

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____	<u>О. КОЛЛАРОВ</u>
(підпис)	(ініціали, прізвище)
«___» _____	2022 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Вибір комутаційних апаратів захисту для систем електропостачання
промислових підприємств

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕЛК-18

(шифр групи)

спеціальності підготовки

141 «Електроенергетика, електротехніка та

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

електромеханіка»

Ярослав СІЛЬЧЕНКО

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник зав. каф., к. т. н., доц., О. КОЛЛАРОВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

О. ЛЮБИМЕНКО

(підпис)

Засвідчую, що у цій випускній
кваліфікаційній роботі немає
запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

(дата)

(дата)

ЛУЦЬК – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ярославу СІЛЬЧЕНКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Вибір комутаційних апаратів захисту для систем електропостачання промислових підприємств

керівник роботи Олександр КОЛЛАРОВ, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 02 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Відносний опір системи $X_{*c} = 0,04$ при $S_6 = 80$ МВА; $U_1 = 110$ кВ; $U_2 = 10,5$ кВ; трансформатори потужністю 16 МВА кожен, $U_k = 10,5$ %; струм лінії, що відходить $I_{л} = 250$ А; кількість ліній на одній – 3. Відсутні параметри обрати із врахуванням вже наданих або вибрати довільно, дотримуючись обмежень, накладених вихідними даними.

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

1. Загальні питання вибору електричних апаратів та провідників.

2. Розрахунок струмів короткого замикання.

3. Розрахунок та вибір електричних апаратів для ділянки системи електропостачання.

4. Розробка заходів з охорони праці.

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

Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Розділ 4	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтроль	О. ЛЮБИМЕНКО, доц. каф.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	05.05.22 – 12.05.22	
2.	Розділ 2	13.05.22 – 23.05.22	
3.	Розділ 3	24.05.22 – 31.05.22	
4.	Розділ 4	01.06.22 – 02.06.22	
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Ярослав СІЛЬЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр КОЛЛАРОВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

СІЛЬЧЕНКО Я.П. Вибір комутаційних апаратів захисту для систем електропостачання промислових підприємств. / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2022.

У дипломній роботі розглянуто загальні питання вибору електричного устаткування та апаратів для системи електропостачання. Наведено принципи вибору комутаційного обладнання для різних режимів роботи.

Детально проаналізовано методику визначення струмів короткого замикання для підбору апаратів захисту системи постачання електричної енергії. Обґрунтовано порядок розрахунків струмів КЗ та формули для їх розрахунку. Також, наведено порядок виконання дій для визначення схеми заміщення, що використовується для розрахунку КЗ в визначених точках електричної мережі.

Проведено вибір та розрахунок електричних апаратів для ділянки електричної мережі з комутаційними апаратами та устаткуванням за допомогою визначення струмів КЗ та ударних струмів системи. Також, розраховані вимикачі та роз'єднувачі для системи постачання, обрано трансформатори струму та напруги. Особливу увагу приділено вибору з'єднання силового трансформатора із КРУ та матеріалу і схемі виконання токоведучої шини.

Додатково наведені дані трансформатора струму та таблиця зі значеннями постійного часу згасання аперіодичної складової струму.

Ключові слова: комутаційний апарат, шина, реактор, генератор, джерело живлення, схема заміщення.

Список публікацій:

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ПРОВІДНИКІВ.....	9
1.1 Принципи вибору комутаційного обладнання для електросистеми.....	9
1.2 Розрахункові умови для вибору провідників та апаратів за тривалими режимами роботи	10
1.3 Розрахункові умови для перевірки апаратури та струмовідних частин за режимом короткого замикання.....	17
2. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ	21
2.1 Призначення розрахунків струмів короткого замикання.....	21
2.2 Вимоги та припущення до розрахунків СКЗ.....	22
2.3 Порядок розрахунку струмів при симетричному короткому замиканні.....	24
2.4 Подання параметрів елементів схем заміщення у відносних одиницях	25
2.5 Розрахунок трифазного СКЗ	27
2.6 Розрахунок СКЗ у довільний момент часу	30
2.7 Розрахунок струмів несиметричних КЗ	32
3. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ДІЛЯНКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	37
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	51
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	53
ДОДАТОК Б. ЗНАЧЕННЯ ПОСТІЙНОГО ЧАСУ ЗГАСАННЯ АПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА УДАРНОГО КОЕФІЦІЄНТА.....	61
ДОДАТОК В. ГАБАРИТНІ РОЗМІРИ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ...	62
ДОДАТОК Г. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРАЛЕРА	63

ВСТУП

Останніми роками в апаратобудуванні дедалі частіше впроваджуються елементи безконтактної техніки. У зв'язку з цим у цьому підручнику знайшли відображення питання в галузі теорії та розрахунку дроселів насичення, магнітних підсилювачів та напівпровідникових елементів.

Якщо область апаратів обмежити їх застосуванням у виробництві, перетворенні, розподілі та споживанні електричної енергії, то й у цьому випадку вона є величезним розділом електротехніки та електропромисловості. У нашій країні нині є десятки заводів, лабораторій та інститутів, зайнятих розробкою та виробництвом електричних апаратів.

Електричні апарати, що стосуються галузі виробництва, перетворення, розподілу та споживання електроенергії, можуть бути поділені на такі основні групи, що розглядаються нижче.

Комутаційні апарати. Сюди можуть бути віднесені: вимикачі високої та низької напруги, роз'єднувачі, короткозамикачі та відділювачі високої напруги, запобіжники високої та низької напруги, контактори, реле управління, магнітні пускачі низької напруги та ін.

Захисні та контрольні апарати. Реле різного призначення, що реагують на зміну струму, напруги, потужності, температури, що створюють витримку часу та ін..

Струмообмежуючі апарати. Реактори (підстанційні, пічні, пускові), опори (пускові, регулюючі та ін.).

Регулюючі апарати. Регулятори електричні (напруги, струму, швидкості обертання, температури).

Значна частина перерахованих категорій апаратів схильна до впливу тривалих або короткочасних робочих струмів, забезпечена контактними пристроями, призначеними для розмикання та замикання ланцюгів, має

електромагнітні елементи (катушки, електромагніти) управління та механізми руху.

У ряді апаратів релейного типу та регуляторів останнім часом знаходять широке застосування магнітні підсилювачі та напівпровідникові елементи.

Більшість апаратів високої та низької напруги призначена для роботи в ланцюгах з відносно великими робочими струмами — сотні, тисячі та десятки тисяч ампер — і піддається великим, але короткочасним струмам короткого замикання. Для розробки електричних апаратів такого роду дуже важливого значення набувають питання обліку теплових та електродинамічних дій робочих та аврійних струмів.

У багатьох апаратах, особливо комутаційної групи, одним із центральних завдань є проблеми дугогасіння та електричних контактів. Вони мають велике значення як для контакторів низької напруги (знос і перехідний опір контактів, термін життя та стійкість роботи апарату), так і при створенні раціональних систем потужних вимикачів та автоматів (відключаюча здатність, час відключення ланцюга, стійкість контактів при струмах короткого замикання).

При розробці апаратів, таких як: контактори, реле, датчики, автомати, приводи до автоматів та високовольтних вимикачів, магнітні пускачі та ін. дуже істотне значення набувають питання електромагнітів постійного та змінного струмів. Від раціонального вибору систем магнітних ланцюгів та електромагнітів залежать витрати матеріалів у виробництві, тягові характеристики, час спрацьовування та інші характеристики апаратів.

При вирішенні питань побудови регулюючих та автоматичних апаратів, схем управління апаратами все більше використовуються досягнення безконтактної техніки, тобто техніки, заснованої на застосуванні напівпровідникових елементів і магнітних підсилювачів.

У ході виконання дипломної роботи було запропоновано вирішення наступних завдань:

- 1) розглянути основні питання вибору електричних апаратів та провідників, а саме:

- принципи вибору комутаційного обладнання
- розрахункові умови щодо вибору апаратів при тривалому режимі роботи та режимі короткого замикання;

2) дослідити методику щодо обґрунтування перевірки електротехнічного устаткування за допомогою визначення струмів короткого замикання в електричних мережах та системах розподілу електричної енергії;

3) розрахувати та обрати електричні апарати для ділянки електричної мережі для коректного та безперебійного спрацювання в різних режимах роботи енергосистеми та електроустаткування в цілому.

Дипломна робота: 63 сторінки, 6 рисунків, 6 таблиці, 4 додатки, 11 джерел.

1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ПРОВІДНИКІВ

1.1 Принципи вибору комутаційного обладнання для електросистеми

Все електрообладнання, струмопровідні частини та ізолятори на підстанціях і підстанціях повинні бути відібрані для безперервної роботи та випробувані на коротке замикання відповідно до «Правил електрообладнання» та «Рекомендацій з розрахунку струмів короткого замикання, вибору і випробування обладнання та кабелів в умовах короткого замикання».

Вибір приладів і кабелів для планованої установки починається з визначення умов проектування за конкретною схемою, а саме: розрахункових робочих струмів клем, розрахункових струмів короткого замикання тощо.

Розраховані значення порівнюються з відповідними номінальними параметрами приладів і проводів, вибраних з каталогів і каталогів.

При виборі приладів необхідно враховувати тип установки (зовнішній або внутрішній), температуру навколишнього середовища, вологість і забрудненість приміщення, а також габарити, вагу, вартість приладу та зручність його розміщення. у кімнаті. розподільний пристрій.

Розглядається наступна (таблиця 1.1) напруга електромереж та підключених джерел і приймачів електричної енергії в установках понад 1000 В: номінальна напруга між фазами $U_{ном}$, максимальна робоча напруга U_{max} та середня робоча напруга U_{cp} (значення напруги виражаються в кВ) [1,2].

Таблиця 1.1. – Дані напруг різного класу

$U_{ном}$	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750
U_{cp}	3,15	6,3	10,5	21	37	115	154	230	340	515	770
U_{max}	3,6	7,2	12	24	40,5	126	172	252	363	525	787

Ізоляція електричних апаратів та кабелів повинна відповідати номінальній напрузі установки U_y , для чого має бути виконана умова:

$$U_y \leq U_{\text{ном}},$$

де: U_y – номінальна напруга апарата чи кабелю.

1.2 Розрахункові умови для вибору провідників та апаратів за тривалими режимами роботи

Безперервна робота електричного пристрою – це робочий стан, який триває не менше стільки, скільки необхідно для досягнення температури його нерухомих частин при постійній температурі теплоносія.

Розширений режим виникає, коли електрична система знаходиться в одному з режимів: нормальний, ремонтний, післявідмовний.

Нормальний режим забезпечує робочий графік. Всі елементи електросистеми працюють в штатному режимі, без вимушених, так би мовити, відключень і перевантажень. Струм силового навантаження в цьому режимі роботи може варіюватися в залежності від навантаження графіка, а саме пікові години, електричної мережі.

Для вибору пристроїв і кабелів потрібно узяти найбільший по величині струм нормального режиму роботи $I_{\text{норм.}}$.

Ремонтний режим — це планово-попереджувальний ремонт і режим капітального ремонту. У цьому режимі деякі елементи електроустановки відключаються, тому інші елементи піддаються підвищеному навантаженню. При виборі пристроїв і кабелів враховуйте збільшення навантаження до $I_{\text{рем. max}}$.

Післявідмовний режим – це режим, при якому в результаті аварійного відключення вийшли з ладу або були відремонтовані деякі елементи електроустановки. У цьому режимі можна перевантажити компоненти бортової мережі поточним $I_{\text{п.ав. max}}$, який залишився в роботі.

З останніх двох режимів обирається найскладніший, коли електричні компоненти пропускають найбільший струм $I_{\max}$.

Таким чином, розраховані струми тривалого режиму: $I_{\text{норм}}$ – найбільший струм нормального режиму; $I_{\max}$ – найбільший поточний ремонтний або аварійний режим. Умови розрахунку нормального і максимального режимів абсолютно індивідуальні для кожного з'єднання і вимагають детального аналізу.

Розглянемо, як визначаються розрахункові струми деяких конкретних випадків.

Ланцюг генератора:

$$I_{\text{норм}} = I_{\text{ном.г}} = \frac{P_{\text{ном.г}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.г}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном.г}}},$$

де: $P_{\text{ном.г}}$ – номінальна потужність генератора;

$U_{\text{ном.г.}}$ – номінальна напруга генератора;

$I_{\text{ном.г.}}$ – номінальний струм генератора;

$\cos \varphi_{\text{ном.г.}}$ – номінальний коефіцієнт навантаження.

Найбільший струм післяаварійного або ремонтного режиму визначається за умови роботи генератора при зниженні напруги на 5%:

$$I_{\max} = \frac{P_{\text{ном.г}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.г}} \cdot 0,95 \cdot \cos \varphi_{\text{ном.г}}}.$$

Ланцюг двообмотувального трансформатора зв'язку на електростанції. З боку вищої (ВН) та нижчої напруги (НН) приймають:

$$I_{\text{норм}} = I_{\text{ном.т}} = \frac{S_{\text{ном.т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.т}}},$$

де: $S_{\text{ном.т.}}$ – номінальна потужність трансформатора;

$I_{\text{ном.т.}}$ – номінальний струм трансформатора

$U_{\text{ном.т.}}$ – номінальна напруга трансформатора;

Найбільший струм ремонтного або аварійного спрацьовування досягається за умови відключення паралельно працюючого трансформатора, коли трансформатор під час роботи може бути перевантажений за принципами тривалого аварійного або систематичного перевантаження. Відповідно до ГОСТ 14209-85 трансформатор допускається мати тривале аварійне навантаження 40% і систематичне навантаження залежно від умов охолодження, типу трансформатора і графіка навантаження. Якщо фактичні значення допустимих навантажень невідомі, то тренувальна конструкція може включати:

$$I_{\text{max}} = (1,3 \dots 1,4) \cdot I_{\text{ном.т.}}$$

Ланцюг триобмотувального трансформатора або автотрансформатора на електростанції. Завантаження ланцюгів ВН (високої напруги), СН (середньої напруги), ПН (низького напруження) залежить від конкретних умов: графіка навантаження та схеми з'єднань. При блочному з'єднанні генератора з трансформатором на стороні ПН $I_{\text{ном}}$, I_{max} визначаються так само, як у ланцюзі генератора.

При поперечних зв'язках між генераторами розрахункові умови за боці ПН і ВН визначаються за потужністю трансформатора з урахуванням його навантаження, тобто.

$$I_{\text{ном}} = I_{\text{ном.т.}},$$

$$I_{\text{max}} = (1,3 \dots 1,4) \cdot I_{\text{ном.т.}},$$

де: I_{max} – струм перевантаження трансформатора.

На стороні СН, якщо відсутній зв'язок з енергосистемою та встановлено два трансформатори:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S'_H}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}};$$

$$I_{\text{max}} = 2 \cdot I_{\text{норм}},$$

де: S'_H – найбільше перспективне навантаження на СН.

Якщо до шин СН приєднана енергосистема та можливі перетікання потужності між обмотками ВН та СН, то:

$$I_{\text{норм}} = I_{\text{ном.Т}};$$

$$I_{\text{max}} = (1,3 \dots 1,4) \cdot I_{\text{ном.Т}}.$$

Ланцюг двообмотувального трансформатора на підстанції. На стороні ВН та ПН розрахункове навантаження визначають, як правило, з урахуванням установки у перспективі трансформаторів наступної за шкалою ГОСТ номінальної потужності $S'_{\text{ном.Т}}$.

$$I_{\text{норм}} = (0,65 \dots 0,7) \cdot \frac{S'_{\text{ном.Т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.Т}}},$$

$$I_{\text{max}} = (1,3 \dots 1,4) \cdot \frac{S'_{\text{ном.Т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.Т}}}.$$

Ланцюг триобмотувального трансформатора на підстанції. На стороні ВН розрахункові струми визначають як і, як для двообмоточного трансформатора на підстанції. На боці СН при двох встановлених трансформаторах:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S'_H}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}},$$

$$I_{\text{max}} = 2 \cdot I_{\text{норм}},$$

де: S'_H – перспективне навантаження на боці СН на 10-річний період.

Ланцюг автотрансформатора на підстанції. На стороні ВН і СН розрахункові струми визначають, як для ланцюга двообмотувального трансформатора на підстанції, так як автотрансформатор може бути використаний для зв'язку двох систем та перетікань потужності як із ВН в СН, так і у зворотному напрямку. На стороні ПН розрахункові струми визначає перспективне навантаження:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S'_H}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}};$$

$$I_{\text{max}} = 2 \cdot I_{\text{норм}},$$

Ланцюг лінії. Якщо лінія одиночна радіальна, то $I_{\text{норм}} = I_{\text{max}}$ визначається найбільшим навантаженням лінії.

Для n паралельних ліній:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нав.}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}$$

$$I_{\text{max}} = \frac{n}{n-1} \cdot I_{\text{норм}}$$

де: $S_{\text{нав}}$ – перспективне навантаження на боці СН на 10-річний період.

Найбільший струм ремонтного або післяаварійного режиму I_{max} для паралельних ліній виникає при відключенні однієї з них.

Збірні шини, ланцюги секційних, шиноз'єднувальних вимикачів.

Струм нормального режиму визначається з урахуванням струморозподілу по шинах при найбільш несприятливому експлуатаційному режимі. Такими режимами є: відключення частини генераторів, переведення ліній на одну систему шин, а джерел живлення – на іншу. Зазвичай струм, що проходить по збірним шинам, секційному або шиноз'єднувальному вимикачам, не перевищує $I_{\max}$ найпотужнішого генератора або трансформатора, приєднаного до цих шин.

Ланцюг групового здвоєного реактора. У нормальному режимі гілки реактора рівномірно завантажені [1,2,3]. Найбільший струм нормального режиму визначається за навантаженням приєднаних до гілки споживачів:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нав.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}$$

У післяаварійному або ремонтному режимі при відключенні однієї зі споживчих ліній, приєднаних до гілки реактора, навантаження іншої гілки може, відповідно, зрости:

$$I_{\max} = \frac{n}{n-1} \cdot I_{\text{норм}}$$

де: n – число ліній, приєднаних до однієї гілки реактора.

При правильно вибраному реакторі $I_{\max}$ не перевищує номінального струму його гілки. Отже, умова вибору тривалого нагрівання:

для апаратів:

$$I_{\text{норм}} \leq I_{\text{ном}}$$

$$I_{\max} \leq I_{\text{ном}}$$

для шин та кабелів:

$$I_{\max} \leq I_{\text{доп}}$$

де: $I_{\text{ном}}$ – номінальний струм апарату;

$I_{\text{доп}}$ – довго допустимий струм провідника.

Номінальний струм апаратів $I_{\text{ном}}$ нормований при температурі навколишнього повітря $\theta_{\text{о.ном}}=35^{\circ}\text{C}$, струм $I_{\text{доп}}$ – при температурі навколишнього повітря $\theta_{\text{о.ном}}=25^{\circ}\text{C}$ або за температури землі $\theta_{\text{о.ном}}=15^{\circ}\text{C}$ (для кабелів).

Якщо дійсна температура навколишнього середовища $\theta_{\text{о}}$ відрізняється від номінальної температури $\theta_{\text{о.ном}}$, то слід зробити перерахунок номінального струму за співвідношенням:

для апаратів:

$$I'_{\text{ном}} = \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{о}}}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{о.ном}}}},$$

для шин та кабелів:

$$I'_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{о}}}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{о.ном}}}}.$$

де: $I'_{\text{ном}}$ та $I'_{\text{доп}}$ – номінальний та довго допустимий струм при температурі навколишнього середовища $\theta_{\text{о}}$;

$\theta_{\text{доп}}$ – тривало допустима температура апарата чи провідника.

1.3 Розрахункові умови для перевірки апаратури та струмовідних частин за режимом короткого замикання

Конструкції шин електрообладнання та розподільних пристроїв повинні бути перевірені на електродинамічну та термічну стійкість. Також перевіряють на наявність перебоїв роз'єднувальні пристрої (вимикачі, запобіжники). Для цього необхідно визначити розрахункові струми КЗ, попередньо відпрацювати розрахункову схему і записати розраховані точки короткого замикання.

При складанні розрахунку розрахункової схеми заміщення для вибору апаратів і провідників одного ланцюга обирають режим робочої установки, при якому цей ланцюг буде найбільший струм КЗ. При цьому не враховуються режими, які не передбачені для тривалої експлуатації (наприклад, короткочасна паралельна робота резервного та робочого трансформатора власних потреб станції та ін.).

Як розрахункова точка КЗ слід приймати точку, при пошкодженні в якій через вибирається апарат або провідник протікатиме найбільший струм.

Розрахунковим видом КЗ при перевірці електродинамічної стійкості апаратів і жорстких шин з підтримуючими і опорними конструкціями, що відносяться до них, є трифазне КЗ. Термічну стійкість слід перевіряти також із трифазного КЗ. Виняток представляють апарати та провідники в ланцюзі генераторів, для яких необхідно перевірити їхню термічну стійкість при часі дії резервного захисту генератора. Апаратура та струмопровідні частини, що застосовуються в ланцюгах живлення, а саме в генераторах потужністю 60 МВт і більше, а також у ланцюгах джерел живлення блоків генератор-трансформаторів такої ж потужності, повинні перевірятися за термічною стійкістю, в залежності від розрахункового часу КЗ 4 с. Тому для ланцюга генератора слід розглянути трифазне та двофазне КЗ.

Відключаючу здатність апаратів у незаземлених або резонансно заземлених мережах (мережі напругою до 35 кВ включно) слід перевіряти струмом трифазного КЗ.

У ефективно-заземлених мережах (мережі напругою 110 кВ і вище) визначають струми при трифазному і однофазному КЗ, а перевірку здатності щодо відключення, роблять за більш складним режимом з урахуванням умов відновлення напруги.

Перевірка електродинамічної стійкості. Ударні струми КЗ можуть спричинити поломки електричних апаратів та шинних конструкцій. Щоб цього не сталося, кожен тип апаратів випробовують на заводі, встановлюючи для нього максимальний допустимий струм КЗ (амплітудне значення повного струму) $i_{\text{дин}}$. У літературі зустрічається й інша назва цього струму – граничний наскрізний струм короткого замикання $i_{\text{пр.скв.}}$.

Умова перевірки електродинамічної стійкості має вигляд:

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$$

де: $i_{\text{уд}}$ – розрахунковий ударний струм у ланцюзі.

Перевірка електродинамічної стійкості вимикачів і трансформаторів має деякі особливості, що буде розглянуто при виборі цих апаратів.

Шини та шинні конструкції перевіряють на механічну міцність при дії електродинамічних сил, що виникають при КЗ.

Проводиться перевірка на термостійкість. Провідники та апарати при КЗ не повинні нагріватися вище за допустиму температуру, встановлену нормами для короткочасного нагріву.

Для термічної стійкості апаратів має бути виконана умова:

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер.}}^2 \cdot t_{\text{тер}}$$

де: $B_{\text{к}}$ – імпульс квадратичного струму КЗ, пропорційний кількості теплової енергії, виділеної під час короткого замикання;

$I_{\text{тер}}$ – номінальний струм термічної стійкості апарату;

$t_{\text{тер}}$ – номінальний час термічної стійкості апарату.

Апарат може витримати струм $I_{\text{тер}}$ протягом часу $t_{\text{тер}}$.

Імпульс квадратичного струму короткого замикання:

$$B_k = \int_0^{t_{\text{відкл}}} I_{kt}^2 dt = B_{\text{к.п.}} + B_{\text{к.а.}}$$

де: I_{kt} – значення повного струму КЗ, що діє, в момент t ;

$t_{\text{відкл}}$ – час від початку КЗ до його вимкнення;

$B_{\text{к.п.}}$ – тепловий імпульс періодичної складової струму КЗ;

$B_{\text{к.а.}}$ – тепловий імпульс аперіодичної складової струму короткого замикання.

Тепловий імпульс B_k розраховується по-різному в залежності від місцезнаходження та віддаленості точки КЗ електричної схеми. Можна виділити три основні випадки:

- віддалене КЗ;
- КЗ поруч з генераторами або синхронними компенсаторами;
- КЗ поруч з групою приймачів, наприклад потужних електродвигунів.

У першому випадку повний тепловий імпульс КЗ:

$$B_k = I_{\text{п.о.}}^2 \cdot (t_{\text{відкл}} + T_a)$$

де: $I_{\text{п.о.}}$ – чинне значення періодичної складової початкової струму КЗ;

T_a – постійна часу згасання аперіодичної складової струму КЗ.

Для приблизних розрахунків можливо приймати значення T_a за Додатком Б.

Даний спосіб визначення V_k рекомендується при обчисленні теплового імпульсу в ланцюгах знижувальних підстанцій (виняток становлять короткі замикання на шинах 3...10 кВ розподільчих підстанцій, до яких підключені потужні електродвигуни та синхронні компенсатори), в ланцюгах підвищеної напруги електростанцій, в ланцюгах генераторного напруги електростанцій КЗ знаходиться за реактором.

Розрахунок теплового імпульсу V_k для інших випадків КЗ досить складно визначити.

Після приблизних розрахунків можливо скористатися наведеним виразом V_k . При цьому розраховане значення теплового імпульсу буде дещо завищено, тому що насправді струм загасає.

Відповідно до ПУЭ час відключення $t_{\text{відкл}}$ складається з часу захисту головного реле цієї схеми $t_{\text{р.з.}}$ та і загального часу роботи вимикача $t_{\text{о.в.}}$:

$$t_{\text{відкл}} = t_{\text{р.з.}} + t_{\text{о.в.}}$$

У ланцюгах генератора від 60 МВт перевірте термічну стійкість на час дії резервного захисту генератора та пуску $t_{\text{відкл}} = 4$ с.

Відповідно до ПУЕ не можна перевіряти електродинамічну стійкість пристроїв і ліній напругою до 60 А включно, пристроїв і шин ланцюгів трансформаторів напруги, якщо вони знаходяться в окремій камері. Провідники повітряних ліній можуть бути і не перевірені на термічну стабільність 35 кВ і більше за відсутності вимикача швидкої реактивації (БАПВ), обладнання та провідників ланцюга, запобіжників, провідників схеми трансформатора напруги [1,3,4].

2. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

2.1 Призначення розрахунків струмів короткого замикання

При ескізному проектуванні СЕС розрахунки струмів короткого замикання (СКЗ) необхідні для вирішення наступних завдань:

- 1) зіставлення, оцінки та вибору схеми системи електропостачання;
- 2) прогнозування умов роботи електроприймачів при аварійних та післяаварійних режимах;
- 3) перевірки обраних комутаційних апаратів та провідників за умовами роботи при КЗ.

Розрахунки СКЗ як одного з найважчих видів перехідних процесів необхідні для вирішення питань, що включають:

- 1) обґрунтування економічно доцільних систем передачі, розподілу та споживання електроенергії;
- 2) визначення тривалості перехідного процесу та його вплив зміну параметрів елементів системи електропостачання;
- 3) створення таких умов у системі електропостачання, за яких перехідний процес закінчувався б благополучним бажаним режимом, що встановився.

Залежно від проблеми, яку необхідно вирішити, необхідно розрахувати наступні види коротких замикань:

- трифазне коротке замикання – для випробування електрообладнання та жорстких кабелів з несучими та несучими конструкціями на електродинамічну стійкість; Перевірка електрообладнання на тепловий опір і комутацію;
- двофазне коротке замикання – для перевірки шлангів на електродинамічну стійкість під дією сили тяжіння, небезпечне зближення та зіткнення; при перевірці термічної стійкості проводів і приладів у ланцюгах напруги електрогенераторів вибір параметрів релейного захисту;
- однофазне коротке замикання – при огляді автоматичних вимикачів та проектуванні заземлення та виборі параметрів релейного захисту.

Розрахункова схема визначення струмів короткого замикання виконується в однофазному варіанті, який включає генератори, синхронні машини та асинхронні електродвигуни, що впливають на струм короткого замикання, а також елементи мережі (кабелі, трансформатори, дроселі) і підключення джерел живлення. При розробці розрахункової схеми вибору електрообладнання та проводів та визначення струмів короткого замикання необхідно спиратися на умови його тривалої експлуатації.

За розрахунковою схемою формується схема заміщення, в якій клема трансформатора замінюються електричними. Елементи системи електропостачання, що підключають джерела живлення до місця несправності, вводяться в схему заміни через затискачі, а джерела живлення - через затискачі та ЕРС. Опір і електрорушійну силу еквівалентної схеми необхідно зменшити до напруги мережі. У практичних розрахунках за основні струми зручно приймати ступінь визначення струмів короткого замикання [1,5,6].

2.2 Вимоги та припущення до розрахунків СКЗ

Вибір методики розрахунку СКЗ залежить від вимог, що пред'являються до результатів. Для вибору та перевірки електричних апаратів точність розрахунку може бути нижчою, ніж для вирішення інших завдань. При виборі засобів релейного захисту та автоматики точність розрахунку має бути вищою. У цьому випадку необхідно визначити найбільше та найменше значення аварійних струмів та напруг, можливе зрушення між ними в окремих фазах, або між їх симетричними складовими. При ескізному проектуванні достатньо знання наближених даних про СКЗ. Для вибору та перевірки електроустаткування допустимі наближені та орієнтовні розрахунки, похибка яких не перевищує 5–10%. У практичних завданнях вводяться такі припущення, що спрощують розрахунки, забезпечуючи прийнятну точність:

- 1) коротке замикання настає у такий момент, у якому СКЗ максимальний;
- 2) всі джерела живлення працюють із номінальним навантаженням;

- 3) ЕРС всіх джерел живлення збігаються по фазі і в процесі КЗ відсутнє хитання генераторів;
- 4) всі елементи короткозамкнутого ланцюга симетричні. Порушення симетрії може відбуватися лише у місці КЗ;
- 5) всі синхронні машини мають автоматичні контролери збудження;
- 6) номінальна напруга на кожному етапі перетворення приймається на 5% вищою за номінальну напругу мережі споживача;
- 7) не враховано насичення магнітних систем трансформаторів, генераторів та електродвигунів, що дозволяє вважати індуктивні опори всіх елементів короткозамкнутого кола постійними і незалежними від струму;
- 8) струми намагнічування силових трансформаторів не враховані;
- 9) нехтування ємністю заземлювачем у повітряних лініях напругою до 220 кВ і довжиною до 200 км;
- 10) слід враховувати вплив на СКЗ приєднаних синхронних та асинхронних двигунів;
- 11) не враховується вплив на струми підживлення статичних електроприймачів та ємнісних батарей паралельної компенсації;
- 12) у короткозамкнутому ланцюгу з декількома незалежними контурами циркуляції струмів згасання аперіо-дической складової СКЗ враховується приблизно;
- 13) у схемах електроустановок напругою вище 1 кВ при $x/r > 3$ активним опором можна знехтувати;
- 14) у схемах електроустановок напругою до 1 кВ враховується активний опір всіх елементів СЕС. Якщо переважає активна складова опору $r/x > 3$, то індуктивним опором можна знехтувати;
- 15) у схемах електроустановок напругою до 1 кВ напруга джерела живлення – цехового чи споживчого трансформатора незмінно протягом усього перехідного процесу;
- 16) опір місця КЗ приймається рівним нулю, КЗ вважається металевим [7].

2.3 Порядок розрахунку струмів при симетричному короткому замиканні

1. На розрахунковій схемі намічаються точки КЗ. Відповідно до розрахункової схеми складається схема заміщення. Для кожної точки складається окрема схема заміщення. Схема ділянки мережі, що безпосередньо примикає до місця КЗ, розглядається в такому вигляді, коли по елементу, що захищається комутаційним апаратом, проходить максимальний СКЗ. Найбільш небезпечним буде СКЗ на шинах 6–10 кВ після того, коли один із трансформаторів ГПП відключено дією релейного захисту та автоматики або виведено в ремонт. Найбільший СКЗ проходить по лінії, що залишилася в роботі, і трансформатору.

Під час перевірки кабелів на термічну стійкість розрахунковою точкою КЗ є початок КЛ; для двох та більше паралельно включених кабелів – початок кожного кабелю.

2. Схема заміщення наводиться до найпростішого виду. Система та генератори ТЕЦ, що характеризуються значеннями ЕРС, повинні бути пов'язані з точкою КЗ одним результируючим опором. Синхронні та асинхронні двигуни, що є місцевими джерелами підживлення точки КЗ, виділяються в окремі гілки, що генерують. При цьому враховуються лише джерела підживлення, що безпосередньо пов'язані з точкою КЗ. Якщо джерела підживлення відокремлені від місця короткого замикання одним або більше ступенями трансформації, то їх у схемі заміщення не враховують.

Отримана шляхом остаточного перетворення схема заміщення містить кілька генеруючих гілок, що живляться, наприклад, від енергосистеми, ТЕЦ, ЦД та АТ. Відповідно до прийнятих припущень у схемах заміщення для мереж напругою вище 1 кВ залишаються лише реактивні опори.

При спрощенні схеми заміщення слід дотримуватись певної послідовності операцій. Перетворення схеми заміщення виконується у напрямку джерела живлення до місця КЗ.

Кожному опору схеми заміщення надається певний номер або індекс, які зберігаються до кінця розрахунку.

Перетворення схеми заміщення до найпростішого виду зводиться до того що кожен джерело живлення пов'язані з місцем КЗ через одне результуючий опір. Вважається, що струм підживлення електродвигунів виникає при безпосередньому трифазному КЗ на їх затискачах (напруга $U_k^{(3)} = 0$).

Для практичних розрахунків рекомендується використовувати такі методи перетворення схем заміщення:

- 1) заміна декількох опорів, з'єднаних послідовно або паралельно, одним еквівалентним;
- 2) перетворення опорів в еквівалентний трикутник чи зірку;
- 3) перетворення багатопробевої зірки на багатокутник з діагоналями;
- 4) заміна кількох джерел живлення одним еквівалентним;
- 5) суміщення точок однакового потенціалу;
- 6) використання методу коефіцієнтів струморозподілу.

3. За законом Ома визначити періодичну складову СКЗ, потім ударний струм.

Параметри елементів схеми заміщення можуть бути розраховані за формулами, поданими в табл. 2.1:

- 1) в іменованих одиницях із приведенням значень параметрів до базисних умов;
- 2) у названих одиницях без приведення значень параметрів розрахункової схеми до базових умов.
- 3) у відносних одиницях (в.о) із приведенням значень параметрів розрахункової схеми до обраних базисних умов.

2.4 Подання параметрів елементів схем заміщення у відносних одиницях

Розрахунок параметрів режиму та системи у відносних одиницях дозволяє у випадках, коли точки КЗ знаходяться на різних шаблях трансформації суттєво

спростити складні аналітичні перетворення, надати їм загальний характер і більшу наочність, швидше зорієнтуватися у порядку визначених значень. Тому згідно з ГОСТ 27514-87 розрахунки СКЗ в електроустановках напругою вище 1 кВ зручно проводити у відносних одиницях.

Відносним значенням параметра називається його ставлення до іншого однойменного параметра, вибраного за одиницю виміру. Щоб висловити параметри у відносних одиницях, необхідно встановити базисні одиниці чи умови. Для системи електропостачання такими умовами є базисні потужність S_6 , напруга U_6 , струм I_6 і опір z_6 . Оскільки чотири базисні одиниці пов'язані між собою аналітичними виразами, але тільки дві базові умови можуть бути обрані довільно:

$$\begin{cases} S_6 = \sqrt{3} \cdot U_6 \cdot I_6 \\ z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot I_6} \end{cases}$$

Інші виходять із співвідношень. Зазвичай задаються базовою потужністю S_6 і базовою напругою U_6 . Вибрані базисні величини служать для виміру як повних значень параметрів, а й їх активних і індуктивних складових.

Для практичних розрахунків слід вибирати такі значення базисних умов, щоб обчислювальна робота була простіша, а порядок числових параметрів досить зручний. За базову потужність S_6 можна прийняти значення 1000 МВА (сумірне з даними потужності КЗ СКЗ енергосистеми). За базисну напругу U_6 приймається середня напруга U_{cp} у точці КЗ за шкалою: 6,3; 10,5; 115 та 230 кВ.

Хоча вибір базисних умов у випадку досить суб'єктивний і той самий параметр може набувати різні числові значення, остаточний результат розрахунку СКЗ залежить від вибору базисних умов.

Після вибору базисних величин визначаються відносні значення інших параметрів, що набувають індексів: * – вираз у відносних одиницях;

(б) – приведення до базисних умов. Індекс опускається, якщо в розрахунках немає приведення до інших умов, наприклад, номінальних [5,6].

Базисний струм визначається з виразу:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}$$

Для подальшого розрахунку СКЗ необхідно все ЕРС і опору висловити в.о. за обраних базисних умов.

Розрахунок опорів відповідних схем заміщення здійснюється за формулами табл. 2.1.

2.5 Розрахунок трифазного СКЗ

Початкове значення періодичної складової трифазного СКЗ $I_{n.o.} = I_j^{(3)}$ – надперехідний струм визначається окремо для кожної j -ї генеруючої гілки перетвореної схеми заміщення за формулою:

$$I_{n.o.} = I_j^{(3)} = E_{j*} \cdot \frac{I_6}{x_{j*}}$$

де: E_{j*} – початкове значення ЕРС j -ї генеруючої гілки, в.о.;

x_{j*} – індуктивний опір j -ї генеруючої гілки, в.о.;

I_6 – базисний струм, кА.

Для попередніх розрахунків приймають такі значення ЕРС в в.о., наведені до номінальних умов:

а) для системи $E^* = 10$;

б) для турбогенераторів ТЕЦ $E^* = 1,08$;

в) для СД $E^* = 1,1$;

г) для АД $E^* = 0,9$.

Струм у точці КЗ, що проходить через секційний вимикач або шини, визначається підсумовуванням ТКЗ приєднаних генеруючих гілок:

$$I_{\Sigma}^{(3)} = \sum_{j=1}^n I_j^{(3)}$$

У розгалуженій схемі з декількома різнорідними генеруючими гілками ударний СКЗ $i_{удj}$ і при необхідності його значення $I_{удj}$ для кожної гілки визначимо за виразами:

$$i_{удj} = k_{удj} \cdot \sqrt{2} \cdot I_j^{(3)}$$

$$I_{удj} = I_j^{(3)} \sqrt{1 + 2 \cdot (k_{удj} - 1)^2}$$

де: $i_{уд}$ – ударний коефіцієнт СКЗ.

При розрахунку ударного струму КЗ враховується, що:

- а) ударний струм настає через 0,01с після початку КЗ;
- б) напруга в мережі на момент КЗ проходить через нуль;
- в) амплітуда періодичної складової струму КЗ в момент $t = 0,01$ с дорівнює амплітуді цієї складової в початковий момент КЗ.

З урахуванням цих припущень ударний коефіцієнт визначається за формулою:

$$k_{уд} = 1 - e^{-\frac{0,01}{T_a}}$$

де: T_a – постійна часу згасання аперіодичної складової (знаходиться за табл. 2.2).

Ударний коефіцієнт k_y можна обчислити за формулою, поставити його середнім значенням по табл. 2.2 чи знайти за діаграмою на рис. 2.1.

Крім СКЗ необхідно обчислити потужність КЗ у точках КЗ індексом k для кожного ступеня трансформації:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot I_k^{(3)} \cdot U_{cp.k}$$

де: $U_{cp.k}$ – середня (базисна) напруга для кожного ступеня трансформації.

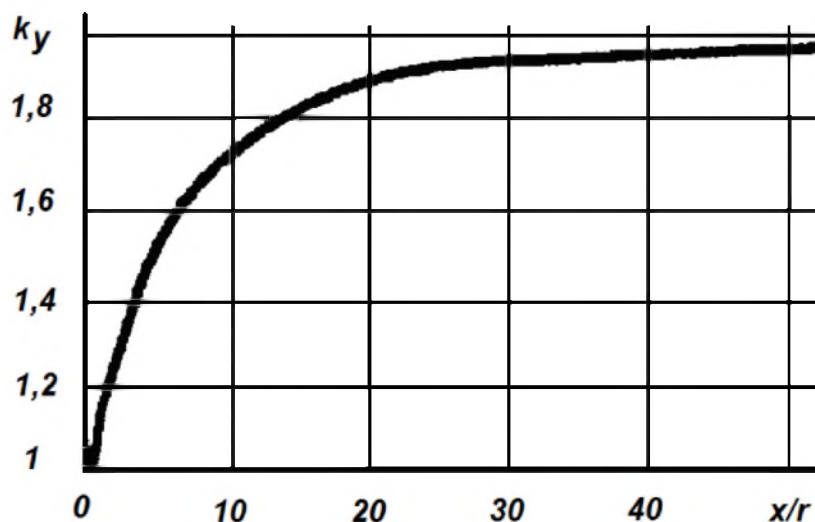


Рисунок 2.1 – Графік залежності ударного коефіцієнта k_y від співвідношення опорів ланцюга

Потужність КЗ є умовною величиною, необхідною для перевірки спроектованого чи встановленого обладнання СЕС [6].

2.6 Розрахунок СКЗ у довільний момент часу

Причинами необхідності розрахунку СКЗ у довільний момент часу є різні негативні наслідки коротких замикань, що посилюються з часом:

1) погіршення показників якості електроенергії – зниження напруги на затискачах електроприймачів, зменшення частоти, несиметрія фазних напруг мережі, зміна синусоїдальності форми кривої напруги та струму, провали напруги живлення;

2) термічна дія – неприпустиме нагрівання провідників та електрообладнання струмом, що перевищує номінальне значення в 10-15 разів, прискорює їхнє старіння, руйнує ізоляцію, викликає зварювання та вигорання контактів, втрату механічної міцності;

3) електродинамічна дія – сила, що діє на струмовідні частини $F \propto i^2$, призводить до руйнування ізоляції, механічних пошкоджень та деформацій;

4) вплив на лінії зв'язку, пристрої релейного захисту, автоматики та телемеханіки – наведення ЕРС у сусідніх лініях викликає помилкові спрацьовування апаратури та призводить до відключення нормально працюючих електроустановок;

5) погіршення електробезпеки – поява небезпечного потенціалу на електропровідних частинах та кожухах електроустановок;

6) пожежо- та вибухонебезпечність – перегрів струмовідних частин та електрична дуга може призвести до займання горючих ізоляційних матеріалів і вибухонебезпечних сумішей;

7) порушення стійкості роботи елементів СЕС у результаті різке зниження напруги – перекидання двигунів, механічний момент на валах яких залежить від квадрата величини напруги.

Синхронні генератори (СГ) електростанцій мають автоматичні регулятори збудження (АРЗ) для підтримки необхідного рівня напруги на своїх шинах при змінах режимів навантаження. При зниженні напруги, викликаного перехідним

процесом КЗ, АРЗ збільшує струм в обмотці збудження СГ, збільшуючи напругу на шинах статора. Це призводить до зростання СКЗ у місці КЗ.

Ступінь збільшення напруги залежить від місця КЗ – його віддаленості від шин та технічних параметрів СГ. Отже, для вибору та перевірки комутаційної апаратури необхідно знати струми КЗ не тільки в початковий момент їх виникнення, а й СКЗ у довільний час.

Для перевірки провідників та електричних апаратів на термічну стійкість як розрахунковий час КЗ слід приймати сумарну тривалість дії струмового захисту (з урахуванням дії автоматичного повторного включення – АПВ) найближчого до місця КЗ вимикача та повного часу відключення цього вимикача. За наявності зони нечутливості у основного захисту – за сумарною тривалістю дії захисту, що реагує на КЗ у зазначеній зоні, та повного часу відключення вимикача приєднання.

При перевірці електричних апаратів на комутаційну здатність як розрахункову тривалість КЗ слід приймати суму мінімально можливого часу дії релейного захисту даного приєднання та власного часу відключення комутаційного апарату.

Перевіряючи кабелі на незайманість при КЗ, як розрахункову тривалість КЗ слід приймати сумарну тривалість дії резервного захисту та повного часу відключення вимикача приєднання.

При ескізному проектуванні та відсутності необхідної вихідної інформації рекомендується розглядати моменти часу $t_1 = 0,2$ с (умовний час від початку КЗ до гасіння дуги при розходженні контактів вимикача після спрацювання релейного захисту) для маломасляних вимикачів, $t_1 = 0,1$ с для вакуумних вимикачів і $t_2 = \infty$ (режим, що встановився після перехідного процесу без відключення КЗ).

Взаємодія в часі різних факторів (розмагнічує дія реакції статора СГ, згасання вільних струмів, дія АРЗ на СКЗ, наявність потужних навантажень та ін) зумовлює зміну струму перехідного процесу у довільний момент часу. Ці обставини ускладнюють розрахунок СКЗ у довільний час.

Для спрощення обчислення СКЗ у довільний час у інженерній практиці застосовуються простіші методи, засновані на застосуванні розрахункових і типових кривих. Криві є графічним відображенням функціональних залежностей між періодичною складовою СКЗ, часом перехідного процесу та електричною віддаленістю точки КЗ від джерела живлення.

Криві забезпечують швидке і просте виконання практичних розрахунків періодичної складової СКЗ в довільний момент часу I_{nt} охоплюють широкий діапазон потужностей турбо-і гідрогенераторів, коли синхронні генератори розрізняються тільки за типом системи збудження [7].

2.7 Розрахунок струмів несиметричних КЗ

У трифазних мережах СЕС найчастіше виникають несиметричні КЗ. Струми у пошкоджених фазах перевершують значення струмів непошкоджених фаз, а деяких випадках навіть перевищують трифазні СКЗ.

При однофазних, двофазних та інших несиметричних КЗ трифазна система втрачає симетричність, що призводить до необхідності проведення складніших розрахунків для кожної фази.

З метою спрощення обчислення струмів при несиметричних КЗ застосовується метод симетричних складових. До прийнятих раніше припущень та вимог додаються нові:

- 1) несиметрія виникає лише одному місці схеми, інша частина схеми залишається симетричною;
- 2) аналізуються та визначаються лише основні (перші) гармоніки струму та напруги;
- 3) у мережах з ефективно заземленою нейтраллю при напрузі 110 кВ та глухо заземленою нейтраллю напругою 110–220 кВ і вище, а також у мережах напругою 0,38–0,66 кВ розглядають усі види КЗ.

Відповідно до прийнятого методу симетричних складових трифазна несиметрична система, що представляється сукупністю трьох векторів, виражається у вигляді трьох симетричних підсистем прямої, зворотної та

нульової послідовностей. Фізичні явища у фазах кожної з цих підсистем подібні, тому можна скористатися однолінійними схемами цих послідовностей і здійснювати розрахунок лише однієї фази.

У симетричній підсистемі прямої послідовності порядок чергування фаз А, В, С. Вектори струмів у цій підсистемі надалі забезпечуються індексом прямої послідовності «1».

Підсистема зворотної послідовності також є врівноваженою, але з іншим порядком чергування фаз – А, С, В. Індекс векторів – «2».

Вектори підсистеми нульової послідовності збігаються між собою у напрямку та мають індекс «0». Підсистема є симетричною, але не врівноваженою.

Складові прямої, зворотної та нульової послідовностей дозволяють аналізувати та синтезувати будь-яку несиметричну трифазну систему. При аналізі процесу несиметричного КЗ виділяють одну з фаз, яка називається особливою, оскільки умови в ній відрізняються від умов інших фаз. Для спрощення математичного аналізу складових несиметричних КЗ поряд із прийнятими вище припущеннями вважають, що:

- струми симетричних складових пов'язані з однойменними симетричними складовими напруг;
- струми та напруги симетричних складових різних послідовностей відповідно до принципу суперпозиції не взаємодіють один з одним;
- кожен елемент СЕС має свій специфічний опір проходження струмів різних послідовностей.

У цьому випадку елементи ланцюга вважаються симетричними, що володіють симетричними складовими струму КЗ (наприклад, для фази А): прямий I_{A1} , зворотної I_{A2} і нульової I_{A0} послідовності.

ЕРС симетричного трифазного джерела живлення утворюють симетричну врівноважену систему векторів. При симетричній схемі короткозамкнутого ланцюга така система ЕРС може викликати тільки струм прямої послідовності,

оскільки напруги або ЕРС інших послідовностей згідно з прийнятими припущеннями відсутні.

Порушення симетрії у системі викликає поява несиметричних напруг та струмів. Струми всіх симетричних послідовностей утворюють у генераторі джерела живлення відповідні магнітні потоки, які викликають в обмотках складові ЕРС цих послідовностей. ЕРС зворотної та нульової послідовностей можна врахувати величиною падіння напруги в індуктивному опорі генератора. Тому можна припустити, що при будь-якому режимі генератор виробляє ЕРС тільки прямої послідовності. Тоді ЕРС зворотної та нульової послідовності генератора джерела живлення приймаються рівними нулю. Отже, несиметричні КЗ в СЕС можна аналізувати за еквівалентними однолінійними схемами заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Протікання струмів зворотної та нульової послідовностей слід розглядати як результат виникнення у точці КЗ напруг зворотної та нульової послідовностей.

Приймається такий порядок розрахунку несиметричних СКЗ.

1. Скласти схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей. Синхронні генератори щодо початкового значення несиметричного КЗ вводять у схему заміщення прямої послідовності як ЕРС $E_1 = E$.

Схема заміщення зворотної послідовності включає всі елементи розрахункової схеми. При цьому ЕРС зворотної послідовності відсутня ($E_2 = 0$). Опір зворотної послідовності трансформаторів, ПЛ і КЛ приймаються рівними опорам прямої послідовності ($x_2 = x_1 = x$).

Для складання схеми заміщення нульової послідовності попередньо слід виявити можливі шляхи циркуляції струмів нульової послідовності на кожному ступені напруги мережі, починаючи від місця КЗ [5,6]. Також необхідно врахувати такі особливості:

а) якщо обмотка трансформатора з боку точки КЗ з'єднана в «трикутник» або «зірку» із незаземленою нейтраллю, то сам трансформатор і наступні за ним

(у напрямку від точки КЗ) елементи не повинні вводитися до схеми заміщення нульової послідовності;

б) якщо обмотки трансформатора з'єднані за схемою «зірка/трикутник», причому обмотка, з'єднана в «зірку» із заземленою нейтраллю, звернена у бік точки КЗ, то схему заміщення нульової послідовності слід вводити тільки елементи, включені між точкою КЗ і трансформатором, і сам трансформатор;

в) у попередніх розрахунках ТКЗ можна орієнтуватися на середні відносини опорів нульової та прямої послідовностей для різних конструкцій ПЛ (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Співвідношення опорів нульової та прямої послідовностей

Конструкція ПЛ	x_0/x_1
Одноланцюгова лінія:	
без тросів	3,5
зі сталевими тросами	3,0
зі сталеалюмінієвими тросами	2,0
Дволанцюгова лінія:	
без тросів	5,5
зі сталевими тросами	4,7
зі сталеалюмінієвими тросами	3,0

2. Спростити отримані схеми заміщення та визначити їх еквівалентні опори $x_{\text{екв}}$, а також еквівалентну ЕРС прямої послідовності $E_{\text{екв}}$.

3. Визначити періодичну складову несиметричного СКЗ за формулою:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot \frac{E_{\text{екв}}}{(x_{\text{екв}1} + \Delta x^{(n)})}$$

де: n – вид несиметричного КЗ;

$m^{(n)}$ – коефіцієнт виду несиметричного КЗ;

$E_{\text{екв}}$ – еквівалентна ЕРС прямої послідовності;

$\Delta x^{(n)}$ – додатковий опір ($\Delta x^{(n)} = f(x_2, x_0)$)

Вирази та числові значення параметрів для розрахунку несиметричних СКЗ, що входять до формули, визначаються за табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення складових формули для визначення несиметричних ТКЗ

Розрахункова величина	Вид КЗ	
	Двофазне, n=2	Однофазне, n=1
$m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3
$\Delta x^{(n)}$	$x_{\text{екв}2}$	$x_{\text{екв}2} + x_{\text{екв}0}$

Отримані параметри СКЗ кожної точки КЗ для порівняння та зручності використання доцільно звести до підсумкової таблиці.

3. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ДІЛЯНКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вибрати і перевірити за відключною здатністю з урахуванням параметрів напруги, що відновлюється, вимикачі в схемі рис 3.1

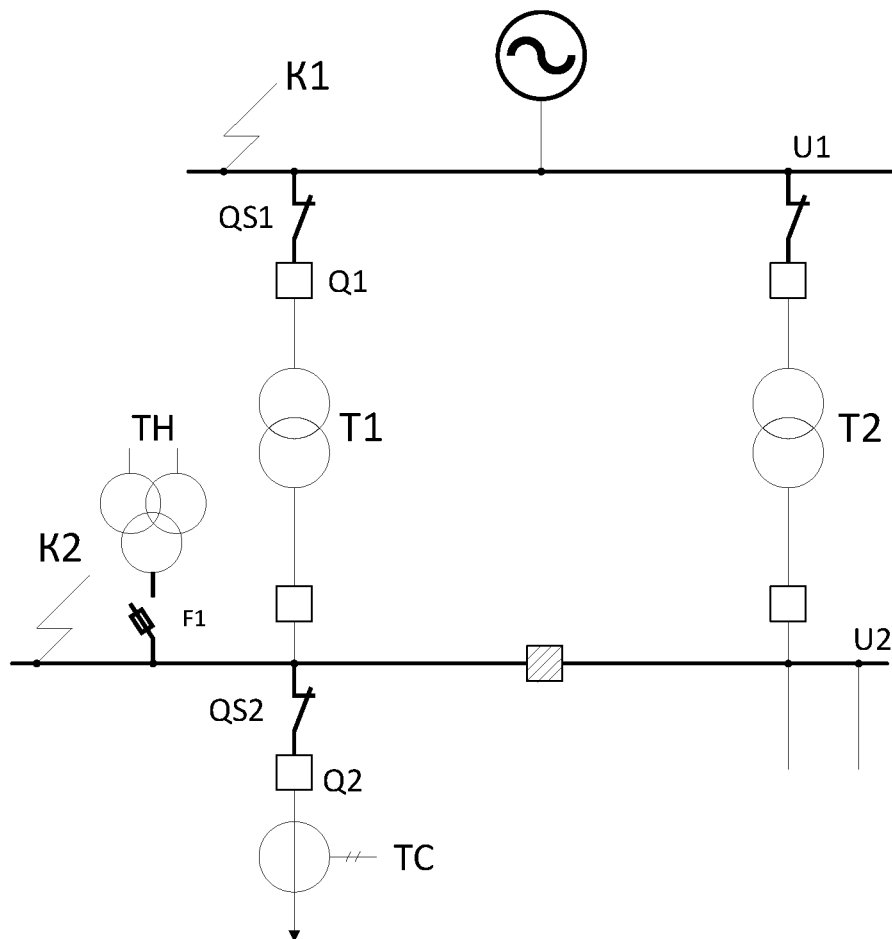


Рисунок 3.1 – Схема електропостачання відрізка енергосистеми

Для схеми (рис.3.1) розрахувати струми трифазного короткого замикання на шинах вищої напруги (точка К-1) та на шинах нижчої напруги (точка К-2) та обрати:

- 1) вимикач Q1 та його роз'єднувач QS1;
- 2) вимикач Q2, і його роз'єднувач QS2 в ланцюзі лінії відходу;
- 3) тип розподільного пристрою на нижчій напрузі;
- 4) трансформатор струму ТС;

- 5) трансформатор напруги ТН;
- 6) з'єднання силового трансформатора з розподільним пристроєм нижчої напруги.

Вихідні дані: відносний опір системи $X_{*c} = 0,04$ при $S_6 = 80$ МВА; $U_1 = 110$ кВ; $U_2 = 10,5$ кВ; трансформатори потужністю 16 МВА кожен, $U_k = 10,5$ %; струм лінії, що відходить $I_{\text{л}} = 250$ А; кількість ліній на одній секції нижчої напруги – 3. Інші вихідні дані вказуються при необхідності, тобто під час виконання розрахунку.

Розрахунок струмів короткого замикання. Секційний вимикач на шинах 6–10 кВ низьких підстанцій прийнято нормально відключеним для обмеження струмів короткого замикання та включається автоматично при відключенні одного із трансформаторів. Трансформатори працюють окремо. Складаємо схему заміщення та наводимо її нижче (рис. 3.2). Усі індуктивні опори призводять до довільно обраної базової потужності $S_6 = 80$ МВА; тобто для спрощення розрахунків можливо використовувати $S_6 = 100$ МВА, але ми цього робити не будемо $X_1 = X_{*c} = 0,04$ [8,9].

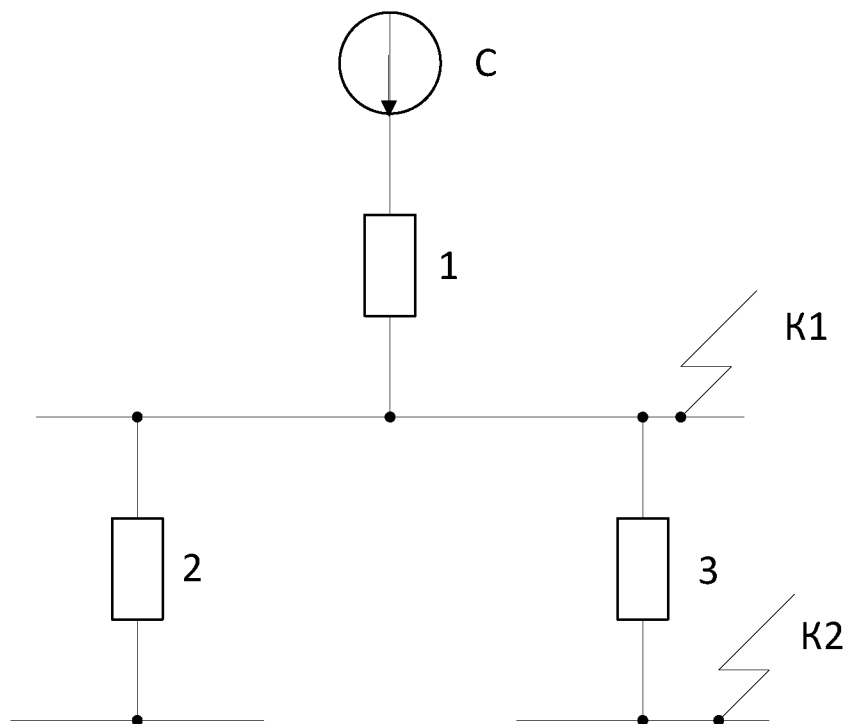


Рисунок 3.2 – Схему заміщення для розрахунку струмів КЗ

Розрахунковий опір трансформаторів:

$$X_2 = X_3 = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{н.т.}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{80}{10} = 0,84$$

$$X_4 = X_1 + X_3 = 0,04 + 0,84 = 0,88$$

Проаналізуємо трифазне коротке замикання на шинах 110 кВ (точка К-1), таким чином базовий струм знаходимо за формулою:

$$I_{6.110} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.1}} = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,4 \text{ кА}$$

Струм короткого замикання у початковий момент часу визначається як:

$$I_{п.о.} = \frac{I_{6.110}}{X_1} = \frac{0,4}{0,04} = 10 \text{ кА}$$

Оскільки джерелом струму короткого замикання є енергосистема.

Ударний струм (амплітудне значення) трифазного короткого замикання дорівнює:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{п.о.} = \sqrt{2} \cdot 1,608 \cdot 10 = 22,74 \text{ кА}$$

де: k_y – ударний коефіцієнт за Додатком Б.

Проаналізуємо трифазне коротке замикання на шинах 10,5 кВ (точка К-2), таким чином базовий струм знаходимо за формулою:

$$I_{6.10,5} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{cp,2}} = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,4 \text{ кА}$$

Струм короткого замикання у початковий момент часу визначається як:

$$I_{п.о.} = \frac{I_{6.10,5}}{X_4} = \frac{4,4}{0,88} = 5 \text{ кА}$$

Амплітудне значення ударного струму дорівнює:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{п.о.} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 5 = 12,87 \text{ кА}$$

До установки на лінії, що відходить, розглядається встановити вакуумний вимикач ВВЭ-10-20/630УЗ зі струмом відключення $I_{відкл} = 20 \text{ кА}$.

Так як $I_{п.т} = I_{п.о.} = 5 \text{ кА}$ (віддалене коротке замикання) менше струму відключення, то установка реактора на лінії, що відходить, не потрібна.

Надалі проведемо вибір вимикача Q1 та роз'єднувача QS1 у ланцюзі вищої напруги силового трансформатора.

Розрахункові робочі струми тривалого режиму, також зазначимо, що передбачається встановлення перспективного трансформатора, тобто на потужність вищу за 16 МВА, а саме 25МВА.

$$I_{норм.} = 0,7 \cdot \frac{S'_{ном.т.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = 0,7 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 91,85 \text{ А}$$

$$I_{max} = 1,4 \cdot \frac{S'_{ном.т.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = 1,4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 183,70 \text{ А}$$

Розрахунковим струмом короткого замикання є струм на шинах вищої напруги у точці К-1. Вимикачі розподільних пристроїв напругою 35 кВ і вище

обираються зазвичай однотипними для всіх ланцюгів даного розподільного пристрою та перевіряються по найважчим умовам короткого замикання. До установки приймаємо елегазовий вимикач типу ВГУ-110-40/3150У1 з власним часом відключення $t_{c.в.} = 0,025$ с. Привід до вимикача пневматичний. Розрахункове значення періодичної складової струму короткого замикання $I_{п.τ} = I_{п.о.} = 12,87$ кА (віддалене коротке замикання). розрахунковий час $τ = t_{з.мін} + t_{c.в.} = 0,01 + 0,025 = 0,035$ с.

Аперіодична складова струму короткого замикання для 1-ої гілки енергосистеми:

$$i_{a.τ} = \sqrt{2} \cdot I_{п.о.} \cdot e^{-\frac{τ}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 12,87 \cdot e^{-\frac{0,035}{0,02}} = 3,16 \text{ кА}$$

Постійна часу T_a взята з Додатку Б.

Завод-виробник гарантує вимикачу аперіодичну складову у струмі, що відключається, для часу $τ$:

$$i_{a.ном.} = \sqrt{2} \cdot \frac{\beta_{ном.}}{100} \cdot I_{відкл.} = \sqrt{2} \cdot 0,45 \cdot 40 = 25,46 \text{ кА}$$

де: $\beta_{ном.}$ – визначається за каталогом на вимикач або кривою рис. 3.1 для $τ = 0,035$ с.

Тепловий імпульс, що виділяється струмом короткого замикання:

$$B_k = I_{п.о.}^2 \cdot (t_{відкл.} + T_a) = 12,87^2 \cdot (0,155 + 0,02) = 28,98 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$t_{відкл.} = t_{р.з.} + t_{в.в.} = 0,1 + 0,055 = 0,155 \text{ с}$$

де: $t_{р.з.}$ – час дії основного захисту трансформатора, що дорівнює 0,1 с;

$t_{\text{в.в.}}$ – повний час відключення вимикача ВГУ-110-40/3150, що дорівнює 0,055 с.

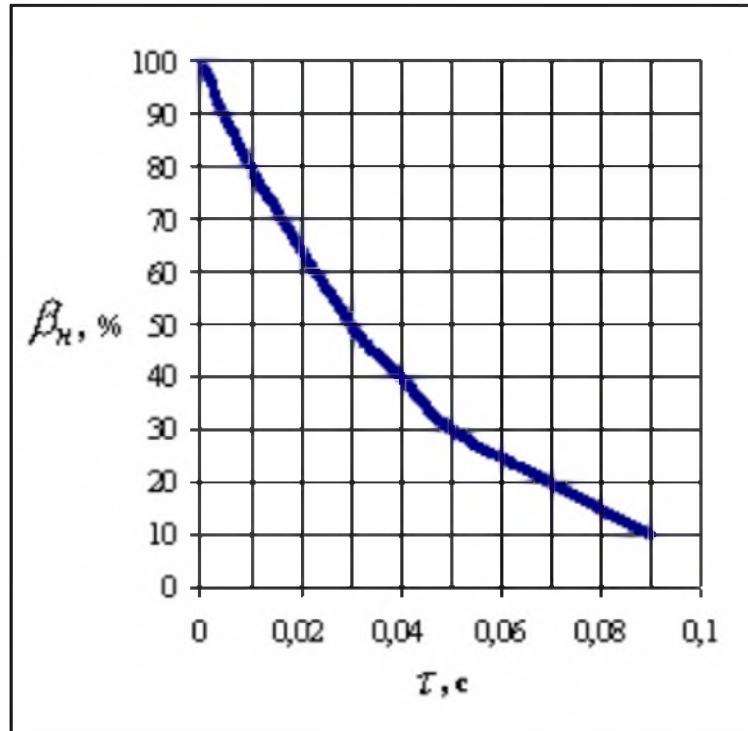


Рисунок 3.3 – Графік нормованого вмісту аперіодичної складової.

Усі розрахункові та каталожні дані зводимо в таблиці 3.1.

Обираємо за каталогом або довідником роз'єднувач типу РДЗ-1-110/630У1 з приводом ПДН-1.

Вибір вимикача лінії, що відходить Q2. На лінії, що відходить з робочим струмом $I_{\text{л}} = 250 \text{ А}$ приймаємо до установки вакуумний вимикач ВВЭ10-630-20 з приводом типу ПЕ. Власний час відключення вимикача $t_{\text{с.в.}} = 0,050 \text{ с.}$; розрахунковий час $\tau = t_{\text{з.мін}} + t_{\text{с.в.}} = 0,01 + 0,05 = 0,060 \text{ с.}$

Розрахункове значення періодичної складової струму короткого замикання становить:

$$I_{\text{п.}\tau} = I_{\text{п.о.}} = 5 \text{ кА}$$

Таблиця 3.1. – Каталогні дані та параметри вимикача та роз'єднувача
для Q1

Розрахункові параметри	Дані визначені за каталогом або довідником	
	Вимикач ВДУ-110-40/3150	Роз'єднувач РДЗ-1-110/630
$U_{\text{вст.}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$
$I_{\text{max}} = 183,7 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 3150 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$I_{\text{п.т}} = 12,87 \text{ кА}$	$I_{\text{відкл.}} = 40 \text{ кА}$	
$i_{\text{а.т}} = 3,16 \text{ кА}$	$I_{\text{а.ном}} = 25,5 \text{ кА}$	
$I_{\text{п.о.}} = 12,87 \text{ кА}$	$I_{\text{пр.скв.}} = 40 \text{ кА}$	
$i_{\text{уд}} = 22,74 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.скв.}} = 102 \text{ кА}$	$i_{\text{пр.с.}} = 80 \text{ кА}$
$B_{\text{к}} = 28,98 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{тер.}}^2 \cdot t_{\text{тер.}} = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{\text{тер.}}^2 \cdot t_{\text{тер.}} = 1450 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Аперіодична складова струму короткого замикання для 2-гої гілки енергосистеми:

$$i_{\text{а.т}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п.о.}} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot e^{-\frac{0,060}{0,02}} = 2,13 \text{ кА}$$

Постійна часу T_a взята з Додатку Б.

Завод-виробник гарантує вимикачу аперіодичну складову у струмі, що відключається, для часу τ :

$$i_{\text{а.ном.}} = \sqrt{2} \cdot \frac{\beta_{\text{ном}}}{100} \cdot I_{\text{відкл}} = \sqrt{2} \cdot 0,4 \cdot 20 = 11,31 \text{ кА}$$

де: $\beta_{\text{ном}}$ – визначається за каталогом на вимикач або кривою рис. 3.1 для $\tau = 0,06 \text{ с}$.

Тепловий імпульс, що виділяється струмом короткого замикання:

$$B_k = I_{п.о.}^2 \cdot (t_{відкл.} + T_a) = 5^2 \cdot (0,56 + 0,05) = 15,25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$t_{відкл.} = t_{р.з.} + t_{в.в.} = 0,5 + 0,055 = 0,555 \text{ с}$$

де: $t_{р.з.}$ – час дії максимального струмового захисту лінії, що дорівнює 0,5 с;

$t_{в.в.}$ – повний час відключення вимикача ВВЕ-10, що дорівнює 0,055 с.

Зводимо дані розрахунків до таблиці 3.2.

Розподільний пристрій на напрузі 10 кВ знижувальної підстанції приймається комплектним шаф КРУ серії КМ-1. Роз'єднувачі в КРУ вбудовані, пружного типу, завод-виробник гарантує їм необхідні параметри для роботи разом із вимикачем ВВЕ-10. Перевірка роз'єднувачів КРУ не проводиться [10,11].

Таблиця 3.2. – Каталогні дані та параметри вимикача для Q2

Розрахункові параметри	Дані визначені за каталогом або довідником
	Вимикач ВВЕ-10-630-20
$U_{вст.} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_{max} = 250 \text{ А}$	$I_{ном} = 630 \text{ А}$
$I_{п.т} = 5 \text{ кА}$	$I_{відкл.} = 20 \text{ кА}$
$i_{а.т} = 2,13 \text{ кА}$	$I_{а.ном} = 11,3 \text{ кА}$
$I_{п.о.} = 5 \text{ кА}$	$I_{пр.скв.} = 20 \text{ кА}$
$i_{уд} = 12,87 \text{ кА}$	$i_{пр.скв.} = 52 \text{ кА}$
$B_k = 15,25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} = 1600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Вибір трансформатора струму ланцюга, що відходить до лінії 10 кВ. У шафі КРУ КМ-1 встановлюється трансформатор струму типу ТЛК-10-5-0,5/10Р-300/5 рис. 3.2 [5].

Список необхідних вимірювальних приладів вибираємо по [4, 5]. На лінії 10 кВ встановлюються: амперметр, лічильник активної та реактивної енергії. Схема увімкнення приладів показана на рис. 3.3.



Рисунок 3.4 – Фото трансформатора струму ТЛК-10-5-0,5/10P-300/5

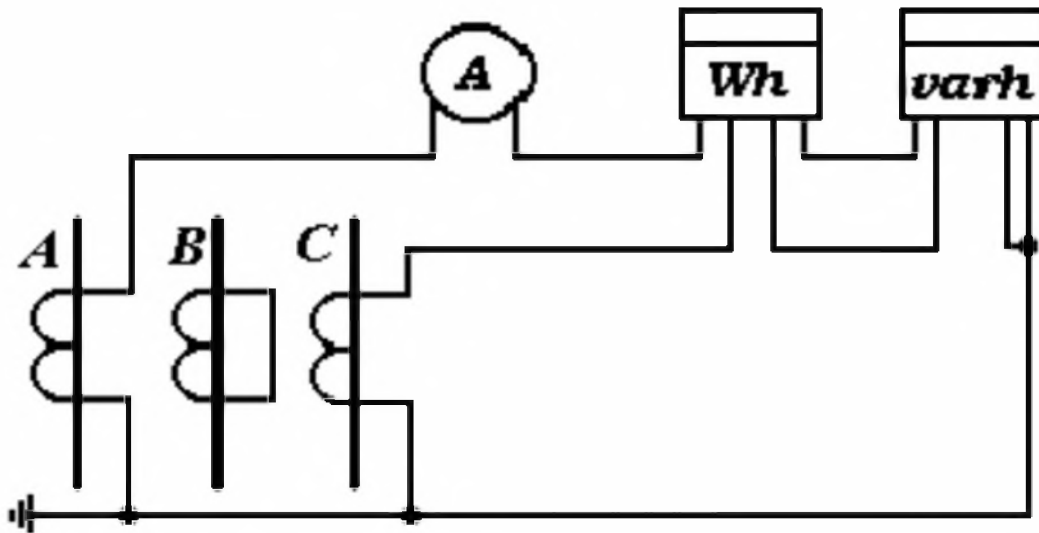


Рисунок 3.5 – Схема увімкнення приладів

Порівняння розрахункових та каталожних даних наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Каталожні дані та параметри вимикача трансформатора струму

Розрахункові дані	Паспортні дані
$U_{\text{вст.}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$
$I_{\text{max}} = 250 \text{ А}$	$I_{1\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$i_{\text{уд}} = 12,87 \text{ кА}$	$i_{\text{дин}} = 52 \text{ кА}$
$B_{\text{к}} = 15,25 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$(K_{\text{т}} \cdot I_{1\text{ном}}) \cdot t_{\text{т}} = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

Проводимо також, вибір трансформатора напруги на секції шин 10 кВ.

Таким чином, трансформатор напруги призначений для живлення котушок напруги вимірювальних приладів та контролю ізоляції в мережах з малими струмами замикання на землю. КРУ КМ-1 комплектується трансформаторами напруги ЗНОЛ.09-10 та НОЛ.08-10. Обираємо 3*ЗНОЛ.09-10, $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$, $S_{\text{ном}} = 75 \text{ ВА}$ у класі точності 0,5. Цей трансформатор напруги має дві вторинні обмотки, одна з яких включена в зірку і до неї приєднуються котушки напруги вимірювальних приладів, інша з'єднана в розімкнений трикутник і використовується для контролю ізоляції.

Трансформатор напруги встановлюється кожної секції збірних шин. До нього підключаються вимірювальні прилади всіх приєднань цієї секції

Далі проводимо вибір з'єднання силового трансформатора із КРУ-10 кВ. З'єднання може здійснюватися гнучким підвісним струмопроводом, шинним мостом або закритим комплектним струмопроводом.

Визначаємо розрахункові струми тривалих режимів режиму (передбачається встановлення перспективного трансформатора):

$$I_{\text{норм.}} \cong I_{\text{ном.т}} = 0,7 \cdot \frac{S'_{\text{ном.т.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 0,7 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 962 \text{ А}$$

$$I_{\text{max}} = 1,4 \cdot \frac{S'_{\text{ном.т.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 1,4 \cdot \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1924,5 \text{ А}$$

Обираємо переріз мідних шин за допустимим струмом, оскільки шинний міст, що з'єднує трансформатор із КРУ, невеликої довжини і знаходиться в межах підстанції.

Приймаємо односмугові шини $100 \times 10 \text{ мм}^2$, а саме смуга РСВ 4 метри, допустимий струм навантаження $I_{\text{доп}} = 1974 \text{ А}$.

За умови нагрівання в тривалому режимі шини проходять за співвідношенням:

$$I_{\text{max}} = 1924,5 < I_{\text{доп}} = 1974 \text{ А}$$

Перевіряємо шини на термічну стійкість:

$$q_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C} = \frac{\sqrt{15,25 \cdot 10^6}}{171} = 22,84 \text{ мм}^2$$

де: $B_{\text{к}}$ – тепловий імпульс, розрахований під час вибору вимикача Q2;

C – функція, значення якої для мідних шин дорівнює $171 \frac{\text{А} \cdot \text{с}^{\frac{1}{2}}}{\text{мм}^2}$.

$$q_{\text{min}} = 22,84 < 1000 \text{ мм}^2$$

Надалі перевіряємо шини на механічну міцність та визначаємо проліт l за умови, що частота власних коливань буде більшою за 200 Гц:

$$200 \geq \frac{173,2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{J}{q}}$$

З виразу, що наведено вище виводимо довжину прольоту:

$$l^2 \leq \frac{173,2}{200} \cdot \sqrt{\frac{J}{q}}$$

Якщо шини розташовані горизонтально, тоді отримуємо наступні значення для характеристик шинного мосту:

$$J = \frac{b \cdot h}{12} = \frac{1 \cdot 10^3}{12} = 83,3 \text{ см}^4$$

$$l^2 \leq \frac{173,2}{200} \cdot \sqrt{\frac{83,3}{10}} = 2,49 \approx 2,5 \text{ м}^2$$

$$l \leq \sqrt{2,5} = 1,58 \text{ м}$$

Приймаємо розташування шин горизонтальне, проліт 1,5 м, відстань між фазами = 1,0 м.

Визначаємо напругу у матеріалі шин від взаємодії фаз:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{розр.ф}} &= \frac{F_{\text{розр.}}}{10 \cdot W} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot \frac{l^2}{a \cdot W} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{12,87^2 \cdot 10^6 \cdot 1,5^2}{1 \cdot 16,6} = \\ &= 0,03 \text{ Мпа} \end{aligned}$$

$$\text{Де: } W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{1 \cdot 10^2}{6} = 16,6 \text{ см}^3$$

Після розрахунку зводимо отриманий параметр та порівнюємо його з напругою у матеріалі, що витримується шиною максимально (допустимо) $\sigma_{\text{доп.}} = 90 \text{ Мпа}$, таким чином, шини механічно міцні.

Також, проводимо вибір ізолятора для нашої ділянки електричної мережі та системи розподілу. Обираємо опорні штирьові ізолятори зовнішньої

установки ОНШ-10-5-1УХЛ1та наводимо його основні технічні параметри:

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}, F_{\text{розр.}} = 5000 \text{ Н.}$$

$$F_{\text{доп}} = 0,6 \cdot F_{\text{розр.}} = 0,6 \cdot 5000 = 3000 \text{ Н}$$

$$F_{\text{розрах.}} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot i_y^2 \cdot \frac{l}{a} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 12,87^2 \cdot \frac{1,5}{1} = 43 \text{ Н}$$

Таким чином перевіряємо механічну міцність за співвідношенням:

$$F_{\text{розрах.}} = 43 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3000 \text{ Н}$$

Після детального аналізу та розрахунку доведено, що ізолятори проходять за механічною міцністю та підходять для експлуатації за технічними параметрами системи [9-11].

ВИСНОВКИ

При написанні дипломного проекту було визначено та обґрунтовано наступні моменти розрахунків комутаційного обладнання для встановлення їх в електричну мережу, що працюватимуть в різних режимах роботи, а саме:

1) розглянуто основні питання вибору електричних апаратів та провідників, а саме:

– принципи вибору комутаційного обладнання

– розрахункові умови щодо вибору апаратів при тривалому режимі роботи та режимі короткого замикання;

2) досліджено методику щодо обґрунтування перевірки електротехнічного устаткування за допомогою визначення струмів короткого замикання в електричних мережах та системах розподілу електричної енергії;

3) розраховано та обрано електричні апарати для ділянки електричної мережі для коректного та безперебійного спрацювання в різних режимах роботи енергосистеми та електроустаткування в цілому.

Таким чином, під час розрахунків основну увагу приділено розрахунку короткого замикання одно- та трифазного виду. Такий підхід для розрахунку апаратів комутації та захисту електричної мережі є найбільш прийнятним, тому що ми розглядаємо найжорсткіші умови роботи енергосистеми, що з технічної точки зору є надійним осередком правильної роботи систем постачання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сазикін В. Г. Проектування систем електропостачання АПК. Кн. 4. Принципи та технологія: навчальний посібник / В. Г. Сазикін КубДАУ ім. І.Т. Трубіліна. – Краснодар, 2019. - 199 с.
2. Чунихин А. А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с
3. Клименко Б.В. К49 Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с. – ISBN 978-617-669-015-3.
4. Большая книга электрика. Самое полное иллюстрированное руководство/ В. М. Жабцев. – Москва: Издательство АСТ, 2017. – 208 с.
5. Гаряжа В. М. Конспект лекцій з курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (частина 1) (для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. М. Гаряжа, А. О. Карюк; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 149 с.
6. Набатов, К.А. Високовольтні вакуумні вимикачі розподільних пристроїв: навчальний посібник / К.А. Набатов, В.В. Афонін. - Тамбов: Вид-во ГОУ ВПО ТДТУ, 2010. - 96 с. – 75 екз. – ISBN 978-5-8265-0961-6.
7. Сазикін В.Г. С15 Електромагнітні перехідні процеси в електроенергетичних системах: навчальний посібник/В.Г. Сазикін, А.Г. Кудряків. - 2-ге вид., Виправ. та дод. – Краснодар: КубДАУ, 2017. - 255 с. – ISBN 978-5-9907812-3-8.
8. Гайсаров Р.В., Лисовская И.Т. Выбор электрической аппаратуры, токоведущих частей и изоляторов: Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 59 с.
9. Електричні системи та мережі: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Кирик, С.В. Казанський, Т.Л. Кацадзе, О.Б. Бесараб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 92 с.

10. Методичні вказівки до практичних занять і розрахункової роботи з дисципліни «Електрична частина станцій та підстанцій. Частина 1» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітнього ступеня «бакалавр» денної та заочної форм навчання / уклад. Г.О. Шеїна. – Покровськ : ДонНТУ, 2020. – 36 с.

11. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Електричні системи та мережі» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання / уклад. Н.Л. Тютюнник, Д.О. Кардаш. – Покровськ : ДонНТУ, 2018. – 75 с

ДОДАТОК А.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1. Загальні положення

1.1. Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету з нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства па та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів»), затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 р. № 4.

1.2. Усі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

1.3. До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

- 1) медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;
- 2) вступний та первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;
- 3) навчання безпечним методам та прийомам праці;
- 4) перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;

5) при ремонті та обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

1.4. Електрику необхідно знати та виконувати вимоги інструкції з охорони праці під час виконання робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій з роботи з ручним інструментом, електричним інструментом та стрем'янками.

1.5. Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів та Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

1.6. Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих та небезпечних виробничих факторів:

- 1) падіння з висоти;
- 2) ураження електричним струмом;
- 3) підвищена напруженість електричного поля;
- 4) підвищена запиленість повітря робочої зони;
- 5) підвищений рівень вібрації;
- 6) недостатня освітленість робочої зони;
- 7) фізичні перевантаження;
- 8) нервно-психічні перевантаження.

1.7. Електрику при виконанні ремонту та обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

- 1) напівкомбінезон бавовняний – на 12 місяців;
- 2) рукавички на – 3 місяці;
- 3) черевики шкіряні на - 24 місяці;
- 4) калоші діелектричні - чергові;
- 5) рукавиці діелектричні - чергові;
- 6) коврики діелектричні - чергові.

1.8. Електрик при ремонті та обслуговуванні електрообладнання зобов'язань:

- 1) тримати в чистоті та порядку своє робоче місце;
- 2) дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
- 3) вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;
- 4) вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;
- 5) знати та виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежної захисту та виробничої санітарії.
- 6) негайно повідомляти свого безпосереднього керівника про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю та здоров'ю людей;
- 7) знати терміни випробування захисних засобів та пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби та пристосування з простроченим терміном перевірки;
- 8) виконувати лише доручену роботу;
- 9) дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;
- 10) знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головні та запасні виходи, шляхи евакуації у разі аварії або пожежі;
- 11) знати номери телефонів медичної установи (103) та пожежної охорони (101).

1.9. Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для довкілля, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

1.10. На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напої та інші речовини, що надають наркотичну дію на організм людини.

1.11. З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонезбезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог:

- 1) не можна залучати до роботи сторонніх осіб;
- 2) не починати роботу у разі відсутності умов для її безпечного виконання;
- 3) виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;
- 4) виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це не відноситься до посадових обов'язків;
- 5) не торкатися неізольованих чи пошкоджених проводів;
- 6) не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

1.12. Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні чи відруєнні.

1.13. Дотримуватися правил особистої гігієни:

- 1) верхній одяг, головний убір та інші особисті речі слід залишати у гардеробі;
- 2) працювати в чистій спецодязі;
- 3) приймати їжу у призначеному для цього місці.

1.14. Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективної захисту, первичними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

1.15. Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну та кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Одягнути спецодяг, провести огляд та підготовку робочого місця, прибрати лишні предмети.

2.2. Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб та звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону та встановити знаки безпеки.

2.3. Переконатися у достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

2.4. Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконатися в наявності та справності ЗІЗ (засобів індивідуальної захисту) та попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, ковриків тощо).

2.5. Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, у відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття та у своєчасності проходження випробувань інструменту.

2.6. Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

2.7. Виявивши недоліки та порушення з питань електричної та пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

3. Вимоги безпеки під час виконання робіт

3.1. Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення зі строком перевірки, працівник не отримує допуску до роботи.

3.2. Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- 1) зі зняттям напруги;
- 2) без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;
- 3) без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

3.3. Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати на це відповідний запис у посвідченні про перевірку знань.

3.4. Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноособово, необхідно мати III групу з електробезпеки.

3.5. Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- 1) оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються у порядку поточної експлуатації;
- 2) проводити підготовку робочих місць;
- 3) допуск на роботу;
- 4) здійснювати контроль за виконанням робіт;
- 5) переводити на інше робоче місце;
- 6) установлювати перерви у роботі та її закінчення.

3.6. Для підготовки робочого місця до роботи, що вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, у певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

- 1) виконати необхідні відключення та вжити всіх заходів, що виключають хибне або самовільне включення комутаційної апаратури;
- 2) розвісити заборонні плакати на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;
- 3) провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;
- 4) встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);
- 5) встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на цих огорожах плакати безпеки;
- 6) в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

3.7. Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

3.8. При знятті та встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні перчатки, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

3.9. Роботу з використанням стремінок потрібно проводити вдвох, один із працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках чи інших предметах забороняється. При установці приставних стремінок на балках, елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню та нижню частину стреміанки на конструкціях.

3.10. Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими стреміанками забороняється.

4. Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

4.1. Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

4.2. Навести порядок на робочому місці, прибрати у спеціальні місця деталі, матеріал, сміття та відходи.

4.3. Прибрати у відведене місце весь інструмент та пристосування.

4.4. Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, ретельно помити руки.

4.5. Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежної захисту.

4.6. Повідомити свого безпосереднього керівника про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це у оперативному журналі.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1. У разі пожежі:

1) виключити електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

2) повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а за його відсутності іншій посадовій особі;

3) приступити до ліквідації осередку загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

5.2. Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

5.3. Слід швидко відключити механізми та пристрої:

- 1) у разі раптового відключення електроенергії;
- 2) якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;
- 3) у разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;
- 4) у разі іскріння;
- 5) при найменших ознаках загоряння, появі диму, запаху гару;
- 6) якщо з'явився незнайомий шум.

5.4. У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання та повідомити свого прямого керівника.

5.5. Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей та предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал тощо). п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом із ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

5.6. При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

ДОДАТОК Б.

ЗНАЧЕННЯ ПОСТІЙНОГО ЧАСУ ЗГАСАННЯ АПЕРІОДИЧНОЇ
СКЛАДОВОЇ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА
УДАРНОГО КОЕФІЦІЄНТА

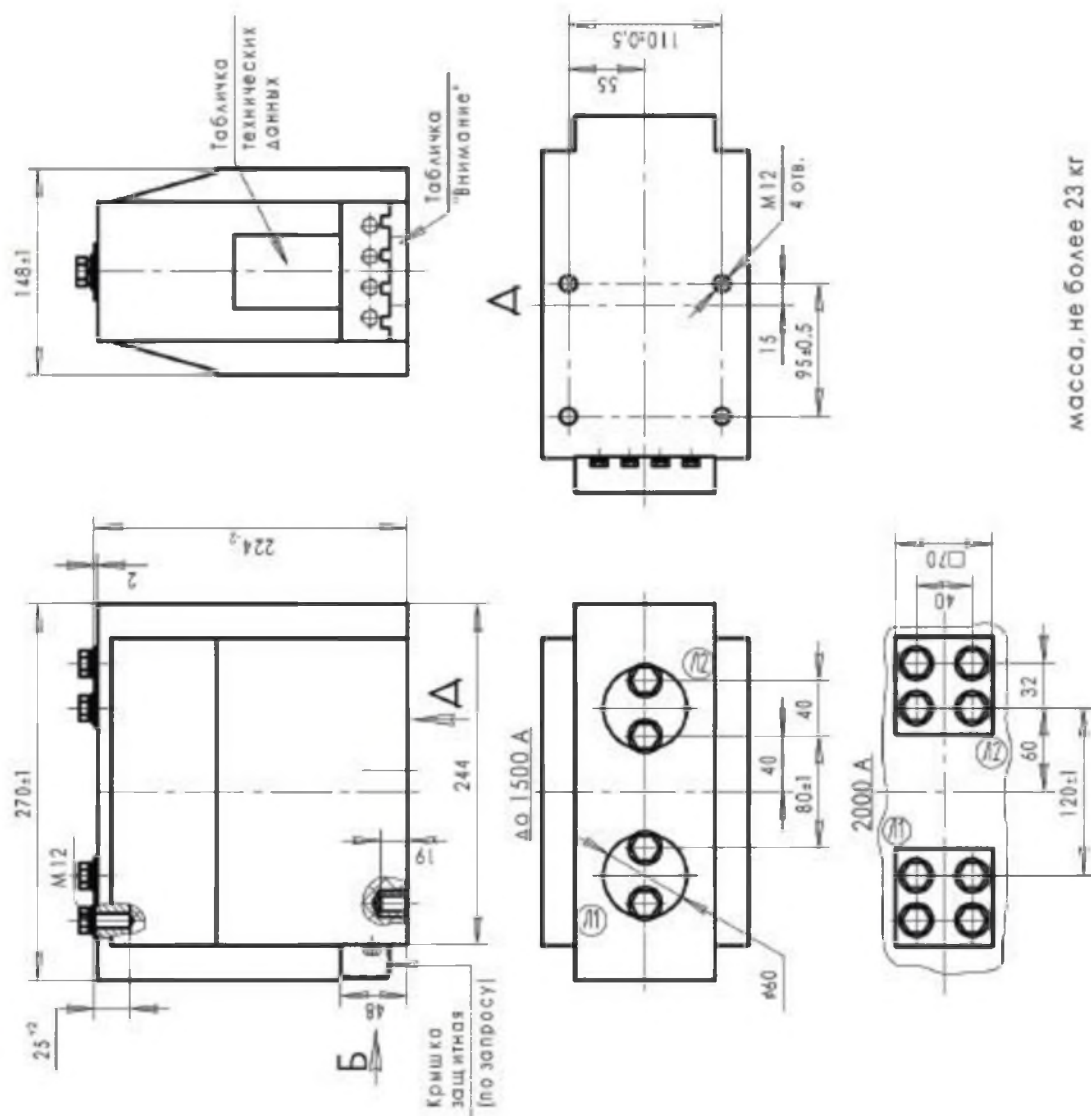
Елементи та частини енергосистеми	T_a, c	k_y
Турбогенератори:		
12...60 МВт	0,16...0,25	1,94...1,955
100...1000 МВт	0,4...0,54	1,975...1,98
Блоки, що складаються з турбогенератора потужністю 60 МВт та трансформатора (на стороні ВН), при номінальній напрузі генератора:		
6,3 кВ	0,2	1,95
10 кВ	0,15	1,935
Блоки, що складаються з турбогенератора і трансформатора, що підвищує, при потужності генераторів:		
100...200 МВт	0,26	1,965
300 МВт	0,32	1,977
500 МВт	0,35	1,983
800 МВт	0,3	1,967
Система, пов'язана з шинами, де розглядається КЗ, повітряними лініями напругою:		
35 кВ	0,02	1,608
110...150 кВ	0,02...0,03	1,608...1,717
220...330 кВ	0,03...0,04	1,717...1,78
550...750 кВ	0,06...0,08	1,85...1,895
Система, пов'язана із збірними шинами 6...10 кВ, через трансформатори потужністю:		
80 МВА в одиниці й вище	0,06...0,15	1,85...1,935
32...80 МВА в одиниці	0,05...0,1	1,82...1,904
5,6...32 МВА в одиниці	0,02...0,06	1,6...1,82
Гілки, захищені реактором з номінальним струмом:		
1000 А і вище	0,23	1,956
630 А і нижче	0,1	1,904
Розподільчі мережі 6...10 кВ	0,01	1,369

ДОДАТОК В.

ГАБАРИТНІ РОЗМІРИ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

ТЛК-10-5

Аналоги: ТЛО-10-М1, ТОЛ-10-І-2, 4-6-8, ТОЛ-СЭЦ-10-11, 12-13, 21-22, 23, ТОЛ-НТЗ-10-01А



ДОДАТОК Г.
ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРАЛЕРА
до дипломної роботи студента групи ЕЛК-18
СІЛЬЧЕНКА Ярослава Павловича

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____