, кВА;

$S_{\text{ш.мах}35}$ – максимальна потужність на шинах 35 кВ, яка дорівнює потужності районного навантаження 35 кВ (S'_{35}) , кВА;

k_p – коефіцієнт, який враховує різночасність наступу максимумів навантажень вторинних обмоток трансформаторів, (приймається 0,95...0,98).

Максимальна потужність на шинах 10 кВ

$$S_{\text{ш.мах}10} = \left(\sum S_{\text{ПА}} + S'_{10} + S_{\text{ТСН}} \right) k_p', \quad (3.2)$$

де $\sum S_{\text{ПА}}$ – потужність трансформаторів перетворювальних агрегатів, кВА;

S'_{10} – потужність районного навантаження 10 кВ, кВА;

$S_{\text{ТСН}}$ – потужність трансформаторів власних потреб, кВА;

k_p' – коефіцієнт, який враховує різночасність настання тягового і не тягового навантаження, (приймається 0,95...0,98).

По потужності тягового навантаження (див. завдання), підбирається перетворювальний трансформатор за умовою:

$$S_{ПА\ ном} \geq S_{ПА\ розрах}, \quad (3.3)$$

При проектуванні сучасних тягових підстанцій застосовуються дванадцятипульсові перетворювальні агрегати типу В-ТПЕД-3150к-3,3к-У1 з номінальним струмом 3150 А.

Розрахункова кількість перетворювальних агрегатів

$$N = \frac{I_d}{I_{дно.}}, \quad (3.4)$$

де $I_{дно.}$ – номінальний струм випрямляча, А;

I_d – діюче значення випрямленого струму, А.

$$I_d = \frac{S_{ПА}}{1,05U_{дно.}}, \quad (3.5)$$

де $U_{дно.}$ – номінальна напруга на шинах, яка дорівнює 3,3 кВ.

На кожній тяговій підстанції передбачається один резервний агрегат. Для визначення потужності районного навантаження відповідної напруги S'_{10} або S'_{35} , розраховується максимальна активна потужність одного районного споживача

$$P_{max} = P_y \cdot k_c, \quad (3.6)$$

де P_y – установлена потужність споживача (див. завдання разом з додатком В);

k_c – коефіцієнт попиту (див. додаток В для відповідного споживача).

Максимальна повна потужність усіх районних споживачів відповідної напруги за урахуванням постійних та змінних втрат у розподільчих мережах і обмотках трансформаторів споживачів визначається за формулою:

$$S_{max} = k_{p.m} \left(1 + \frac{P_{пост} + P_{пер}}{100} \right) \sqrt{\left(\sum_1^n P_{max} \right)^2 + \left(\sum_1^n Q_{max} \right)^2}, \quad (3.7)$$

де P_{max} – найбільша активна потужність споживача, яка визначається за формулою (3.6), кВт;

- Q_{\max} – реактивна потужність споживача, відповідно до потужності P_{\max} ;
 $Q_{\max} = P_{\max} \cdot \operatorname{tg}\varphi$, квар;
 $P_{\text{пост}}$ – постійні втрати в сталі трансформаторів споживачів, які приймають у межах 1...2%;
 $P_{\text{змін}}$ – змінні втрати у мережах з обліком втрат у обмотках (міді) трансформаторів, які приймають у межах 5...8%;
 $k_{p.m}$ – коефіцієнт різночасності максимумів навантажень районних споживачів.

$$k_{p.m} = \frac{\sum_1^n P_{\text{розрах. max}}}{\sum_1^n P_{\text{max}}}, \quad (3.8)$$

де $\sum_1^n P_{\text{розрах}}$ – сумарна розрахункова активна потужність;

$\sum_1^n P_{\text{max}}$ – сума максимальних активних потужностей окремих споживачів.

Визначення максимальної повної потужності за формулою (3.7) виконують у такій послідовності:

1. Обчислюють максимальні активні потужності окремих споживачів за формулою (3.6);

2. Обчислюють активні потужності окремих споживачів по годинам доби P_t за обчислювальними значеннями потужностей і типовим графіком згідно формули:

$$P_t = \frac{P_t\%}{100} P_{\text{max}}, \quad (3.9)$$

де $P_t\%$ – потужність у процентах від максимальної (прийнятої за 100%) за типовим графіком для відповідного типу споживача;

3. Обчислюють сумарні активні потужності для кожного часу доби. Обчислення за п. 2 і п. 3 заносять у таблицю 3.1.

4. Із таблиці 3.1 знаходять окремо для кожної напруги сумарні максимальні активні потужності споживачів $\sum_1^n P_{\text{розрах}}$;

5. За значеннями P_{max} окремих споживачів знаходять максимальну активну потужність за формулою:

$$\sum_1^n P_{\text{max}} \quad (3.10)$$

6. Знаходять максимальну реактивну потужність за формулою:

$$Q_{max} = \frac{P_{max}}{\tan \phi} \quad (3.11)$$

7. Обчислюють k_{pt} за формулою (3.8);

8. Обчислюють S_{max} за формулою (3.7).

Таблиця 3.1

Навантаження не тягових споживачів

Години доби	Навантаження, кВт					
	споживачі 10 кВ			споживачі 35 кВ		
	споживач № 1	споживач № 2	сумарна №1+№2	споживач № 1	споживач № 2	сумарна №1+№2
0						
1						
...						
24						

Потужність трансформаторів власних потреб вибирають сходячи із потужності, необхідної для живлення власних потреб підстанції. Для точного вибору необхідно мати точні дані про потужність приймачів електроенергії власних потреб, їх кількості, ККД, коефіцієнтах загрузки і одночасності включення, по значені яких знаходять S_{TCH} . На основі даних проектних організацій і практики експлуатації діючих тягових підстанцій в залежності від величини первинної напруги тягової підстанції, типа підстанцій – опорна чи проміжна, потужності ГПТ, числа перетворювальних агрегатів, кліматичного поясу, з урахуванням живлення від шин власних потреб, трансформатора СЦБ і дистанції контактної мережі для опорної підстанції приймають потужність одного ТВП 400 кВА, для проміжної – 250 кВА На тяговій підстанції встановлюють два ТВП, один з яких робочий, а другий резервний.

Згідно Правил улаштування системи тягового електропостачання залізниць України безперебійність живлення навантажень тяги (крім слабо завантажених ліній) забезпечується встановленням на підстанції не менше двох понижуючих трансформаторів. У випадку відключення одного понижуючого трансформатора або випрямного агрегату інші, які залишились в роботі, повинні забезпечувати задані розміри руху при прийнятій у проекті схемі живлення контактної мережі та організації руху поїздів, а також живлення навантажень нетягових споживачів першої та другої категорій.

Умовою вибору понижуючого трансформатора являється:

$$S_{TCH} \geq S_{max} \quad (3.12)$$

де $S_{\text{ПТНОМ}}$ – потужність понижуючого трансформатора, кВА;

3.2. Тягові підстанції змінного струму

На тягових підстанціях змінного струму встановлюються триобмоткові трансформатори, які мають обмотки для живлення тягового та нетягового навантаження.

Розрахункова потужність трансформатора знаходиться за формулою:

$$S_{\text{ТРАНС}} = \frac{S_{\text{МАКС}}}{k_p} \quad (3.13)$$

де $S_{\text{МАКС}}^{\text{27,5}}$ – максимальна потужність на шинах 27,5 кВ (кВА), яка знаходиться за формулою (3.17);

$S_{\text{МАКС}}^{\text{35}}$ – максимальна потужність на шинах 35 або 10 кВ, кВА;

k_p – коефіцієнт, який враховує різночасність настання максимумів тягових навантажень 27,5 кВ і не тягових навантажень 35 або 10 кВ, (приймається 0,95...0,98).

$$S_{\text{ТРАНС}} = S_{\text{Т}} + S_{\text{ТСН}} + S_{\text{ДПР}} \quad (3.14)$$

де $S_{\text{Т}}$ – потужність тягового навантаження на шинах 27,5 кВ (кВА);

$S_{\text{ТСН}}$ – потужність трансформаторів власних потреб, кВА;

$S_{\text{ДПР}}$ – потужність не тягових споживачів, які живляться від шин 27,5 кВ (кВА);

Потужність тягового навантаження знаходиться за формулою:

$$S_{\text{Т}} = U_{\text{Ш}} \left(2I_{\text{Д}}' + 0,65I_{\text{Д}}'' \right) k_{\text{НР}} k_{\text{КУ}}, \quad (3.15)$$

де $U_{\text{Ш}}$ – напруга на шинах РП 27,5 кВ;

$I_{\text{Д}}'$ – ефективний струм найбільш завантаженого плеча (фази) трансформатора, А;

$I_{\text{Д}}''$ – ефективний струм найменш завантаженого плеча (фази) трансформатора, А;

$k_{\text{НР}}$ – коефіцієнт різночасності навантаження фаз трансформатора, приймається 0,9;

$k_{\text{КУ}}$ – коефіцієнт компенсаційного пристрою, який враховує зниження потрібної на тягу потужності при роботі компенсаційного пристрою, (приймається 0,93).

Потужність фідера ДПР знаходиться по заданій потужності в кВА на 1 км:

$$S_{\text{дпр}} = S_{\text{дпр1}} \cdot L, \quad (3.16)$$

де $S_{\text{дпр1}}$ – потужність ДПР на 1 км довжини (кВА/км);

L – довжина фідера ДПР, яка дорівнює половині довжини відстані між підстанціями.

Максимальна потужність на шинах 35 і 10кВ, від яких живляться районні споживачі:

$$S_{\text{дпр}} = S_{\text{дпр1}} \cdot L, \quad (3.17)$$

$$S_{\text{дпр}} = S_{\text{дпр1}} \cdot L, \quad (3.18)$$

де S'_{10} , S'_{35} – потужності районних споживачів 10 кВ, 35 кВ, кВА, знаходиться за формулою (3.7);

Якщо на тяговій підстанції встановлюється триобмотковий трансформатор, який має обмотку для живлення районного навантаження 10 кВ, то трансформатор власних потреб економніше жити від шин 10 кВ, а не від 27,5 кВ. Тоді:

$$S_{\text{дпр}} = S_{\text{дпр1}} \cdot L, \quad (3.19)$$

Вибір понижуючого трансформатора здійснюється за умовами (3.13).

Вибір усіх трансформаторів розрахункової тягової підстанції рекомендується звести у таблицю 3.1 по наступній формі:

Таблиця 3.1

№ п/п	Призначення трансформатора	Тип трансформатора	Кількість	U1 кВ	U2 кВ	U3 кВ	Uк%			Схема з'єднання	ΔРк, кВт
							В-С	В-Н	С-Н		

Потужність кінцевих або відгалужувальних підстанцій :

$$S_{\text{п/ст}} = S_{\text{п/ст}} \cdot L, \quad (3.20)$$

де $S_{\text{п/ст}}$ – потужність підстанції, кВА;

$S_{\text{п/стном}}$ – номінальна потужність одного понижуючого трансформатора, встановленого на підстанції, кВА.

Потужність на шинах опорної або транзитної підстанції визначається

умовою:

$$\sum S_{\text{пр}} \quad (3.21)$$

де $\sum S_{\text{пр}}$ - потужність підстанцій, які живляться транзитною енергією від шин проектованої підстанції, кВА;

k_p'' – коефіцієнт, який враховує різночасність настання максимумів навантажень на підстанції, що проектується і тієї, що живляться від її шин (приймається 0,6...0,8); чим більше підстанцій живиться від шин підстанції що проектується, тим менше значення k_p'' .

4. ОДНОЛІНІЙНА СХЕМА

При складанні однолінійної схеми (схеми головних електричних з'єднань) рекомендовано користуватися схемами проектів останніх років. Треба мати на увазі, що схеми головних електричних з'єднань тягових підстанцій систематично удосконалюються з метою підвищення надійності їх роботи, безпеки обслуговування і економічності, як по первинним затратам, так і в експлуатації. Зображення обладнання, струмоведучих частин і електричних з'єднань між ними має бути згідно ГОСТ «Зображення умовні графічні в схемах» єдиної системи конструкторської документації. Характеристики обладнання і струмоведучих частин вказує на схемах так: головні понижуючі трансформаторі (ГПТ) – тип, номінальна напруга, потужність; високовольтні вимикачі, роз'єднувачі, віддільники і короткозамикачі – тип, номінальна напруга і струм; силові трансформатори – тип, номінальна потужність і напруга; трансформаторі струму – тип, номінальна напруга і струм, класи точності вторинних обмоток; трансформатори напруги – тип, напруга, клас точності; випрямлячі – тип, номінальна напруга, номінальний струм; запобіжники – тип і напруга; обмежувачі – тип, номінальна напруга; контури згладжувального пристрою – величини ємностей, індуктивностей і частоти вищих гармонік, на яких вони призначені працювати; реактори – тип, струм і номінальна потужність; збірні шини – напруга, номер секції або системи шин, полярність або фаза, головна або запасна, матеріал та переріз шин. Характеристики типів обладнання вказуються по приєднанням в цілому. Якщо однакові типи і характеристики обладнання інших таких же приєднань незалежно від того, до яких секцій або системам шин вони відносяться, то параметри обладнання по цим приєднанням не вказуються.

5. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У СИСТЕМАХ ЗМІННОГО ТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) являється одним з найбільш важливих етапів проектування, так як по даним цього розрахунку проводиться перевірка вибраного обладнання, струмоведучі частини і захисні пристрої електроустановки.

У випадку віддалених к.з. застосовують приближений метод розрахунку оснований на допущеннях незмінності ЕРС і опорів генераторів джерела. Розрахунок струмів к.з. виконується в системі відносних одиниць, основою якого являється приведення опорів усіх елементів схеми до базисних умов.

Струми коротких замикань розраховуються у характерних точках (рис. 5.1).

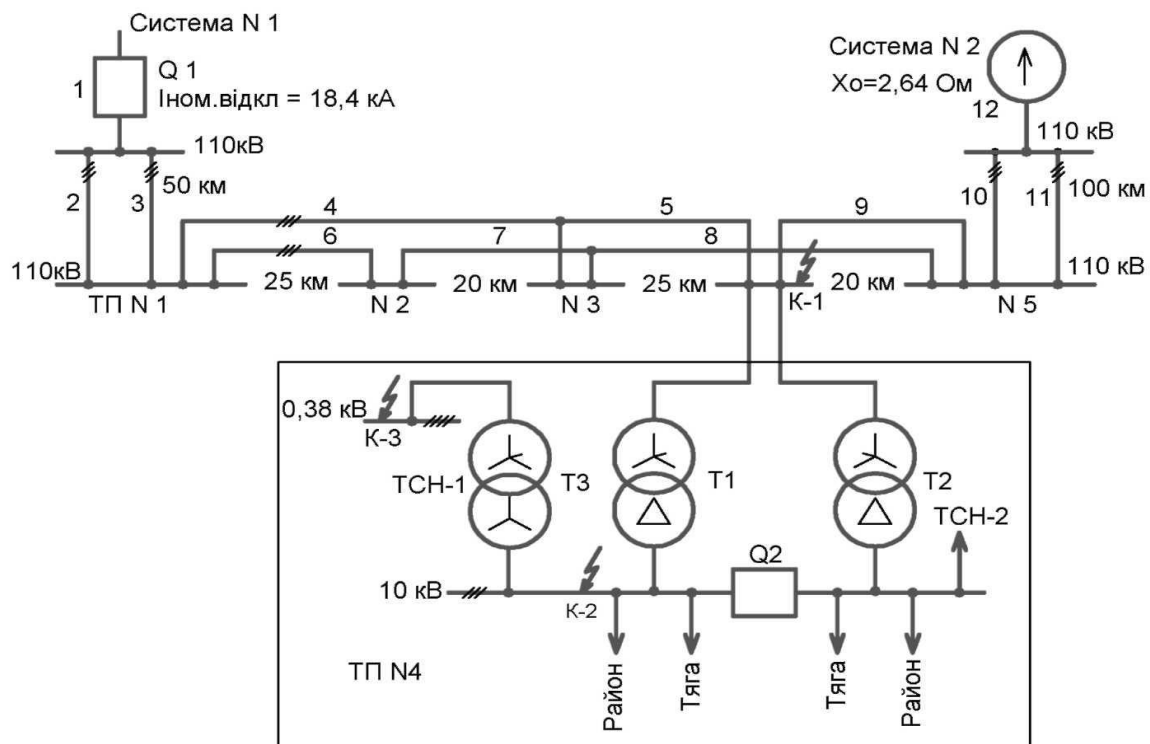


Рис. 5.1 Однолінійна розрахункова схема

Рекомендований порядок розрахунку струмів к.з.

1. Для заданої схеми зовнішнього електропостачання складається однолінійна розрахункова схема, включаючи спрощену схему заміщення тягової підстанції (рис. 3.1). Вибираються точки к.з. – на шинах усіх розподільчих пристроїв (РП) тягової підстанції.

При цьому вказуються номінальні параметри (напруги, потужності, опори) окремих елементів, що враховуються у розрахунках. З метою спрощення для кожної електричної ступені замість її дійсної або номінальної напруги

приймають розрахункову (або середнє лінійне) напругу $U_{\text{ср}}$, кВ, той ступені, де робиться розрахунок струму к.з. (напруга на початку та в кінці лінії різна по величині).

Розрахункові напруги вище номінальних приблизно на 5%. Так для номінальних напруг

$U_{\text{НОМ}}$, кВ: 0,22; 0,38; 0,5; 0,66; 3; 6; 10; 20; 25; 35; 110; 220; 330; 500; 750; 1150

приймають відносно наступних значень розрахункової напруги

$U_{\text{ср}}$, кВ: 0,23; 0,4; 0,525; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 21; 26,2; 37; 115; 230; 347; 525; 787; 1200.

2. По розрахунковій схемі складається схема заміщення, на якій кожний елемент зображується еквівалентним опором Z або X (рис. 5.2).

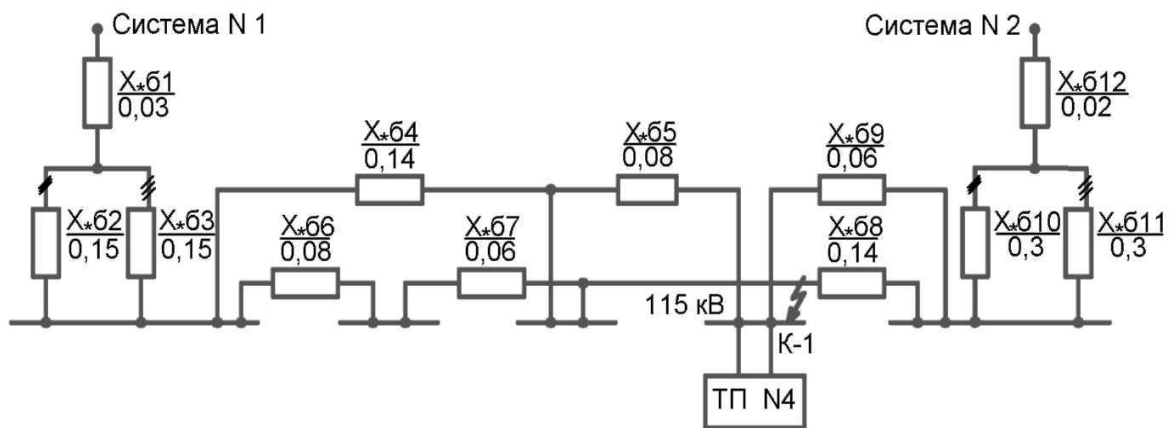


Рис. 5.2 Схема заміщення

3. Далі приймається певне значення базисної потужності $S_{\text{б}}$, МВА (звичайно приймається $S_{\text{б}}=100$ МВА).

При застосуванні системи відносних одиниць задають базисну напругу $U_{\text{б}}$, рівну середній нарузі на шинах, де розраховується струм к.з. Базисні величини пов'язані умовою:

$$S_{\text{б}} = \sqrt{3} U_{\text{б}} I_{\text{б}} \quad (5.1)$$

Зазвичай задаються базисною потужністю і базисною напругою, і по ним вже знаходять базисний струм, кА:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{б}}} \quad (5.2)$$

Співвідношення між $I_{\text{к}}$, $X_{*б}$ та $I_{\text{б}}$:

$$I_K = \frac{I_0}{X_{*брз}}, \quad (5.3)$$

де I_K – діюче значення періодичної складової струму к.з. в перший період після виникнення к.з. від джерела необмеженої потужності, кА;

$X_{*брз}$ – сумарний відносний опір до точки к.з., Ом.

Всі опори нумеруються дробом, чисельник якого – порядковий номер, а знаменник – опір елемента, виражений у відносних базисних одиницях. Повинні бути знайдені активні і індуктивні опори кола к.з. Активними опорами нехтують, якщо $r < 1/3x$, що часто мають місце у високовольтних колах.

4. Шляхом поступового перетворювання схеми заміщення по правилам, відомим з курсу ТОЕ, приводять схему заміщення до найбільш простого виду так, щоб кожне джерело живлення або група джерел були пов'язані з точкою к.з. одним результуючим опором $X_{*брз}$ (рис. 5.2, 5.3).

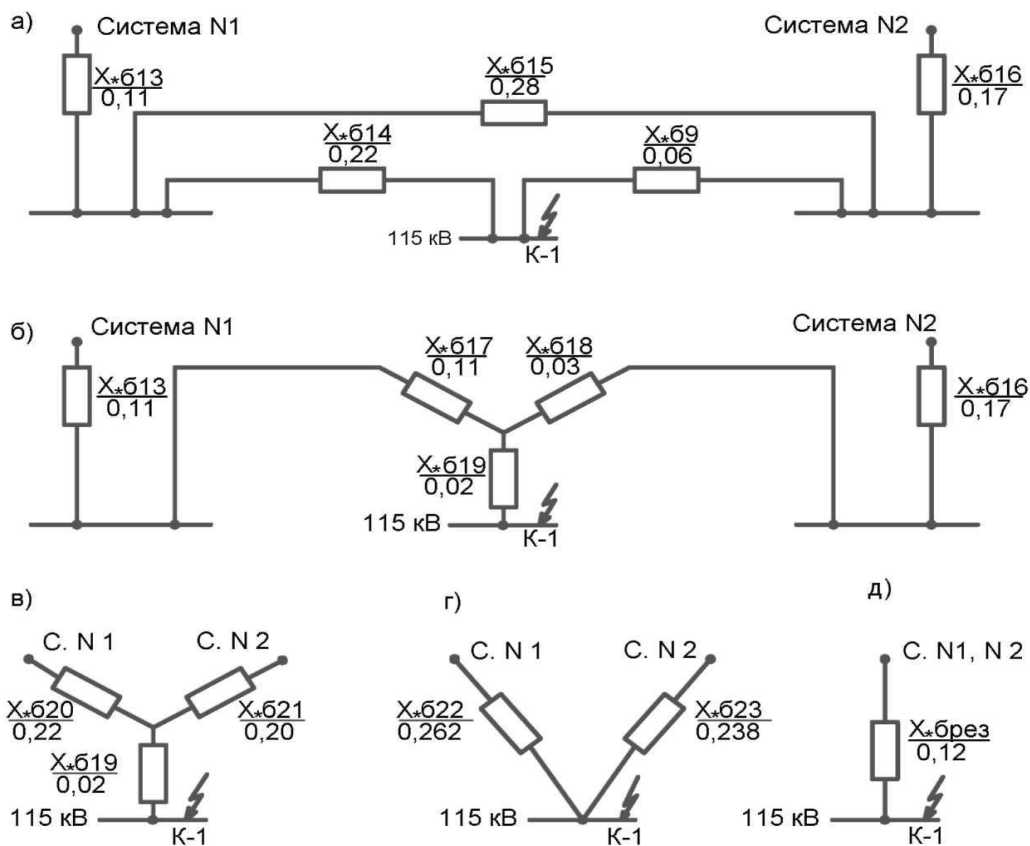


Рис. 5.3 Перетворювальні схеми заміщення

5. Знаходять діюче значення струму встановленого режиму I_∞ . Так як точка к.з. живиться від системи необмеженої потужності, к.з. – віддалене і періодична складова незмінна за весь час к.з., тобто

$$I_{\infty} = I_K = I_{\Gamma}$$

Розраховують ударний струм, кА:

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_K \quad (5.4)$$

Для високовольтних кіл з переваженням індуктивного опору і постійної часу $T_a \approx 0,05$ с приймають $k_y = 1,8$, тоді:

$$i_y = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_K = 2,55 I_K \quad (5.5)$$

6. Діюче значення ударного струму, кА:

$$I_{\text{уд}} = \dots \quad (5.6)$$

7. Потужність к.з., кВА:

$$S_K = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_K \quad (5.7)$$

або

$$S_K = \frac{S_{\sigma}}{X_{*pe}} \quad (5.8)$$

Розрахунок струмів к.з. на виводах вторинних обмоток силових трансформаторів.

1. Для двообмоткових силових трансформаторів у паспорті задається значення напруги к.з. $u_K\%$ при її номінальній потужності, яке дорівнює відносному номінальному опору трансформатора ($X_{\text{ном.т}}\%$). Відносний опір двообмоткового трансформатора, приведений до базисної потужності, визначається за формулою:

$$X_{*\text{т}} = X_{*\text{ном.т}} \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{ном.т}}} = \frac{u_K\%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{ном.т}}} \quad (5.9)$$

Для триобмоткових трансформаторів, автотрансформаторів напруги к.з. задаються для кожної пари обмоток при номінальній потужності трансформаторів. Напруга $u_K\%$ окремих обмоток при номінальній потужності триобмоткового трансформатора приблизно визначають за формулою:

$$u_{K1} = \dots, u_{K2} = \dots, u_{K3} = \dots$$

$$\frac{X_{*b_{TB}}}{S_{НОМ.Т}} = \frac{u_{к,В} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}}, \quad (5.10)$$

$$\frac{X_{*b_{с}}}{S_{НОМ.Т}} = \frac{u_{к,с} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}},$$

Далі розраховуються відносні базисні опори обмоток триобмоткового трансформатора:

$$X_{*b_{В}} = \frac{u_{к,В} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}}, \quad (5.11)$$

$$X_{*b_{с}} = \frac{u_{к,с} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}}, \quad (5.12)$$

$$X_{*b_{Н}} = \frac{u_{к,Н} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}}. \quad (5.13)$$

2. Для триобмоткового трансформатора зі з'єднанням обмоток Y/Y/0 для реалізації дванадцятипульсової схеми випрямлення з обмоткою нижчої напруги, поділеної на дві гілки (з розщепленою обмоткою) часто задаються не трьома $u_{к} \%$ для кожної пари обмоток, а одною, так названою крізною напругою короткого замикання $u_{к} \%$.

Спрощена схема трансформатора і схема заміщення для розрахунку струму к.з. на виводах обмоток перетворювального трансформатора (Т) приведена на рисунку 5.4.

Для такого трансформатора задаються:

$$X_{ТВ} \% = 0,125 \cdot u_{к,В-Н} \% , \quad (5.14)$$

$$X_{ТН1} \% = X_{ТН2} \% = 1,75 \cdot u_{к,В-Н} \% . \quad (5.15)$$

Для базисних умов відносні опори можуть бути розраховані по формулам:

$$X_{*b_{ТВ}} = u_{к,В} \% \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}} = X_{ТВ} \% \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}} = 0,125 \frac{u_{к,В-Н} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}},$$

$$X_{*b_{ТН1}} = X_{*b_{ТН2}} = \frac{u_{к,Н1(Н2)}}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}} = \frac{X_{ТН1(ТН2)} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}},$$

$$X_{*b_{ТН1}} = 1,75 \frac{u_{к,В-Н} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{НОМ.Т}}. \quad (5.16)$$

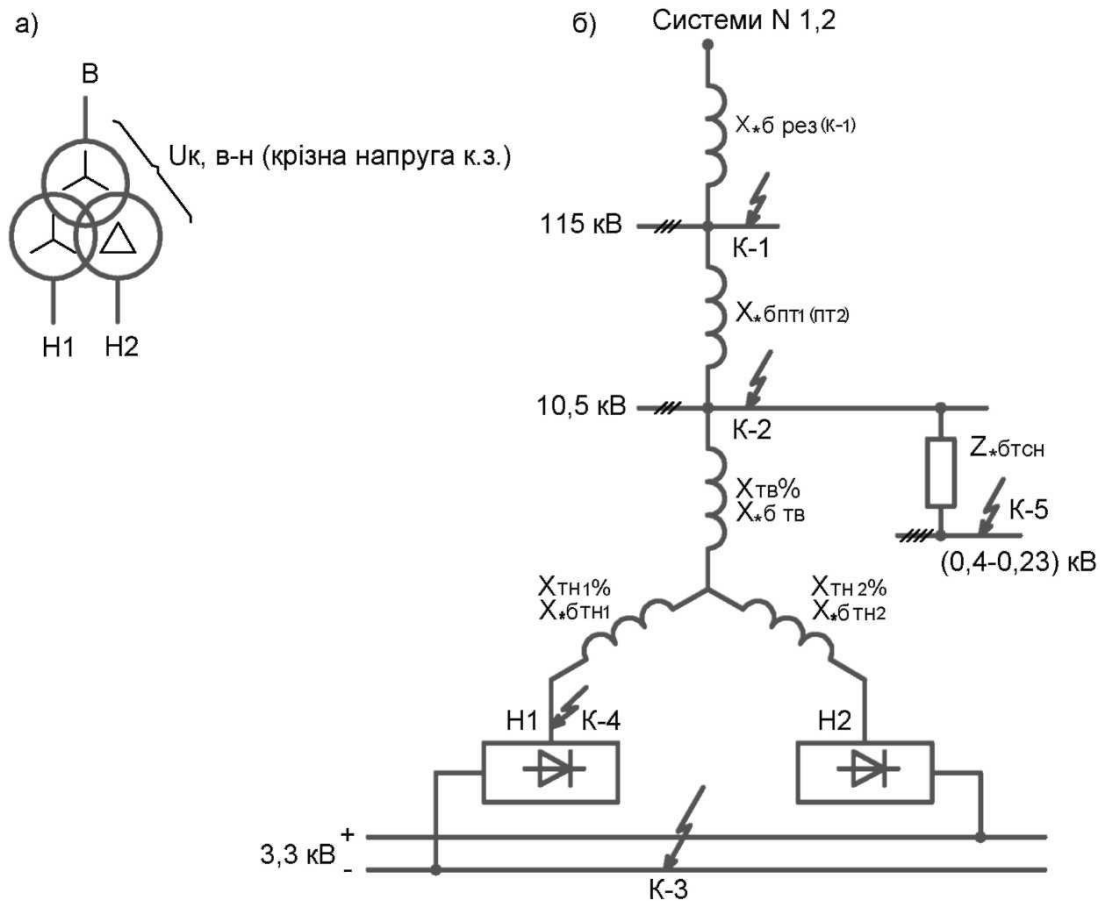


Рис. 5.4 Спрощена схема трансформатора і схема заміщення для розрахунку струму к.з.:
а – схема трансформатора; б – схема заміщення

Базисна напруга на виводах вторинних обмоток (точка К-4) $U_б = 1,5$ кВ.
 Результуючий відносний опір в точці К-4 (рис. 3.4, б).

$$X_{*брез(K-4)} = X_{*брез(K-1)} + X_{*бпт1(пт2)} + X_{*бТВ} + X_{*бТН1(Н2)}. \quad (5.17)$$

Базисний струм для ступені напруги 1,5 кВ

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_б}. \quad (5.18)$$

Тоді струм трифазного к.з. в точці К-4:

$$I_к = \frac{I_б}{X_{*бТН(K-4)}}. \quad (5.19)$$

3. При розрахунку струмів к.з. на шинах власних потреб необхідно враховувати наступні особливості.

- Розрахунок струмів к.з. на шинах власних потреб в точці К-5 (рис. 3.4)

виконується в іменованих одиницях з урахуванням активних і індуктивних опорів кола.

- Знаходячи опори обмоток трансформатора власних потреб, треба мати на увазі, що при потужностях до 100 кВА включаючи напругу к.з. ($U_K\%$) характеризує повний опір трансформатора. Тому спочатку знаходять активний опір у мОм:

$$r_{ТВП} = \frac{P_K}{S_{ТВП}} \cdot \frac{U_{осн}^2}{S_{ТВП}}, \quad (5.20)$$

де P_K – втрати короткого замикання ТВП, кВт;

$U_{осн}$ – напруга основної ступені, В;

$S_{ТВПном}$ – номінальна потужність ТВП, кВА.

Індуктивний опір в мОм:

$$X_{ТВП} = \sqrt{\left(\frac{U_K\%}{100}\right)^2 - \left(\frac{P_K}{S_{ТВПном}}\right)^2} \cdot \frac{U_{осн}^2}{S_{ТСНном}}. \quad (5.21)$$

Опір інших елементів кола, таких, як рубильник, автомат, трансформатор струму, кабельна вставка і шини, орієнтовно можна оцінити по даним довідників.

Результуючі опори кола к.з.: активний $R_{рез}$, $X_{рез}$ і повний:

$$Z_{рез} = \sqrt{R_{рез}^2 + X_{рез}^2}. \quad (5.22)$$

Періодична складова струму КЗ (діюче значення):

$$I_K = \frac{U_{сп}}{\sqrt{3} Z_{рез}}. \quad (5.23)$$

Ударний струм:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_K. \quad (5.24)$$

Ударний коефіцієнт k_y орієнтовно можна приймати 1,3. Тоді:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot I_K = 1,84 I_K. \quad (5.25)$$

Або треба знаходити ударний коефіцієнт знайшовши заздалегідь при значеннях $R_{рез}$, $X_{рез}$ кола:

$$T_a = \frac{X_{рез}}{\omega R_{рез}}, \quad (5.26)$$

$$k_{уд} = \frac{\Phi_{II}}{I_a}. \quad (5.27)$$

4. Розрахунок струму к.з. на шинах РП-27,5 кВ виконується для двофазного к.з. по відомим співвідношенням до трьохфазних к.з.:

$$\frac{I_{\infty}^3}{I_{\infty}^3} = \frac{I_{\infty}^2}{I_{\infty}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1. \quad (5.28)$$

Якщо становиться задача розрахунку струму к.з. на фідерах 27,5 кВ, то результуючий опір кола к.з. знаходиться так:

$$X_{*бс} + X_{*бпт} + X_{*бк}, \quad (5.29)$$

де $X_{*бс}$ – опір електричної системи, в. о.;

$X_{*бпт}$ – опір понижуючого трансформатора, в. о.

5. Розрахунок максимального струму к.з. на шинах випрямленої напруги в точці К-3 (рис. 3.4, для вибору швидкодіючого вимикача) виконується по формулі:

$$I_k = \frac{I_{дном} n}{\frac{U_k \%}{100} \sum S_{ном.т} + S_k}, \quad (5.30)$$

де $I_{дном}$ – номінальний струм випрямляча, кА;

n – кількість одночасно працюючих випрямлячів;

$U_k \%$ – напруга к.з. тягового трансформатора, %;

$S_{ном.т}$ – сумарна номінальна потужність робочих тягових трансформаторів, кВА;

S_k – потужність к.з. на шинах, від яких живиться перетворювальний агрегат, кВА.

Для обчислення теплового імпульсу B_k відповідно до розрахункових точок к.з. необхідно на розрахунковій схемі вказати уставки захисту за часом в послідовних колах від найбільш віддаленого споживача у бік джерела живлення.

Розрахунок струмів к.з. рекомендується виконувати по таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Точка КЗ	Струми і потужності КЗ при Sб=100 МВА				
	$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}$	$I_K = \frac{I_6}{X_{*pe}}$	$I_K = I_\infty$	$i_y = 25\% I_K$	$R_k^2 + X_k^2$
	кА	кА	кА	кА	кА ² с

6. ОБЧИСЛЕННЯ МАКСИМАЛЬНИХ РОБОЧИХ СТРУМІВ

Всі апарати та струмоведучі частини тягової підстанції вибираються за умовами їх тривалої роботи при нормальному режимі і перевіряються за режимом к.з.

Вибір апаратів полягає в порівнянні робочої напруги і максимального робочого струму кола, де передбачається встановити даний апарат, з номінальною напругою та номінальним струмом вибраного апарату. Перерізи струмоведучих частин підстанції повинні вибиратися з урахуванням переважувальних здібностей апаратів, які з'єднують струмоведучі частини. При виборі перерізу живлячих ліній не тягових споживачів вслід враховувати переважувальні властивості трансформаторів, встановлених у споживачів, на 40% протягом 6 годин.

Нижче наводяться формули для обчислення максимальних робочих струмів по приєднаннях і на шинах.

1. Шини опорної або транзитної підстанції з первинною напругою 110 або 220 кВ:

$$I_{роб} = \frac{k_{pn} S_{шв}}{\sqrt{3} U_{номвн}}, \quad (6.1)$$

де $S_{шв}$ – максимальна потужність на шинах вищої напруги тягової підстанції, кВА;

$U_{номвн}$ – номінальна напруга на шинах вищої напруги тягової підстанції, кВ;

k_{pn} – коефіцієнт розподілу навантаження на шинах вищої напруги, (приймається 0,6–0,8); при цьому великі значення відносяться до меншого числа трансформаторів тих, що працюють (один трансформатор) і невеликому числу приєднань до шин, а менші значення – двом трансформаторам і більшому числу приєднань.

2. Введення опорної або проміжної транзитної підстанції з первинною напругою 35, 110 або 220 кВ:

$$I_{рвб\alpha x} = \frac{k_{np} S_{нопт}}{\sqrt{3} U_{нопт}}, \quad (6.2)$$

де k_{np} – коефіцієнт перспективи розвитку підстанції і споживачів, (приймається 1,3).

3. Введення кінцевих або відгалужуючих підстанцій 110 або 220 кВ:

$$I_{рвб\alpha x} = \frac{k_{пер} S_{номпт}}{\sqrt{3} U_{номпт}}, \quad (6.3)$$

де $S_{номпт}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА;

$k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження трансформатора, (приймається 1,4).

4. Сторона високої напруги триобмоткового понижуючого трансформатора тягової підстанції з первинною напругою 110 або 220 кВ:

$$I_{рвб\alpha x} = \frac{k_{пер} S_{номвн}}{\sqrt{3} U_{номвн}}, \quad (6.4)$$

де $U_{номвн}$ – номінальне значення вищої напруги обмотки трансформатора, кВ;

$k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження трансформатора, рівний 1,4.

5. Сторона середньої напруги триобмоткового понижуючого трансформатора:

$$I_{рвб\alpha x} = \frac{k_{пер} S_{номсн}}{\sqrt{3} U_{номсн}}, \quad (6.5)$$

де $U_{номсн}$ – номінальне значення середньої напруги обмотки трансформатора, кВ.

6. Сторона низької напруги триобмоткового понижуючого трансформатора:

$$I_{рвб\alpha x} = \frac{k_{пер} S_{номн}}{\sqrt{3} U_{номн}}, \quad (6.6)$$

де $U_{номн}$ – номінальна значення низької напруги обмотки трансформатора, кВ.

7. Збірні шини напругою $U_{номн} = 10$ (27,5) кВ триобмоткового понижуючого трансформатора:

$$I_{рвб\alpha x} = \frac{k_{рн} S_{номн}}{\sqrt{3} U_{номн}}, \quad (6.7)$$

де $k_{рн}$ – коефіцієнт розподілу навантаження на шинах вторинної напруги, (приймається 0,5...0,7); при цьому великі значення відносяться до

меншого числа трансформаторів тих, що працюють (один трансформатор) і невеликому числу приєднань до шин, а менші значення – двом трансформаторам і більшому числу приєднань, (п'ять та й більше).

8. Збірні шини напругою $U_{ном.сн} = 35$ кВ триобмоткового понижуючого трансформатора:

$$I_{роб.мах} = \frac{k_{рн} \sum S_{ном.пт}}{\sqrt{3} U_{ном.сн}}. \quad (6.8)$$

9. Сторона високої напруги $U_{ном.вн} = 35$ кВ двообмоткового трансформатора (РТ) для живлення не тягових споживачів:

$$I_{роб.мах} = \frac{k_{пер} \sum S_{ном.рт}}{\sqrt{3} U_{ном.вн}}, \quad (6.9)$$

де $S_{ном.рт}$ – номінальна потужність районного трансформатора РТ-35/10 кВА;

$U_{ном.вн}$ – номінальне значення вищої напруги обмотки районного трансформатора, кВ;

$k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження трансформатора, рівний 1,4.

10. Сторона низької напруги двообмоткового трансформатора (РТ) для живлення не тягових споживачів:

$$I_{роб.мах} = \frac{k_{рн} k_{пер} \sum S_{ном.рт}}{\sqrt{3} U_{ном.нн}}. \quad (6.10)$$

11. Живляча лінія (фідер) районного споживача напругою 10, 35, 110 кВ (без урахування конкретної вибраної потужності трансформатора споживача):

$$I_{роб.мах} = \frac{k_{пер} S_{мах}}{\sqrt{3} U_{ном}}, \quad (6.11)$$

де $k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження лінії, котрий приймається таким же, як і для трансформатора приєданого до лінії у споживача, тобто 1,4;

$S_{мах}$ – повна потужність споживача, яка відповідає активній потужності при $\cos \varphi$, який вказаний у завданні, кВА;

$U_{ном}$ – номінальна напруга на шинах від яких живиться районний споживач, кВ.

Якщо по розрахунковому значенню $S_{мах}$ районного споживача вибраний

трансформатор, який відповідає потужності $S_{Tном}$, то формула (6.12) приймає вигляд:

$$I_{роб.т} = \frac{k_n S_{Tном}}{\sqrt{3} U_{ном.1}}, \quad (6.12)$$

де $U_{ном.1}$ – номінальна напруга мережевої обмотки трансформатора, кВ;

$S_{ном.т}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА.

12. Мережива обмотка трансформатора власних потреб (ТВП):

$$I_{роб.т} = \frac{k_n S_{номТВП}}{\sqrt{3} U_{ном.1}}, \quad (6.13)$$

де $S_{номТВП}$ – номінальна потужність трансформатора власних потреб, кВА;

$U_{ном.1}$ – номінальна напруга мережевої обмотки трансформатора, кВ.

13. Сторона низької напруги трансформатора власних потреб:

$$I_{роб.т} = \frac{k_n S_{ном.т}}{\sqrt{3} U_{ном.2}}, \quad (6.14)$$

де $U_{ном.2}$ – номінальне значення напруги низької сторони ТВП, кВА.

14. Силова обмотка перетворювального трансформатора для мостової схеми випрямлення:

$$I_{роб.тmax} = \frac{S_{ном.т1}}{\sqrt{3} U_{ном.1}}, \quad (6.15)$$

де $S_{ном.т1}$ – номінальна потужність перетворювального трансформатора, кВА;

$U_{ном.1}$ – номінальна напруга мережевої обмотки перетворювального трансформатора, кВ.

15. Вентильна обмотка перетворювального трансформатора, мостова схема випрямлення:

$$I_{роб.т} = I_{дном} \sqrt{N}, \quad (6.16)$$

де $I_{дном}$ – номінальний випрямлений струм, А.

16. Робоча шина «+», «-» 3,3 кВ:

$$I_{роб.т} = I_{дном} N, \quad (6.17)$$

де N – число перетворювальних агрегатів.

Максимально робочий струм запасної шини 3,3 кВ приймають рівним найбільшому струму фідера. Можна прийняти 2000 А.

Максимальні робочі струми рекомендується звести у таблицю 6.1 по наступній формі:

Таблиця 6.1

№ п/п	Найменування приєднань і збірних шин	Розрахункова формула та числова підстановка	Максимальний робочий струм, А
1	Введення на ТП (110-220 кВ)		
2	Збірні шини (робоча та ремонтна перемичка) 110-220 кВ		
3	Сторона ВН ПТ		
4	Сторона СН ПТ		
5	Сторона НН ПТ		
6	Мережива сторона перетворювального трансформатора Т1		
7	Вторинна сторона Т1		
8	Робоча шина +3,3 кВ (або 27,5кВ)		
9	Мінусова шина -3,3 кВ		
10	Запасна шина 3,3 кВ або 27,5 кВ		
11	Сторона ВН ТВП		
12	Сторона НН ТВП		
13	Сторона ВН РТ-35/10 кВ		
14	Сторона НН РТ-35/10 кВ		
15	Збірні шини сторони НН РТ-35/10 кВ		
16	Збірні шини СН ГПТ		
17	Збірні шини НН ГПТ		
18	Споживач №1, 10 кВ		
19	Споживач №2, 10 кВ		
20	Споживач №1, 35 кВ		
21	Споживач №2, 35 кВ		

7. ВИБІР СТРУМОВЕДУЧИХ ЧАСТИН І ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ

Приступаючи до виконання цієї частини проекту, треба вирішити питання про тип РП тягової підстанції: відкрите (ВРП), закриті комплектного типу (КРП), модульного типу зовнішньої установки і т. п. Відомості про застосованих на сучасних підстанціях РП можна взяти з довідників або з літератури [3]. У курсовому проекті розраховуються та вибираються приведені нижче елементи. Вибір звести у таблиці по нижче приведених формах, але для кожного елемента привести один приклад розрахунку та вибору.

7.1. Шини РП

7.1.1. Шини ВРП

Шини відкритих РП виконуються гнучкими проводами АС, АСУ, АСО (перерізом не менше 35 мм²):

$$I_{доп}, \quad (7.1)$$

де $I_{доп}$ – тривало-допустимий струм для шини даного перерізу і матеріалу А; береться із довідників;

$I_{робта}$ – максимальний тривалий струм навантаження, А.

Вибрані шини перевіряються на термічну стійкість впливу струму к.з., знаходиться мінімальне термічно стійкий переріз, мм²,

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}, \quad (7.2)$$

де B_k – тепловий імпульс к.з. , кА³с розраховується по формулі:

$$B_k = I_k^2 t_{відкл} \quad (7.3)$$

де T_a – постійна часу відключення кола для тягових підстанцій, (приймається 0,05 с);

$t_{відкл}$ – час відключення вимикача, с;

C – коефіцієнт, який при найбільш допустимих температурах дорівнює для мідних шин і кабелів до 10 кВ включно 165, для алюмінієвих шин – 90 і для сталевих – 60.

Величини I_k беруться з розрахунку струмів к.з. (табл. 5.1).

Термічна стійкість забезпечена, якщо виконане співвідношення

$$q \geq q_{min}, \quad (7.4)$$

де q – переріз шини в мм², вибраної по довіднику.

Відповідно ПУЕ, при напрузі 35 кВ і вище провідники повинні бути перевірені за умовами утворення корони:

$$U_{ном} > U_{кор}, \quad (7.5)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга провідника, кВ;

$U_{кор}$ – напруга, при якій утворюється корона, кВ розраховується по формулі:

$$U_{кор} = m_o m_n \delta \sqrt{\frac{3 \cdot 10^6}{q}} \quad (7.6)$$

де m_o – коефіцієнт дротяних проводів. Для багато дротяних проводів;

m_n – коефіцієнт погодних умов . При дощі $m_n = 0,8$;

δ – коефіцієнт атмосферного тиску та температури повітря. Для нормальних умов $\delta = 1$;

r_{np} – радіус проводу, мм;

D_{cp} – середнє відстань між проводами трьохфазної системи, мм:

$$D_{cp} = 12\delta, \quad (7.7)$$

де D – відстань між проводами, мм. Для напруги 35 кВ $D = 1600$ мм, для 110 кВ $D = 2500$ мм, для 220 кВ $D = 4000$ мм.

7.1.2. Шини ЗРП

Шини закритих РП виконуються жорсткими із алюмінію, прямокутного перерізу. Умова вибору приймається за формулою (7.1). Матеріал та переріз шин визначається по довіднику. Перевірка виконується не тільки на термічну стійкість за умовами (7.4), але й на електродинамічну стійкість за умовами:

$$\sigma_{розрах}, \quad (7.8)$$

де $\sigma_{доп}$ – допустима напруга для матеріалу шин, МПа; для алюмінієвих шин $\sigma_{доп} = 65$ МПа; для АДО – $\sigma_{доп} = 40$ МПа; для АДЗ1Т – $\sigma_{доп} = 75$ МПа; для АДЗ1И – $\sigma_{доп} = 90$ МПа.

$\sigma_{розрах}$ – розрахункова механічна напруга в матеріалі шини, МПа:

$$\sigma_{розрах} = \frac{M}{W10^{-6}}, \quad (7.9)$$

де M – згинаючий момент (в Нм), який залежить від сили F (в Н), що діє на шину при к.з., і моменту опору W (в м³), який залежить від перерізу і способу прокладення шини.

Згинаючий момент дорівнює:

$$M = \frac{Fl}{10}. \quad (7.10)$$

А сила, що діє на шину при к.з. дорівнює:

$$F = f \cdot l, \quad (7.11)$$

де f – сила, що діє на кожний з двох паралельних проводників, в Н/м визначається за формулою:

$$f = \frac{\sqrt{3}i_y^2}{10a}, \quad (7.12)$$

де i_y – ударний струм, кА, береться з розрахунку струмів к.з. (табл. 5.1);
 a – відстань між осями шин, м.

7.1.3. Кабелі РП

Вибір кабелю виконується по конструкції в залежності від умов прокладення (на повітрі, в землі або у воді), від величини робочої напруги $U_{роб}$ та найбільшого робочого струму $I_{робта}$: відповідно умовам:

$$\begin{aligned} U_{ном} &\geq U_{рс}, \\ I_{доп} &\geq I_{роб}, \end{aligned} \quad (7.13)$$

де $U_{ном}$, $I_{доп}$ – номінальна напруга, кВ і допустимий струм кабелю, кА, береться із довідників.

Вибраний кабель перевіряють тільки на термічну стійкість за умовами (7.4).

Вибір струмоведучих частин рекомендується виконувати згідно табл. 7.1.

Таблиця 7.1

№ п/п	Найменування приєднань і збірних шин	Максимальний робочий струм, А	Матеріал і переріз токоведучих частин	Допустимий струмотоковедучих частин, А	Тип ізолятора
1	2		3	4	5

7.2. Ізолятори

Опорні ізолятори вибирають за умовами:

$$\begin{aligned} U_{ном} &\geq U_{рс}, \\ F &\leq 0,6F_{руйн}, \end{aligned} \quad (7.14)$$

де F – зусилля на ізолятор, яке визначається за формулою (7.11), Н;

$F_{руйн}$ – руйнівна сила при згині ізолятора, Н, знаходиться із паспортних даних.

Для прохідних ізоляторів необхідно, щоб виконувались умови:

$$U_{ном} \geq U_{рс}, U_{ном} \geq U_{роб} \text{ и } F \leq 0,6F_{руйн}. \quad (7.15)$$

Зусилля на ізолятор визначають, в Н, за формулою:

$$F = 0,8 \frac{U^2}{a} \quad (7.16)$$

7.3. Високовольтні вимикачі змінного струму

Вимикачі вибираються за родом установлення, номінальній напрузі та струмом:

$$\begin{aligned} U_{ном} &\geq U_{рс}, \\ I_{ном} &\geq I_{роб}, \end{aligned} \quad (7.17)$$

де $U_{ном}$ і $I_{ном}$ – номінальні напруга, кВ і струм вимикача, А, беруться із паспортних даних;

$U_{роб}$ і $I_{робта}$ – напруга в кВ і максимальний струм в А кола, де встановлюється вимикач. Виконання умов (7.17) гарантує роботу вимикача у нормальному режимі.

Надійна робота вимикача при к.з. забезпечується перевіркою на електродинамічну і термічну стійкість, за номінальним струмом відключення.

Перевірка на динамічну стійкість:

$$i_{\partial} \geq i_y, \quad (7.18)$$

де i_{∂} – амплітудне значення струму динамічної стійкості вимикача за паспортом, кА;

i_y – розрахункове значення ударного струму, кА.

Перевірка на термічну стійкість:

$$I_T^2 t_T \geq B_k, \quad (7.19)$$

де B_k – тепловий імпульс струму к.з., який проходить через вимикач, $кА^2с$;

I_T і t_T – струм і час термічної стійкості за паспортом, відповідно в кА і с;

Перевірку вимикача на термічну стійкість з умов (7.19) допускається виконувати за тепловим імпульсом для часу термічної стійкості вимикача по паспорту t_T , тобто $B_k = I_{кТ}^2 t_T$, хоча це приводить до підвищеного теплового імпульсу, так як у більшості випадків $t_T \geq t_{відк}$.

Перевірка за номінальним струмом відключення:

$$I_{номвідк} \geq I, \quad (7.20)$$

де $I_{номвідк}$ – номінальний струм відключення за паспортом, який вимикає вимикач, А.

Результати вибору вимикачів звести у таблицю 7.2.

Таблиця 7.2

№ п/п	Найменування приєднань	Тип вимикача	Співвідношення паспортних даних і розрахункових параметрів				
			$\frac{U_{ном}}{U_{роб}}$ кВ	$\frac{I_{ном}}{I_{робтах}}$ А	$\frac{i_{дин}}{i_y}$ кА	$\frac{I_{ном} t_{тк}}{I_k}$ кА	$\frac{I_T^2 t_T}{B_k}$ кА ² с
1	2	3	4	5	6	7	8

7.4. Швидкодіючі автоматичні вимикачі постійного струму 3,3 кВ

Вимикачі вибираються по номінальній напрузі, струму і перевіряються на властивість відключення:

$$I_{відк} \geq I_k \quad (7.21)$$

де $I_{відк}$ найбільше значення струму відключення, кА, по довідниковим даним, або з літератури [10];

I_k – струм к.з., кА, за виразом (5.30).

7.5. Роз'єднувачі. Віддільники. Короткозамикачі

Ці електричні апарати вибирають та перевіряють так, як і високовольтні вимикачі змінного струму з тією різницею, що віддільники і роз'єднувачі не перевіряють на властивість відключення, а короткозамикачі не вибирають по струму навантаження.

Результати вибору звести у таблицю 7.3.

Таблиця 7.3

№ п/п	Найменування приєднань	Тип роз'єднувача	Співвідношення паспортних даних і розрахункових параметрів			
			$\frac{U_{ном}}{U_{роб}}$ кВ	$\frac{I_{ном}}{I_{робтах}}$ А	$\frac{i_{дин}}{i_y}$ кА	$\frac{I_T^2 t_T}{B_k}$ кА ² с
1	2	3	4	5	6	7

7.6. Вимірювальні трансформатори

7.6.1. Трансформатори струму

Трансформатори струму вибираються за родом установлення, за робочою напругою та робочому струму за умовами:

$$U_{ном} \geq U_{рс} \text{ і } I_{ном} \geq I_{роб}, \quad (7.22)$$

де $U_{ном}$ і $I_{ном}$ номінальні напруга (кВ) і струм (А) первинної обмотки трансформатора, кВ;

$U_{роб}$ і $I_{робта}$: напруга (кВ) і робочий струм (кА) в колі, де встановлений трансформатор струму.

Вибраний трансформатор необхідно перевірити на електродинамічну і термічну стійкість при к.з. за умовами:

$$i_{\partial} \geq i_y \text{ і } I_{тт}^2 \geq B_k. \quad (7.23)$$

А також за класом точності:

$$S_{2ном} \geq S_{2прс}, \quad (7.24)$$

де $S_{2ном}$ – номінальна потужність вторинної обмотки трансформатора за паспортом, ВА;

$S_{2прс}$ – потужність, споживана приборами вимірювання та захисту, ВА.

На прикладі, у курсовому проекті для визначення $S_{2прс}$, треба скласти трилінійну схему підключення електронного лічильника електричної енергії до трансформаторів струмів введення 10 кВ або 27,5 кВ від понижуючого трансформатора. Згідно ПУЕ приєднання струмових обмоток лічильників до вторинної обмотки трансформаторів струму слід проводити, як правило, окремо від кола захисту. Клас точності трансформаторів струму для приєднання розрахункових лічильників електроенергії повинен бути не більше 0,5. Проводять для найбільш завантаженої фази:

$$S_{прс} \geq S_{прл} \text{ і } I_2 \geq I_{нл}, \quad (7.25)$$

де $S_{прс}$ – потужність, споживана струмовими обмотками лічильника, що підключається до вторинної обмотки ТА, ВА;

I_2 – номінальний струм вторинної обмотки ТА, дорівнює 5 А;

r_{np} – опір з'єднувальних проводів, так як $r_{np} = \frac{\rho_{розл} l}{q}$, то можна знайти

мінімальний переріз проводів, при цьому потрібно враховувати, що розрахункова довжина з'єднувальних проводів залежить від схеми з'єднання ТА з приборами: при неповній зірці $l_{розр} \sqrt{3}$, при повній зірці $l_{розр} \sqrt{3}$;

l – довжина проводів, м;

ρ – питомий опір матеріалу з'єднувальних проводів, Ом/м. Для міді

$\rho_{Cu} = 0,0175$, для алюмінію $\rho_{Al} = 0,0283$;

r_k – перехідний опір контактів, орієнтовно можливо прийняти рівним 0,1 Ом.

7.6.2. Трансформатори напруги

Трансформатори напруги вибираються за родом установлення та за робочою напругою за умовами:

$$U_{ном} \geq U_{рс}, \quad (7.26)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга первинної обмотки трансформатора за паспортом, кВ;

$U_{роб}$ – робоча напруга на шинах розподільчого пристрою, до якого підключають ТУ, кВ.

Вибраний трансформатор напруги перевіряють на відповідність класу точності:

$$S_{2ном} \geq S_{розрс}, \quad (7.27)$$

де $S_{2ном}$ – номінальна потужність вторинної обмотки трансформатора у відповідному класі точності, ВА;

$S_{розрс}$ – потужність, споживана приборами вимірювання та реле, які підключені до вторинної обмотки трансформатора, ВА.

На прикладі, у курсовому проєкті $S_{розрс}$ знаходиться відповідно три-лінійної схеми підключення приборів до трансформаторів напруги РП-27,5 кВ або РП-10 кВ і для найбільш завантаженої фази.

Результати вибору трансформаторів струму і трансформаторів напруги звести у таблиці 7.5 і 7.6 по нижче приведених формах.

Таблиця 7.4

№ п/п	Найменування приєднань	Тип трансформатора струму	Співвідношення паспортних даних і розрахункових параметрів				Номінальна потужність розрахункового ТА у класі 0,5 ВА
			$\frac{U_{ном}}{U_{роб}}$ кВ	$\frac{I_{ном}}{I_{робmax}}$ А	$\frac{i_{дин}}{i_y}$ кА	$\frac{I_T^2 t_T}{B_k}$ кА ² с	
1	2	3	4	5	6	7	8

Таблиця 7.5

№ п/п	Найменування приєднань	Тип трансформатора струму	$U_{ном}$ обмотки, В			Номінальна потужність розрахункового ТВ у класі 0,5 ВА	Кількість ТВ
			первинної	вторинної			
				основної	додавної		
1	2	3	4	5	6	7	8

8. ВИБІР АПАРАТУРИ ТА СХЕМ ЖИВЛЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ПІДСТАНЦІЇ

Необхідно дати короткий опис схеми живлення власних потреб змінного струму, вказавши потужність і число встановлених на тяговій підстанції ТВП, а також, до якого РП проводиться підключення обмотки високої напруги. При описі схеми розподілення електроенергії напругою 380/220 В коротко перераховуються розподільчі шафи і споживачі змінного струму.

Для живлення проводів вимикачів, пристроїв захисту, сигналізації та телемеханіки на тяговій підстанції, що проектується часто застосовують постійний оперативний струм. Його джерелом являється акумуляторна батарея, яка працює у режимі підзаряду. У теперішній час встановлюють акумуляторні батареї необслугованого типу QPzS, LS та інші.

8.1. Вибір акумуляторної батареї

Короткочасне навантаження, як правило, являється визначаючим для вибору акумуляторної батареї. Початковою величиною при виборі батареї являється ємність. Нижче приводиться порядок вибору батареї при режимі роботи «постійний підзаряд».

Визначається струм тривалого розряду в аварійному режимі

$$I_{\text{прод}} = I_{\text{пост}} + I_{\text{ав}}, \quad (8.1)$$

де $I_{\text{пост}}$ – струм постійного тривалого навантаження, А;

$I_{\text{ав}}$ – струм аварійного навантаження, А.

Розрахунковий струм короткочасного розряду

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{прод}} \cdot I_{\text{кр0}}, \quad (8.2)$$

де $I_{\text{вкл}}$ – струм, який споживається найбільш потужним приводом при включенні одного (для опорної підстанції двох-трьох), А;

Значення струмів $I_{\text{ав}}$, $I_{\text{пост}}$ і $I_{\text{вкл}}$ приймаються з урахуванням додаткових даних таблиці 2.5.

Розрахункова ємність батареї

$$Q_{\text{бат}} = I_{\text{кр}} \cdot t_{\text{ав}}, \quad (8.3)$$

де $t_{\text{ав}}$ – тривалість розряду при аварії, для тягових підстанцій приймається рівним 2 години.

При виборі сучасних свинцево-кислотних герметичних не обслуговуваних акумуляторних батарей типів OPzS або LS за формулами (8.2) та (8.3) та паспортних даних підбирають батарею.

При виборі свинцево-кислотної герметичної обслуговуваної акумуляторної батареї типу СК знаходять номер батареї по розрахунковій ємності, яка відповідає струму аварійного режиму:

$$N_{\text{бат}} = \frac{1,1 \cdot Q_{\text{бат}}}{Q_{N=1}}, \quad (8.4)$$

де 1,1 – коефіцієнт, враховуючий зменшення ємності батареї після декількох років експлуатації;

$Q_{N=1}$ – ємність одиничного акумулятора (при $t_{\text{ад}}=2$ год, $Q_{N=1}=22$ А·год).

Розраховують номер акумуляторної батареї по струму короткочасного розряду вибирають згідно умов

$$I_{\text{кр0}} \leq 46, \quad N_{\text{кр}} \geq \frac{I_{\text{кр}}}{46}, \quad (8.5)$$

де 46N – короткочасний допустимий струм розряду акумулятора СК – 1, який не викликає його руйнування і дорівнює 46 А.

Дробове значення номеру батареї округляють у більшу сторону. Остаточню приймають найбільший струм із двох значень номер, отриманий по формулам (8.4) та (8.5).

Число послідовно включених елементів батареї, живлячих шини включення (ШВ) напругою $U_{шв}=245$ В у режимі підзаряду:

$$n_{шв} = \frac{U_{шв}}{U_{нід}} \quad (8.6)$$

Число елементів, живлячих шини управління (ШУ) напругою $U_{шУ}=230$ В у режимі постійного підзаряду:

$$n_{шУ} = \frac{U_{шУ}}{U_{нід}}, \quad (8.7)$$

де $U_{нід}$ – середня напруга елемента у режимі постійного підзаряду. Номінальна напруга елемента акумулятора типу СК дорівнює 2,15 В, типу OPzS або LS – 2,25 В.

8.2. Вибір зарядно-підзарядного пристрою (ЗПП)

Потужність ЗПП – напівпровідникового випрямляча вибирають, виходячи із першого формульованого заряду батарей і одночасного живлення споживачів (приймають $I_{зар} = 5,25N$ для батареї СК-5 та $I_{зар} = 10 - 20A$ на кожні 100 А·год для батарей OPzS або LS)

Потужність ЗПП визначається за формулою:

$$P_{ЗПП} = U_{зар} \cdot I_{зар}, \quad (8.8)$$

де $U_{зар}$ - зарядна напруга, В, для батареї СК дорівнює:

$$U_{зар} = n_{шв} \cdot 2.15 + (2 - 3), \quad (8.9)$$

для батареї OPzS або LS дорівнює:

$$U_{зар} = n_{шв} \cdot 2.23 + (2 - 3) \quad \text{або} \quad U_{зар} = n_{шв} \cdot 2.23 + (2 - 3) \quad (8.10)$$

Номінальний струм ЗПП повинен задовільнити умові

$$I_{ЗПП} \geq I_{зар}, \quad (8.11)$$

9. СКЛАДАННЯ ВІДОМОСТІ ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ

Згідно однолінійної схеми скласти відомість основного обладнання.

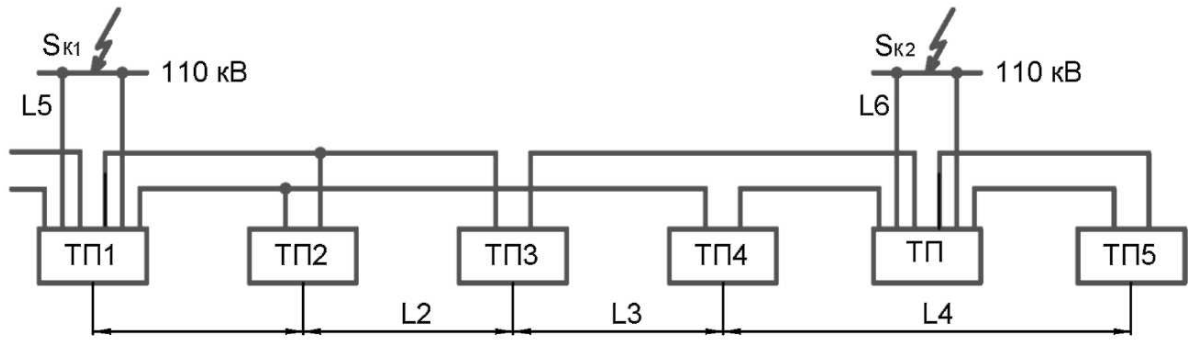
Поз.	Позначення	Найменування	К-сть	Примітка
1	2	3	4	5
1	ГОСТ 11677-85	Трансформатор понижуючий ТДТНЖ - 40000/110 81У1	2	

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. Електричні станції та підстанції. Частина 1. Технічні дані силового обладнання. : методичні вказівки до виконання курсового проектування. – Дніпро : Міністерство транспорту та зв'язку України, 2007. – 52 с.
3. Тягові підстанції електрифікованих залізниць : навч. посіб. / Т. І. Друбецька, А. М. Бойко. – Київ : ФОП Піча Ю.В., 2022. – 338 с.
4. Електрична частина станцій і підстанцій : навч. посібник / Є. І. Бардик, М. П. Лукаш – К : НТТУ «КПІ». 2011. – 220 с.
5. Камишинський О. М., Овчинников В. Є. Електричні станції та підстанції залізниць. – Харків : Корпорація «Техностандарт». 2008. – 304 с.
6. Тягові та трансформаторні підстанції : методичні вказівки до практичних занять / уклад. Т. І. Друбецька, Д., 2022. – 38 с.

ДОДАТОК А

а)



б)

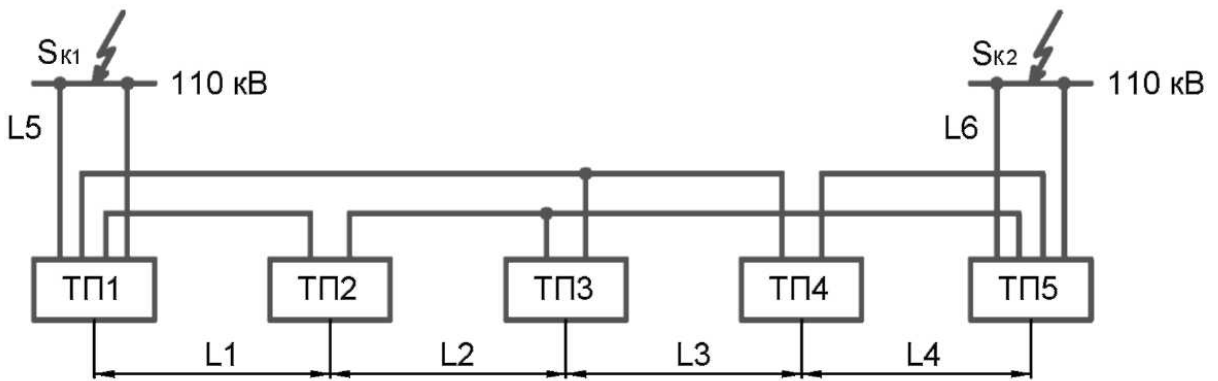
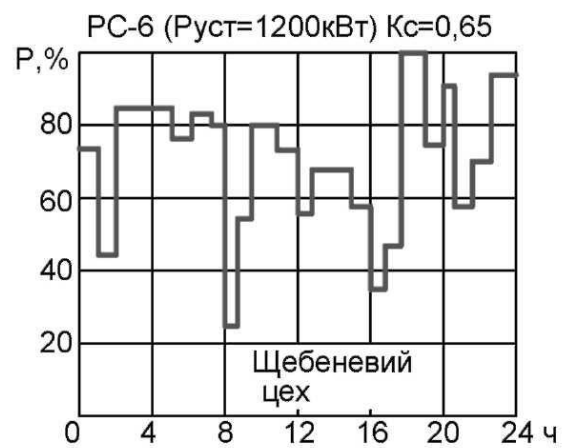
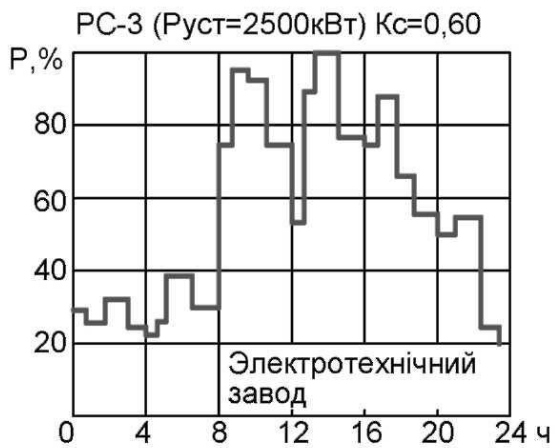
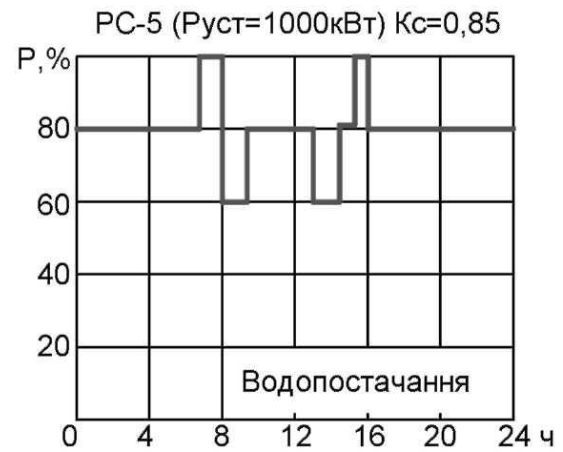
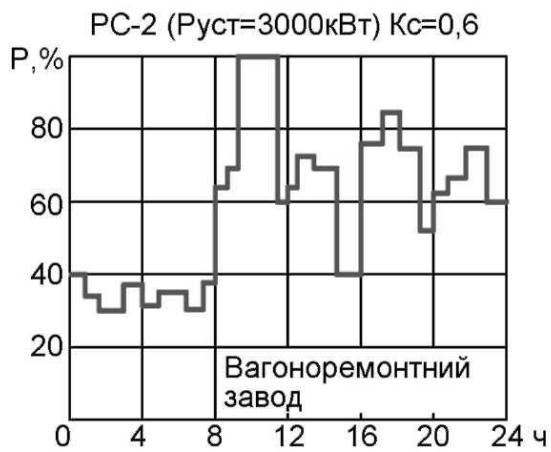
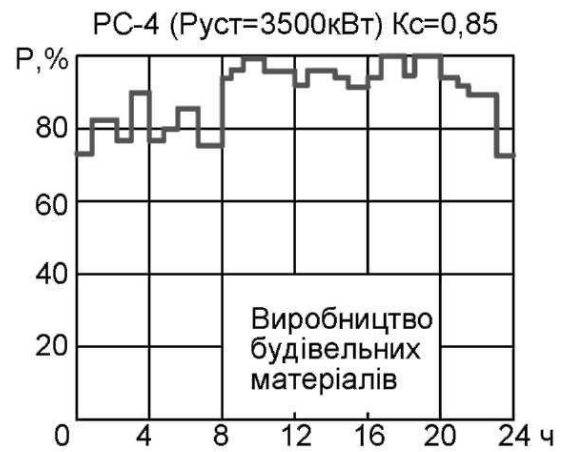
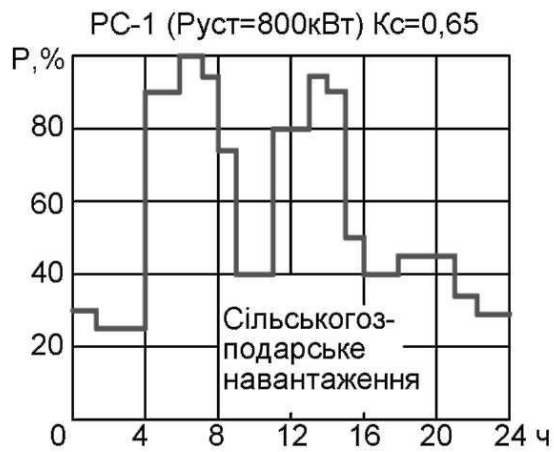
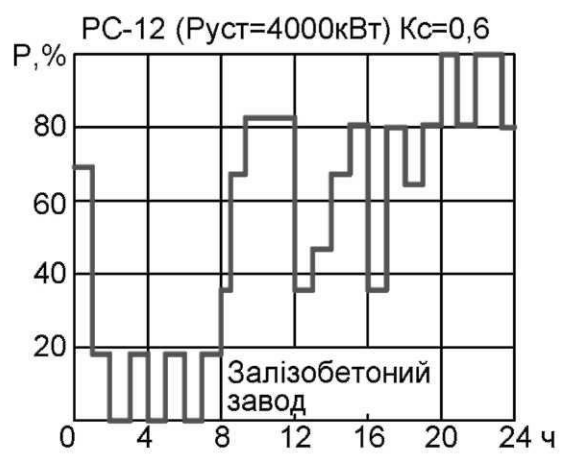
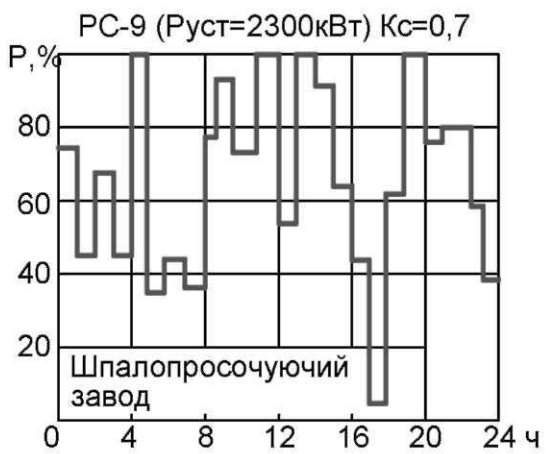
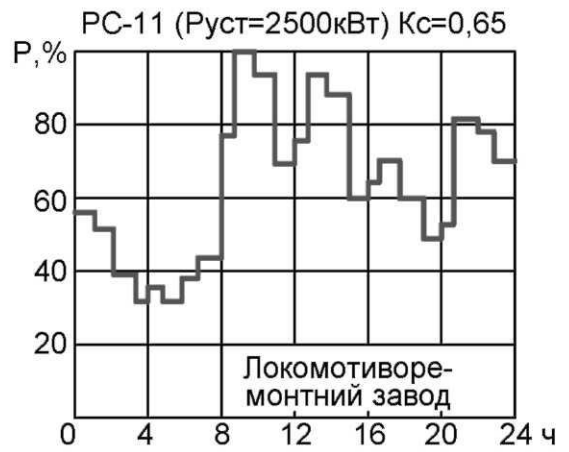
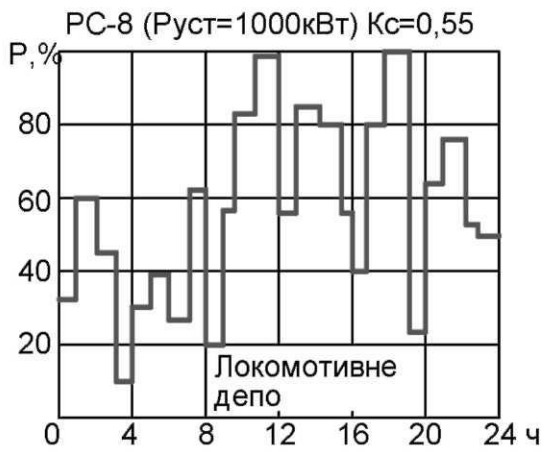
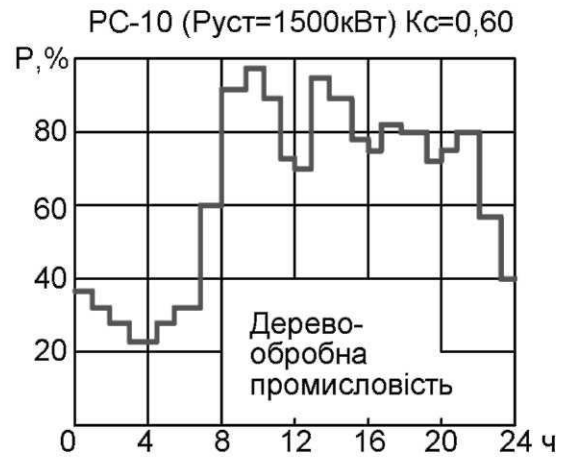
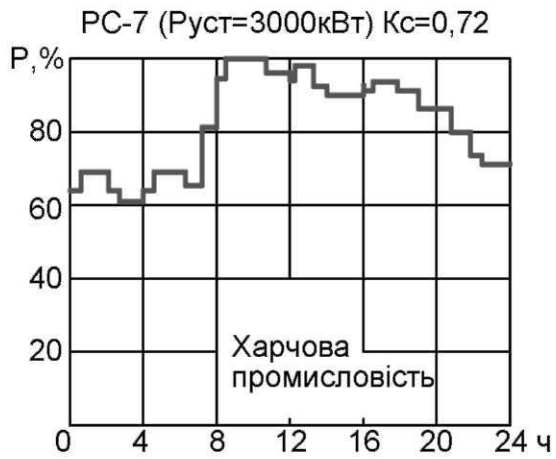


Рис. А.1. Схеми зовнішнього електропостачання тягових підстанцій:
а – постійного струму, б – змінного струму

ДОДАТОК Б



ДОБОВІ ГРАФІКИ НАВАНТАЖЕНЬ РАЙОННИХ СПОЖИВАЧІВ



ДОДАТОК В ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ

Приклад розрахунку струму к.з. в точці К-1

1. Викреслюємо розрахункову однолінійну схему живлення тягової підстанції з вихідними даними (рис. 3.1). При цьому нижче введів відображаємо понижуючі трансформатори і розподільчий пристрій, від якого живиться районне навантаження і ТВП (необхідно для послідуєчих розрахунків). В даному випадку від РП-10 кВ разом з районним навантаженням живляться електрична тяга, а також власні потреби.

2. По схемі складаємо схему заміщення (рис. 3.2). Вибираємо точки к.з.: К-1 на введеннях підстанції при ввімкненій робочій перемички; К-2 – на одній із секцій шин 10 кВ при ввімкненому секційному вимикачу Q2, а також на шинах 0,4/0,23 кВ за ТВП.

3. Вибираємо базисні умови $S_{\delta} = 100$ МВА, при к.з. в точці К-1 $U_{\delta} = U_{cp} = 115$ кВ.

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА.}$$

Для цих умов розраховуємо відносні опори елементів схеми заміщення. Оскільки для більшості елементів $R < 1/3X$, то враховуємо тільки індуктивні опори елементів.

$$x_{*\delta 1} = x_{*\delta c1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}I_{ном.відкл}U_{cp}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 18,4 \cdot 115} = 0,03;$$

$$x_{*\delta 2} = x_{*\delta 3} = x_{o1} \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 50 \frac{100}{115^2} = 0,15;$$

$$x_{\delta 4} = x_{\delta 5} = 0;$$

$$x_{\delta 6} = x_{\delta 7} = 0;$$

$$x_{\delta 8} = x_{\delta 9} = 0;$$

$$x_{\delta 10} = x_{\delta 11} = 0;$$

$$x_{\delta 12} = x_{\delta 13} = 0;$$

$$x_{*69} = x_{*67} = 0,06;$$



$$x_6 = 26 \Phi;$$



$$x_{*612} = x_{*c2} = \frac{S_6}{S_{c2}} = \frac{100}{5000} = 0,02.$$

4. Проводимо послідовні перетворення початкової схеми (рис. 3.2) в спрощену схему (рис. 3.3). Знаходимо опір елементів схеми:



$$x_{*615} = x_{*66} + x_{*67} + x_{*68} = 0,08 + 0,06 + 0,14 = 0,28;$$

$$x_{*616} = x_{*612} + x_{*610} / 2 = 0,02 + 0,3 / 2 = 0,17.$$

Перетворивши «трикутник» опорів x_{*614} , x_{*615} , x_{*69} в еквівалентну «зірку», отримаємо схему (рис. 3.3,б).

Тут

$$x_{*617} = \frac{x_{*614} \cdot x_{*615}}{x_{*69} + x_{*614} + x_{*615}} = \frac{0,22 \cdot 0,28}{0,06 + 0,22 + 0,28} = 0,11;$$

$$x_{*618} = \frac{x_{*69} \cdot x_{*615}}{x_{*69} + x_{*614} + x_{*615}} = \frac{0,06 \cdot 0,28}{0,06 + 0,22 + 0,28} = 0,03;$$

$$x_{*619} = \frac{x_{*69} \cdot x_{*614}}{x_{*69} + x_{*614} + x_{*615}} = \frac{0,06 \cdot 0,22}{0,06 + 0,22 + 0,28} = 0,02.$$

Склавши опори 13 і 17, а також 16 і 18, отримаємо трипроменеву зірку з опорами (рис. 3.3,в):



$$x_6 = 00.$$

Змінив трипроменеву зірку двопроменеву, отримуємо

$$x_{*б22} = x_{*б19} + x_{*б20} + \frac{x_{*б19} \cdot x_{*б20}}{x_{*б21}} = 0,02 + 0,22 + \frac{0,02 \cdot 0,22}{0,20} = 0,262;$$

$$x_{*б23} = x_{*б19} + x_{*б21} + \frac{x_{*б19} \cdot x_{*б21}}{x_{*б20}} = 0,02 + 0,20 + \frac{0,02 \cdot 0,20}{0,22} = 0,238.$$

Об'єднаємо два джерела в одне, так як джерела, працюють в однакових умовах, та знайдемо результуючий опір (рис. 3.3,д):

$$x_{*б.рез} = \frac{x_{*б22} \cdot x_{*б23}}{x_{*б22} + x_{*б23}} = \frac{0,262 \cdot 0,238}{0,262 + 0,238} = 0,12.$$

5. Початковий струм (діюче значення періодичної складової) трифазного к.з.:



Ударний струм:



Потужність к.з.:



Більше прикладів розрахунку к.з представлено в [5]

Навчально-методичне видання

ТЯГОВІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІ
Методичні рекомендації до курсового проєкту

Редактор В. С. Пасічна
Комп'ютерна верстка В. С. Пасічна

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 2,73. Обл.-вид. арк. 1,25.
Замовлення № 7.

Український державний університет науки і технологій
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010