

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Запорізький національний технічний університет

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до лабораторних робіт з дисципліни**  
**«Основи електроенергетики»**  
**для студентів усіх форм навчання спеціальності**  
**141 «Електротехніка та енергетика»**

**2016**

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Основи електроенергетики» для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 «Електротехніка та енергетика» /Укл.: Д.О. Літвінов, Г.В. Дьомічева. – Запоріжжя:, ЗНТУ, 2016. – 42 с.

Укладачі: Д.О. Літвінов, ст. викладач  
Г.В. Дьомічева, зав.лаб.

Рецензент: В. Г. Савельєв, доцент.

Відповідальний за випуск: Д.С. Яримбаш, доцент, д.т.н.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
«Електричних машин»  
Протокол № 8  
від 06.04.2016 р.

Рекомендовано до видання  
НМК Електротехнічного  
факультету  
Протокол №2  
від 11.04.2016 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
<b>1 Лабораторна робота №1</b> Розподіл напруги по елементам конструкції гірлянди підвісних ізоляторів електроустановки....	5
<b>2 Лабораторна робота №2</b> Дослідження розрядної напруги ізоляторів та апаратів при змінній та постійній напругах.....	10
<b>3 Лабораторна робота №3</b> Визначення напруженості електричного поля на поверхні опорного ізолятора в електроустановках.....	14
<b>4 Лабораторна робота №4</b> Розрахунок струмів трифазного короткого замикання в електроустановках змінного струму з напругою вище 1 кВ.....	19
<b>5 Лабораторна робота №5</b> Вибір основного електрообладнання для схеми електричної станції. Характеристики захисних розрядників.....	32
<b>Перелік посилань</b> .....	38
<b>Додаток А</b> Типові криві змінення періодичної складової струму КЗ.....	39
<b>Додаток Б</b> Основні формули для перетворення схем та визначення струморозподілу.....	40
<b>Додаток В</b> Приклад титульного листа звіту з лабораторних робіт	42

## ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Основи електроенергетики» містять роботи з таких основних розділів, як енергетична система, електричні мережі, схеми електричних з'єднань станцій і підстанцій, основне електрообладнання на електричних станціях та підстанціях, короткі замикання в електричних системах, релейний захист трансформаторів, генераторів та двигунів.

Мета лабораторних робіт - надати допомогу студентам в освоєнні та закріпленні теоретичних знань, в придбанні практичних навичок дослідження та розрахунку розрядних напруг, розрахунку коротких замикань в електричних системах, дослідженні розподілу напруги по елементам ізоляційних конструкцій, виборі основного електрообладнання для електричних схем в енергосистемі.

На першому ввідному занятті викладач, який повинен мати не менше IV-ої групи по електробезпеці, проводить для студентів інструктаж із питань охорони праці і техніки безпеки та знайомить їх з графіком виконання лабораторних робіт.

Послідовність виконання кожної роботи визначається її змістом і вказується докладно по окремим роботам.

Для успішного виконання лабораторної роботи студенту необхідно:

- вивчити мету роботи, її зміст, порядок виконання на лабораторному стенді;
- підготувати необхідні схеми та таблиці;
- вивчити відповідні розділи рекомендованої літератури;
- пройти співбесіду з керівником, який буде проводити лабораторні заняття, представити звіт по раніше виконаним роботам, одержати дозвіл на виконання наступної роботи;
- при виконанні робіт студенти повинні суворо дотримуватися правил з техніки безпеки та охорони праці.

Після закінчення дослідів студент повинен показати керівнику отримані результати і привести до порядку своє робоче місце.

По одержаним та розрахунковим дослідним даним кожний студент оформлює звіт з лабораторної роботи і захищає його, відповідаючи на поставлені питання.

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## Розподіл напруги по елементах конструкції гірлянди підвісних ізоляторів електроустановки

### 1.1 Мета роботи

Оволодіти методикою та практичними навичками визначення розподілу напруги уздовж гірлянди підвісних лінійних ізоляторів.

### 1.2 Завдання

1.2.1 Вивчити та зобразити електричну схему установки на рис. 1.1 та принцип її роботи. Вивчити призначення елементів на схемі.

1.2.2 Із дослідів визначити значення напруги у лінії  $U_{л1}$ ,  $U_{л2}$ , ...,  $U_{л10}$  для гірлянди із 10 ізоляторів типу ПС-4,5 без екрану та із захисним екраном (у вигляді кільця).

1.2.3 Розрахувати напругу між кулями  $U_k$ , а також коефіцієнти неоднорідності електричного поля ізоляторів  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{10}$ .

1.2.4 Знайти величини напруг на кожному ізоляторі гірлянди  $U_1, U_2, \dots, U_{10}$ .

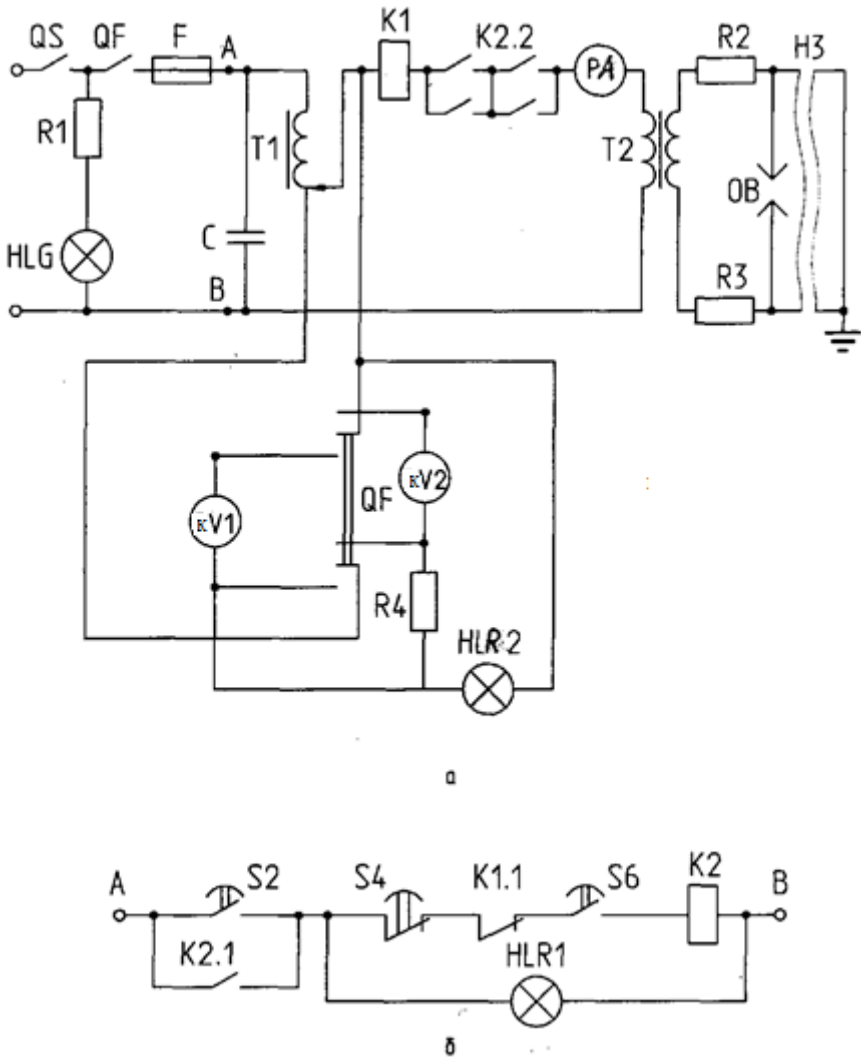
1.2.5 Побудувати графіки розподілу напруги по ізоляторам гірлянди з екраном і без екрану  $U = f(n)$ .

1.2.6 Зробити аналіз та висновки по роботі.

### 1.3 Методичні вказівки

1.3.1 Одним з практичних методів визначення розподілу напруги уздовж гірлянди ізоляторів по її висоті є метод розрядника з кульовими електродами.

Розрядник з незмінною відстанню між кулями встановлюється по черзі на всіх 10 елементах гірлянди (ізоляторах).



а- принципова ; б-розгорнута;

**Рисунок 1.1-** Електрична схема установки для вимірювання розрядної напруги уздовж гірлянди ізоляторів

Змінна регульована напруга, яка підводиться до нижньої частини гірлянди (до проводу), підвищується за допомогою ЛАТРа Т1, таким чином, щоб кожного разу відбувався розряд (дуга) між кульовими електродами.

1.3.2 Роботи у середині огороження проводити тільки з дозволу викладача, застосовуючи засоби основного індивідуального захисту. Відлік ізоляторів вести від проводу, який знаходиться під напругою. Заземливши один високовольтний вивід випробувального трансформатора, встановити штангу із кульовим розрядником на 1-му ізоляторі гірлянди.

1.3.3. Вийти за межі огороження й щільно закрити двері (повинен спрацювати (замкнутися контакти) блокувний вимикач S6).

1.3.4 Отримавши дозвіл викладача, зняти заземлення з високовольтного виводу випробувального трансформатора Т2. Замкнути рубильник QS, включити автомат QF, подати живлення на котушку проміжного реле К2, за допомогою кнопки S2. Ручка регулятора ЛАТРа повинна знаходитися у крайньому положенні (на нулю)!

Повільно підіймаючи напругу за допомогою ЛАТРа, визначити напругу на гірлянді  $U_d$  за допомогою кіловольтметра кV1 або кV2, при якій виникає розряд на кульових електродах.

Не слід допускати тривалого розряду на кульовому розряднику!

Далі плавно знизити напругу до нуля після розряду розрядника.

Для підвищення якості вимірювань кожний вимір проводити тричі.

1.3.5 У зворотній послідовності відключити автомат QF та рубильник QS. Накласти за допомогою рухомих ножів заземлення на високовольтний вивід випробувального трансформатора, відкрити двері огороження й переставити кульовий розрядник (при відкритій двері огороження) на наступний ізолятор гірлянди (виконати 10 змінень).

1.3.6 Встановити захисний екран на нижню частину гірлянди (біля проводу) та повторити п. 1.3.2 – 1.3.5. На основі дослідних даних та розрахунків заповнити табл. 1.1

Таблиця 1.1 - Розподіл напруги уздовж гірлянди ізоляторів

№ ізолятора	Виміряно $U_{л}$				Розраховано			Примітки
	1	2	3	сер.	$U_{к}$	$\alpha$	$U$	
	кВ				кВ	-	кВ	
1								$U_{г} = \dots$ кВ  без екрану
2								
3								
4								
..								
...								
10								з екраном
1								
....								
10								

#### 1.4 Формули для розрахунку

1.4.1 Розрахункова напруга пробою кульового розрядника однакова для кожного ізолятора гірлянди

$$U_{к} = \frac{1}{\frac{1}{U_{л1}} + \frac{1}{U_{л2}} + \dots + \frac{1}{U_{л10}}}, \text{ кВ} \quad (1.1)$$

де  $U_{л1}, U_{л2}, \dots, U_{л10}$  - напруга в лінії, при якій відбувається

розряд у кульовому розряднику на першому, другому, ..., десятому ізоляторі

1.4.2 Коефіцієнти неоднорідності електричного поля кожного ізолятора гірлянди:

$$\alpha_1 = \frac{U_k}{U_{л1}}; \alpha_2 = \frac{U_k}{U_{л2}}; \dots; \alpha_{10} = \frac{U_k}{U_{л10}}, \quad (1.2)$$

перевірка

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{10} = 1$$

1.4.3 Якщо гірлянда розрахована на напругу  $U_G$  (задану викладачем для в/в лінії 6, 10, 35, 110, 220 кВ), то розрахункова напруга на кожному ізоляторі:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_G \cdot \alpha_1, \text{ кВ} \\ U_2 &= U_G \cdot \alpha_2, \text{ кВ} \\ &\dots \\ U_{10} &= U_G \cdot \alpha_{10}, \text{ кВ} \end{aligned} \quad (1.3)$$

## 1.5 Зміст звіту

1.5.1 Мета роботи

1.5.2 Схема рис.1.1

1.5.3 Результати дослідів і розрахунків, табл.1.1.

1.5.4 Графіки  $U=f(n_i)$  для гірлянди без екрану і з екраном будуються на одному рис.1.2.

1.5.5 Висновки

## 1.6 Контрольні запитання

1.6.1 Дати визначення ЛЕП. Головні елементи повітряної ЛЕП.

1.6.2 Чому електроенергетика в основному базується на трифазному змінному струмі?

1.6.3 Класифікація ЛЕП.

1.6.4 Технічні та економічні вимоги до провідникових матеріалів, з яких виготовляються провoda повітряних ліній ЛЕП.

1.6.5 Класифікація опор повітряних ліній.

1.6.6 За якими критеріями визначаються найменші ізоляційні відстані по повітрю на опорах повітряних ліній ЛЕП?

1.6.7 Схема заміщення гірлянди ізоляторів.

1.6.8 Можливі шляхи перекриття ізоляції на опорах повітряних ліній. по гірлянді ізоляторів.

1.6.9 Дати визначення напруги перекриття ізоляторів. Які фактори впливають на її значення?

1.6.10 Особливості ізоляції мереж на дерев'яних опорах (переваги та недоліки).

## 1.7 Література

Коспект лекцій з дисципліни «Основи електроенергетики»

[1], с. 86-103;

[6], с. 86-103;

[7], с. 107-149;

[8], с. 62-64, 68-69, 70-75;

[9], с. 410-418; [10], с.141-153, 158-160.

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### Дослідження розрядної напруги ізоляторів та апаратів при змінній та постійній напругах

#### 2.1 Мета роботи

Оволодіти методикою і практичними навичками вимірювання розрядної напруги по поверхні ізоляторів та у повітряному проміжку між електродами.

#### 2.2 Завдання

2.2.1 Вивчити електричну схему установки та обладнання.

2.2.2 Визначити температуру  $t^{\circ}\text{C}$ , тиск  $P$  й абсолютну вологість повітря  $\gamma$ .

2.2.3 Розрахувати відносну щільність повітря  $\delta$ .

2.2.4 Розрахувати коефіцієнт питомої поправки на вологість повітря  $K'_{\gamma}$ .

2.2.5 Визначити напругу початку корони  $U_0$ .

2.2.6 Визначити напругу появи ковзного розряду  $U_k$ .

2.2.7 Визначити напругу появи коронного розряду та напругу перекриття по поверхні ізолятора у сухому стані  $U_{сх}$ .

2.2.8 Визначити розрядну напругу по повітрю між електродами  $U_p$ .

2.2.9 Розрахувати ступінь нерівномірності розподілу електричного поля  $\mathcal{E}$  по поверхні ізолятора.





2.4.4 Напряга по'явлення ковзного розряду

$$U'_k = \sqrt{2} \frac{U_k}{\delta}, \text{кВ} \quad (2.4)$$

2.4.5 Розрядна напруга по поверхні ізолятора у сухому стані

$$U'_{cx} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{cx}}{\delta} K'_\gamma, \text{кВ} \quad (2.5)$$

2.4.6 Розрядна напруга по повітрю між електродами

$$U'_p = \sqrt{2} \cdot \frac{U_p}{\delta}, \text{кВ} \quad (2.6)$$

2.4.7 Ступінь нерівномірності електричного поля ізолятора

$$\varepsilon = \frac{U'_{cx}}{U'_p} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

## 2.5 Зміст звіту

2.5.1 Мета роботи.

2.5.2 Результати вимірювань і розрахунків, табл. 2.1 і 2.2.

2.5.3 Графіки  $U'_{cx} = f(S)$  і  $U'_p = f(S)$  будуються на *одному рис. 2.1* для змінної напруги ( $\sim U$ ), для постійної напруги позитивної  $=U(+)$  полярності і постійної напруги негативної полярності  $=U(-)$ .

2.5.4 Висновки.

## 2.6 Контрольні запитання

2.6.1 Класифікація лінійних та апаратних ізоляторів.

2.6.2 Розряд по поверхні в однорідному полі

2.6.3 Розряд по поверхні в різконеоднорідному полі.

2.6.4 Розряд уздовж змоченій дощем, забруднений і зволоженої поверхні.

2.6.5 Пояснити фізичний процес появи ковзних розрядів.

2.6.6 Які приймаються міри для збільшення напруги перекриття опорних і прохідних ізоляторів?

2.6.7 Як діють атмосферні умови (тиск, температура, волога) на величину розрядної напруги по поверхні ізолятора?

2.6.8. Поясніть, чому:  $U_p > U_{cx}$ ?

2.6.9 Дати визначення питомої поверхневої ємності.

2.6.10 Пояснити фізичний процес появи трісків на поверхні ізоляторів.

## 2.7 Література

Коспект лекцій з дисципліни «Основи електроенергетики»

[1], с. 65-85;

[6], с. 68-73, 75-76, 81-85;

[7], с. 117-128; [8], с. 43-46;

[8], с. 89-94; [10], с. 98-102, 103-108, 221.

## 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### Визначення напруженості електричного поля на поверхні опорного ізолятора в електроустановках

#### 3.1 Мета роботи

Оволодіти методикою й практичними навичками визначення розподілу електричних потенціалів і напруженості уздовж поверхні опорного ізолятора.

#### 3.2 Завдання

3.2.1 Вивчити електричну схему установки на рис. 3.1. Вивчити елементи електричної схеми та їх призначення.

3.2.2 Визначити розрядну напругу  $U_{\kappa}$  між кулями.

3.2.3 Визначити потенціали  $U_2$  на поверхні ізолятора під час дослідів.

3.2.4 Розрахувати коефіцієнт нерівномірності електричного поля  $\alpha$  і потенціали на поверхні ізолятора під час експлуатації  $U$  по (3.2) й (3.3).

3.2.5 Побудувати графік залежності  $U = f(s)$ .

3.2.6 Знайти напруженість електричного поля на поверхні ізолятора  $E$  по (3.4).

3.2.7 Побудувати графік залежності  $E = f(s)$ .

3.2.8 Змінити глибину занурення металевого стрижня в ізолятор й повторити досліди.

3.2.9 Дати аналіз отриманих залежностей і зробити висновки.

### 3.3 Методичні вказівки

3.3.1 Відстань між кулями розрядника встановлена постійною - у процесі досліду не змінюється. На ізоляторі встановлено 2 кільця, верхнє - рухоме, нижнє - нерухоме, заземлене. Одна з куль розрядника постійно приєднана до рухомого кільця, а друга - до заземленої основи ізолятора.

В першому досліді електрично з'єднати рухолим затискачем верхній цоколь ізолятора з верхнім рухолим кільцем. Збільшити напругу  $U_2$  до пробоя між кулями. В цьому досліді  $U_2 = U_k$ .

3.3.2 Від'єднати затискач від верхнього кільця. Переміщати верхнє кільце вниз через 15 мм. Для кожного положення кільця визначити напругу  $U_2$ , при якій починається розряд між кулями у вигляді корони. Останній замір виконується на відстані між кільцями  $S = 5$  мм. Кожний дослід п.п. 3.3.1 й 3.3.2. повторити тричі для визначення середнього значення потенціалу  $U_2$ .

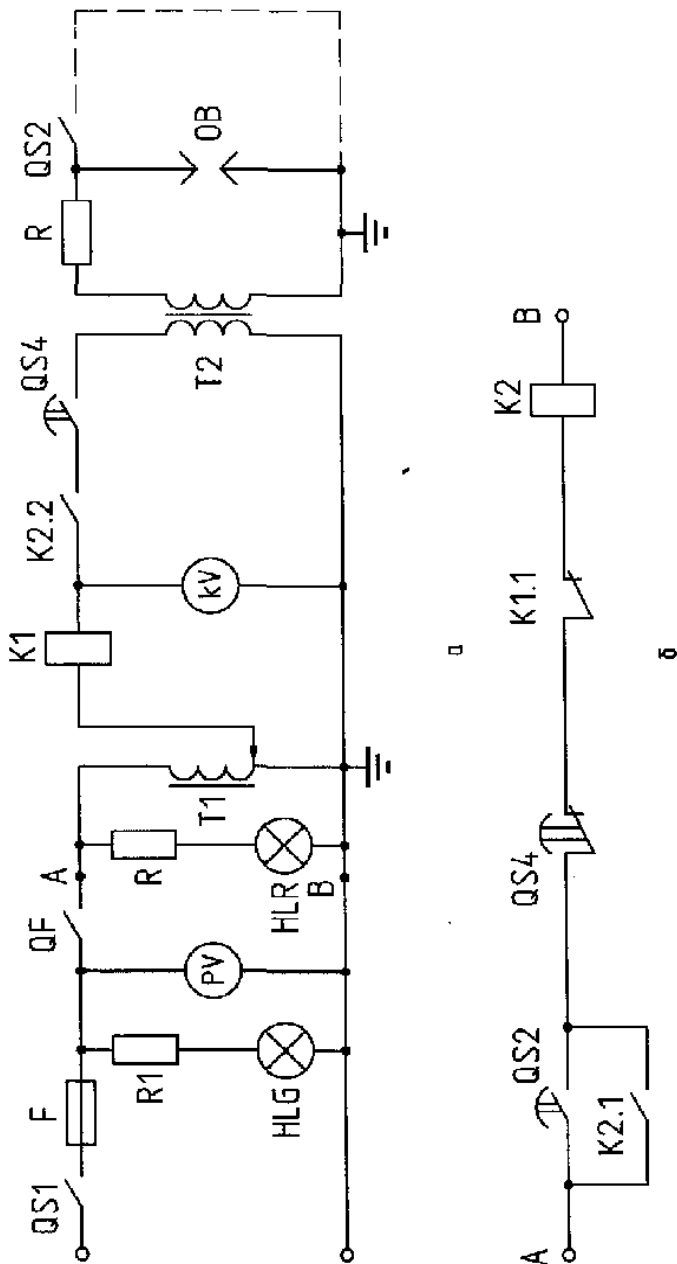
3.3.3. Графіки розподілу потенціалів і напруженості будувати у наступній послідовності: накреслити криву вигляду  $U = f(s)$ , що дає наглядне уявлення про розподіл потенціалів уздовж поверхні ізолятора. Наприклад, відрізок  $|mn|$ , (рис. 3.2) являє у прийнятому масштабі деякі значення  $U$ , що дорівнює потенціалу у точці « $m$ » на ізоляторі. Щоб отримати напруженість електричного поля для такої точки, слід застосувати графічний метод диференціальної похідної. На кривій рис. 2.2, вибрати відрізок:  $|nm'|$ , достатньо наближений до прямої, тоді:

$$E_m = \frac{\Delta U}{\Delta S} = \frac{[n'm'] - [nm]}{[om'] - [om]} \quad (3.1)$$

Величину  $E_m$  відкласти в масштабі у вигляді відрізка напруженості для точки « $m$ ». Інші точки для побудови кривої  $E = f(s)$  визначити таким же чином.

Результати вимірювань та розрахунків записати в табл. 3.1. і 3.2.

Побудований за розрахунками табл.3.1 рисунок 3.2 необхідний для розрахунку напруженості електричного поля по поверхні ізолятора та заповнення табл.3.2.



а - принципова ; б - розгорнута

Рисунок 3.1 - Електрична схема установки для дослідження напруженості електричного поля на поверхні ізолятора

Таблиця 3.1 - Потенціали напруги уздовж поверхні ізолятора

№ дос-ліду	Виміряні значення				Розраховані значення			S	При-мітки
	U <sub>2</sub> , кВ				U <sub>к</sub>	α	U		
	1	2	3	сер.	кВ	-	кВ	мм	
1									
2									
3									
...									
12									

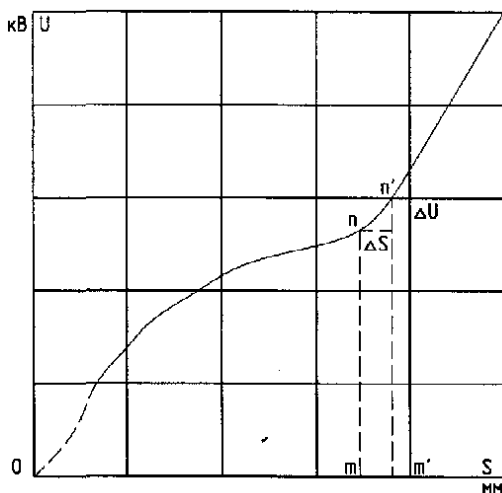


Рисунок 3.2 – Приклад розподілу електричних потенціалів по поверхні ізолятора

Таблиця 3.2 - Напруженості на поверхні ізолятора

№	ΔU	ΔS	E	Примітки
	кВ	мм	кВ/мм	
1		15		
2		15		
3		15		
...		15		
11		15		
12		5		

### 3.4 Розрахункові формули

3.4.1 Коефіцієнт нерівномірності електричного поля  $\alpha$

$$\alpha = \frac{U_k}{U_2} \cdot 100, \% \quad (3.2)$$

де  $U_k$  - напруга пробою між кулями;

$U_2$ - напруга, при якій починається розряд

3.4.2 Потенціал уздовж поверхні ізолятора  $U$

$$U = U_\phi \cdot \alpha \cdot 10^{-2}, \text{ кВ} \quad (3.3)$$

де  $U_\phi$ - напруга, прикладена до ізолятора в експлуатації, задається викладачем (3, 6, 10, 35 кВ)

3.4.3 Напруженість електричного поля  $E$

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta S} \cdot \quad , \text{ кВ/мм} \quad (3.4)$$

### 3.5 Зміст звіту

3.5.1 Мета роботи.

3.5.2 Електрична схема на рис.3.1.

3.5.3 Результати дослідів, табл. 3.1 і 3.2.

3.5.4 Графіки залежностей  $U = f(S)$  і  $E = f(S)$ .

3.5.5 Висновки.

### 3.6 Контрольні запитання

3.6.1 Які вимоги пред'являються до конструкції ізоляторів, їх електричної міцності?

3.6.2 Призначення, класифікація та особливості апаратних ізоляторів.

3.6.3 Призначення, класифікація та особливості лінійних ізоляторів.

3.6.4 Пояснити, у чому причина нерівномірного розподілу напруженості електричного потенціалу уздовж поверхні ізолятора?

3.6.5 Вплив струмоведучого стрижня (у середині прохідного ізолятора 35 кВ) на розрядну напругу.

3.6.6 Які повинні бути конструктивні особливості опорного й прохідного ізоляторів для покращення поверхневого розподілу електричних зарядів?

3.6.7 Які параметри впливають на розрядну напругу по поверхні ізолятора?

3.6.8 Які механічні навантаження впливають на механічну стійкість ізоляторів?

3.6.9 Основні причини електричного старіння (погіршення характеристик) внутрішньої ізоляції.

### **3.7 Література**

Коспект лекцій з дисципліни «Основи електроенергетики»

[1], с. 46-53, 79-83, 432-438;

[6], с. 74-85, 197-201;

[7], с. 154-162;

[8], с. 43-46.

[9], с. 416-421;

[10], с. 47-49, 97-99, 108-109, 213-220.

## **4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4**

### **Розрахунок струмів трифазного короткого замикання в електроустановках змінного струму з напругою вище 1 кВ**

#### **4.1 Мета роботи**

Ознайомитися із розрахунковою схемою електроустановки. Провести розрахунок складових струмів трифазного короткого замикання у заданній точці розрахункової схеми.

#### **4.2 Завдання**

4.2.1 Ознайомитися з основними елементами розрахункової схеми рис. 4.1.

4.2.2 Обрати основне електрообладнання (генератори, трансформатори, реактор) для заданої схеми із табл. 4.6.

4.2.3 Виписати їх основні параметри (тип, потужність, напругу, напругу КЗ трансформаторів, індуктивний опір реактора).

4.2.4 На базі розрахункової схеми скласти еквівалентну схему заміщення.

4.2.5 Розрахувати значення опорів усіх елементів еквівалентної схеми у відносних (в.о.) та іменованих одиницях (Ом).

4.2.6 Розрахувати за законом Ома початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ  $I_{по}$ , потім ударний струм  $i_{уд}$ , періодичну й аперіодичну складові струму КЗ для заданного моменту часу  $t$  ( $I_{шт}$ ,  $i_{шт}$ ).

4.2.7 Результати розрахунків звести до табл. 4.8.

### 4.3 Методичні вказівки

4.3.1 Розрахунки струмів КЗ необхідні для:

- зіставлення, оцінки й вибору головних схем електричних станцій, мереж і підстанцій;
- вибору та перевірки електричних апаратів і провідників;
- проектування і настроювання пристроїв релейного захисту та автоматики;
- визначення впливу струмів нульової послідовності ЛЕП на лініях зв'язку;
- проектування заземлюючих пристроїв;
- аналізу аварій в електроустановках та електричних системах;
- оцінки допустимості та розробки методики проведення різних випробувань в електричних системах;
- аналізу стійкості роботи енергосистем.

Для розрахунку на схемі необхідно вказати:

а) для енергосистеми –  $S_{ном\ С}$ , МВ·А;  $x_{*ном\ С}$ ;

б) для генераторів, синхронних компенсаторів –  $S_{ном\ G}$ , МВ·А;

$x''_{d*ном}$ ;

в) для трансформаторів –  $S_{ном\ Т}$ , МВ·А;  $u_k$ , %;

д) для ЛЕП –  $l_w\ Т$ , км;  $x_{уд}$ , Ом/км;

е) для реакторів  $x_{ном\ LR}$ , Ом.

Примітка. Індекс \* (зірочка) указує, що величина виражена у відносних одиницях, індекс «ном» - що ця величина віднесена до номінальних параметрів даного елемента.

Номінальні параметри беруться з каталожних даних електроустаткування [3], середні значення питомих опорів ЛЕП можна взяти з табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Середні значення питомих індуктивних опорів ЛЕП

Лінія електропередачі	$x_{\text{пит}}$ , Ом/км
Одноланцюгова повітряна лінія, кВ:	
6÷220	0.4
220÷330 (при розщепленні на два проводи у фазі)	0.325
400÷500 (при розщепленні на три проводи у фазі)	0.307
750 (при розщепленні на чотири проводи у фазі)	0.28
Трьохжильний кабель, кВ:	
6÷10	0.08
35	0.12
Одножильний маслонаповнений кабель 110÷220	0.16

На розрахунковій схемі необхідно вказати фазні значення надперехідних ЕРС джерел живлення ( $E'_{|0|}$ ) у режимі, який передує КЗ.

Умовно вважають, що всі синхронні машини працювали до КЗ із повним номінальним навантаженням, при номінальному коефіцієнті потужності та номінальній напрузі. Крім того, всі вони мають пристрої АРЗ й форсування збудження.

Для СГ та двигунів надперехідну ЕРС визначають по формулі

$$E''_{|0|} = \sqrt{(U_{|0|} \pm I_{|0|} \cdot x''_d \cdot \sin \varphi_{|0|})^2 + (I_{|0|} \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_{|0|})^2}, \quad (4.1)$$

де  $U_{|0|}$  й  $I_{|0|}$  – відповідно фазна напруга і струм статора генератора у попередньому КЗ режимі;  $\varphi_{|0|}$  – кут зсуву між векторами струму і напруги у тому ж режимі.

У табл. 4.2 наведені середні значення надперехідних ЕРС джерел живлення  $E''_*$ , якими можна скористатися при розрахунках струмів КЗ. Тут же утримуються відомості про ЕРС рухового навантаження.

Таблиця 4.2 – Середні значення надперехідних ЕРС  $E''_*$  при номінальних умовах

Джерело	$T_a,$ с	$k_{уд}$	$E''_*,$ В. о.
Турбогенератор потужністю, МВт: до 100 100÷1000	0.16-0.4 0.4-0.54	1.94-1.95 1.97-1.98	1,08 1,13
Гідрогенератор із заспокійливими обмотками	-	-	1,13
Гідрогенератор без заспокійливих обмоток	-	-	1,18
Синхронний компенсатор	0.24-0.4	1.95-1.97	1,2
Синхронний двигун	-	4.5-6.5	1,1
Асинхронний двигун	-	5-7	0,9
Енергетична система	0.01-0.1	1.6-1.93	1,0

4.3.2 Відповідно до розрахункової схеми електроустановки складається еквівалентна електрична схема заміщення прямої послідовності.

*Схемою заміщення* називають електричну схему, що відповідає по висхідним даним розрахунковій схемі, але у якій усі магнітні (трансформаторні) зв'язки замінені електричними (табл.4.3).

Кожному опорі схеми заміщення привласнюється свій номер, що зберігається за ним до кінця розрахунку. На схемі заміщення представляються розрахункові точки КЗ.

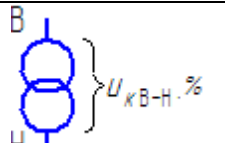
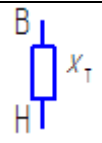
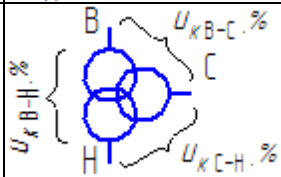
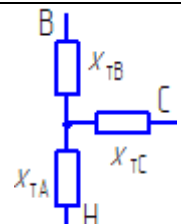
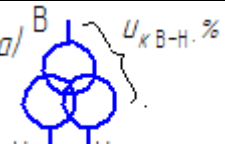
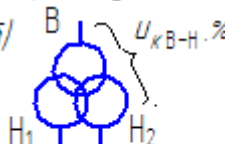
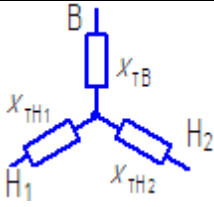
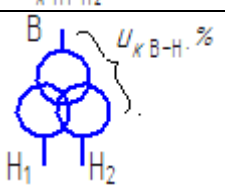
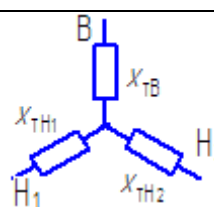
Існує два методи розрахунку опорів схеми заміщення:

- у відносних одиницях (тобто у частках від деякої так званої базової величини);
- у іменованих одиницях (в омах).

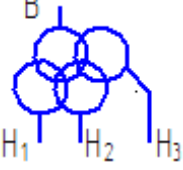
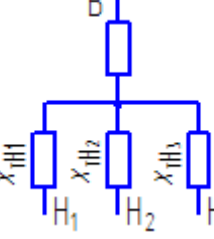
За *базову потужність* принципово можна прийняти будь-яку величину. Щоб порядок відносних величин опорів при розрахунку був зручний, найчастіше приймають  $S_б = 1000$  МВ·А. За базову напругу зручно прийняти середню напругу  $U_б = U_{ср}$  щабля, де розраховують КЗ. Використовуючи формули табл. 4.4, визначають величини опорів всіх елементів схеми заміщення у відносних одиницях, зведених до базових умов.

Отримані значення опорів елементів схеми заміщення вказуються на схемі у вигляді дроби (у чисельнику – порядковий номер опору, в знаменнику – його величина у відносних одиницях).

Таблиця 4.3 - Схеми заміщення трансформаторів, автотрансформаторів і здвоєних реакторів. Визначення їхніх індуктивних опорів

Найменування	Вихідна схема	Схема заміщення	Розрахункові формули
1	2	3	4
Двообмотковий трансформатор			$x_{TBH} \% = u_{KBH-HH} \%$
Триобмотковий трансформатор, автотрансформатор			$x_{TBH} \% = 0.5 \cdot (u_{KBH-HH} \% + u_{KBH-CH} \% - u_{KCH-HH} \%);$ $x_{TCH} \% = 0.5 \cdot (u_{KBH-CH} \% + u_{KCH-HH} \% - u_{KBH-HH} \%);$ $x_{THH} \% = 0.5 \cdot (u_{KBH-HH} \% + u_{KCH-HH} \% - u_{KBH-CH} \%)$
Трифазний трансформатор з обмоткою НН розділеною на дві гілки	<p>а) </p> <p>б) </p>		<p>а)  <math>x_{TBH} \% = 0.125 \cdot u_{KBH-HH} \%;</math>  <math>x_{THH1} \% = x_{THH2} \% = 1.75 \cdot u_{KBH-HH} \%;</math></p> <p>б)  <math>x_{TBH} \% = u_{KBH-HH} \% - 0.5 \cdot u'_{KNH1-HH2} \%;</math>  <math>x_{THH1} \% = x_{THH2} \% = u'_{KNH1-HH2} \%;</math>  <math>u'_{KNH1-HH2} \% \text{ задається у каталогах відносно } S_{HH1} = S_{HH2} = 0.5 \cdot S_{\text{ном Т}}</math></p>
Група двообмоткових однофазних трансформаторів з обмоткою НН розділеною на дві гілки			$x_{TB} = 0;$ $x_{THH1} \% = x_{THH2} \% = 2 \cdot u_{KBH-HH} \%$

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4
Група однофазних трансформаторів з обмоткою НН розділеною на три гілки			$x_{TB} = 0;$ $x_{T_{HH1}}\% = x_{T_{HH2}}\% =$ $= 3 \cdot u_{KBH-HH}\%$

4.3.3 Після того як схема заміщення складена й визначені опори всіх елементів, вона перетворюється до найпростішого виду.

Перетворення йде від джерел живлення до місця КЗ так, щоб між джерелом живлення й точкою КЗ залишався тільки один опір. При цьому використовуються відомі правила послідовного й паралельного складання опорів, перетворення трикутника у зірку і назад й т.п.

Формули перетворення та визначення струморозподілу у вихідній схемі наведені у додатку Б.

Якщо вихідна схема (або якась її частина) симетрична відносно якоїсь точки, то при визначенні еквівалентного опору цієї ділянки з'єднують точки, які мають однаковий потенціал, та виключають зі схеми ті елементи, які при КЗ опиняються знеживленими.

4.3.4 Після перетворень схеми заміщення виконується розрахунок струмів трифазного КЗ у зазначеній точці. Для вибору і перевірки електричних апаратів і провідників на електродинамічну й термічну стійкість у режимі КЗ, а також для перевірки відключаючої здатності вимикачів необхідно розрахувати:

а)  $I_{п0}$  – початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ (для початкового моменту КЗ  $t = 0$ );

б)  $I_{пт}$  – періодичну складову струму КЗ у момент часу  $t = \tau$ , де  $\tau = (0,01 + t_{с.в. откл.})$  – момент часу, відповідаючий початку розбіжності дугогасних контактів комутаційного апарата (вимикача), с;

$t_{в.ч. відкл.}$  – власний час відключення вимикача,  $(0.05 \div 0.2)$ с;

в)  $i_{ат}$  – аперіодичну складову струму КЗ у момент  $t = \tau$ ;

г)  $i_{уд}$  – ударний струм КЗ.

Таблиця 4.4 – Розрахункові формули для визначення приведених значень опорів

Елемент електроустановки	Вихідний параметр	Іменовані одиниці, Ом	Відносні одиниці, в. о.
Генератор (G)	$x''_{d*ном}; S_{ном}, МВ \cdot А$	$x_6 = x''_{d*ном} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номГ}}$	$x_{*6} = x''_{d*ном} \cdot \frac{S_6}{S_{номГ}}$
	$x''_{d, \%}; S_{ном}, МВ \cdot А$	$x_6 = \frac{x''_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номГ}}$	$x_{*6} = \frac{x''_{d\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{номГ}}$
Енергосистема (С)	$S_K, МВ \cdot А$	$x_6 = \frac{U_6^2}{S_K}$	$x_{*6} = \frac{S_6}{S_K}$
	$I_{відкл. ном}, кА$	$x_6 = \frac{U_6^2}{\sqrt{3} \cdot I_{відкл. ном} \cdot U_{сер}}$	$x_{*6} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot I_{відкл. ном} \cdot U_{сер}}$
	$x_{*номС}; S_{номС}, МВ \cdot А$	$x_6 = x_{*номС} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номС}}$	$x_{*6} = x_{*номС} \cdot \frac{S_6}{S_{номС}}$
Трансформатор (Т)	$x_T\% = u_k\%; S_{номТ}, МВ \cdot А$	$x_6 = \frac{x_T\%}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номТ}}$	$x_{*6} = \frac{x_T\%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{номТ}}$
Реактор (LR)	$x_{номLR}, Ом$	$x_6 = x_{номLR} \cdot \frac{U_6^2}{U_{сер}^2}$	$x_6 = x_{номLR} \cdot \frac{S_6}{U_{сер}^2}$
ЛЕП (W)	$x_{пит}, Ом/км; l, км$	$x_6 = x_{пит} \cdot l \cdot \frac{U_6^2}{U_{сер}^2}$	$x_6 = x_{пит} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{сер}^2}$

Примітка.  $S_{ном}$  – номінальні потужності елементів (генератора, трансформатора, енергосистеми),  $МВ \cdot А$ ;  $S_6$  – базова потужність,  $МВ \cdot А$ ;  $S_K$  – потужність КЗ системи,  $МВ \cdot А$ ;  $I_{відкл. ном}$  – номінальний струм відключення вимикача,  $кА$ ;  $x_{*номС}$  – відносний номінальний опір системи;  $x_T\%$  – відносний опір трансформатора, який визначається через напругу КЗ трансформатора  $u_k\%$  (див. табл. 4.3);  $I_6$  – базовий струм,  $кА$ ;  $U_{сер}$  – середня напруга у місці установки даного елемента,  $кВ$ ;  $x_{пит}$  – індуктивний опір лінії на 1 км довжини,  $Ом/км$ ;  $l$  – довжина лінії,  $км$ .

#### 4.4 Порядок виконання роботи

За вихідними даними (табл.4.6) розрахувати струми трифазного КЗ у заданій точці *K-1* розрахункової схеми електроустановки (рис.4.1).

4.4.1 Скласти та зобразити схему заміщення прямої послідовності. До неї необхідно внести опори тільки тих елементів розрахункової схеми (рис. 4.1), які пов'язують т. *K-1* із джерелами живлення. Кожний опір на схемі заміщення пронумерувати.

4.4.2 Провести розрахунок опорів схеми заміщення за формуляром табл. 4.4 у відносних та іменованих одиницях. Заповнити таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок приведених значень опорів

У відносних одиницях (в.о.)	У іменованих одиницях (Ом)
1	2
$x_{*1} = x_{*номС} \cdot \frac{S_6}{S_{номС}}$	$x_1 = x_{*номС} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номС}}$
$x_{*2} = x_{*3} = x_{*4} = x_{уд} \cdot l_{W1} \cdot \frac{S_6}{U_{сеп2}^2}$	$x_2 = x_3 = x_4 = x_{пит} \cdot l_{W1} \cdot \frac{U_6^2}{U_{сеп2}^2}$
$x_{*5} = x_{*6} = \frac{u_{кВН-НН} \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{номТ1}}$	$x_5 = x_6 = \frac{u_{кВН-НН} \%}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номТ1}}$
$x_{*7} = x_{номLR} \cdot \frac{S_6}{U_{сеп1}^2}$	$x_7 = x_{номLR} \cdot \frac{U_6^2}{U_{сеп1}^2}$
$x_{*8} = x_{*9} = x_{d*номГ1}'' \cdot \frac{S_6}{S_{номГ1}}$	$x_8 = x_9 = x_{d*номГ1}'' \cdot \frac{U_6^2}{S_{номГ1}}$
$x_{*10} = \frac{u_{к} \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{номТ3}}$	$x_{10} = \frac{u_{к} \%}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{номТ3}}$
$x_{*11} = x_{d*номГ3}'' \cdot \frac{S_6}{S_{номГ3}}$	$x_{11} = x_{d*номГ3}'' \cdot \frac{U_6^2}{S_{номГ3}}$
У якості базової потужності зручно прийняти $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	У якості базової напруги зручно прийняти $U_6 = U_{сеп1}^{K-1} \text{ кВ} \cdot \text{А}$

К-1 – місце короткого замикання на схемі рис.4.1.

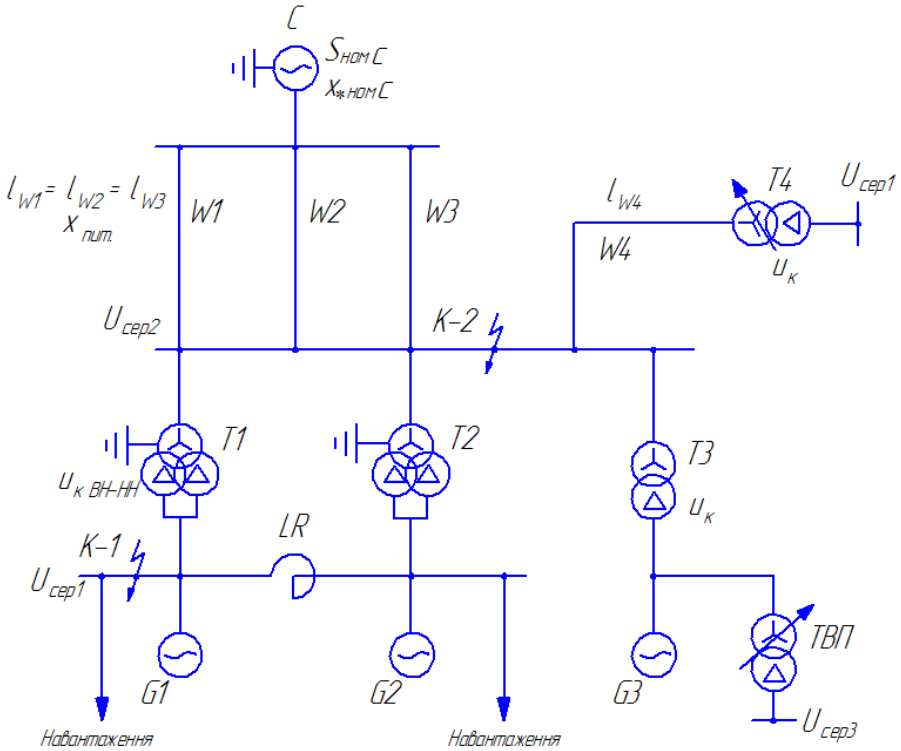


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема електроустановки

4.4.3 Спростити до мінімуму розрахункову схему та визначити еквіваленту ЕРС та результуючий опір схеми.

Розрахувати складові струму КЗ. Заповнити таблиці 4.7, 4.8 та 4.9

4.4.4 Результати розрахунку струмів трифазного КЗ звести до табл.4.8.

Надалі у цій таблиці зручно показати й розрахункові значення струмів для ланцюгів, в яких буде виконуватися вибір електричних апаратів

Примітка. Як розрахункові значення струмів КЗ для вибору апаратів у зоні II беруться сумарні струми КЗ від всіх джерел, а в зоні III розрахунковими є невеликі струми: або з боку генератора  $G1$ , або з боку зовнішніх джерел ( $C + G2 + G3$ ).

Таблиця 4.6 – Вихідні дані для розрахунку струмів трифазного КЗ в електроустановці

Вихідні дані	Вар. №1	Вар. №2	Вар. №3	Вар. №4	Вар. №5
$S_{\text{НОМС}}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	2500	3100	2800	2100	3500
$x_{\text{НОМС}}, \text{В.О.}$	2.3	2.8	2.5	1.9	3.1
$l_{W1} = l_{W2} = l_{W3}, \text{КМ}$	60	80	70	50	90
$l_{W4}, \text{КМ}$	45	65	55	20	75
<i>ЛЕП</i>	Одноланцюгова повітряна лінія				
$U_{\text{сер1}}, \text{кВ}$	10.5	6.3	10.5	6.3	10.5
$U_{\text{сер2}}, \text{кВ}$	115	154	230	37	340
$U_{\text{сер3}}, \text{кВ}$	6.3	10.5	10.5	3.15	10.5
Тип $G1, G2$	ТФ-63-2	ТФ-90-2	ТФ-110-2	ТФ-36-2У3	ТВФ-120-2У3
$S_{\text{НОМ}G1(G2)}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	78.75	100	137.5	45	125
$x''_{d^* \text{НОМ} G1(G2)}, \text{В.О.}$	0.13	0.15	0.18	0.15	0.205
Тип $G3$	ТФ-110-2	ТФ-110-2	ТВФ-120-2У3	ТФ-63-2	ТФ-160-2
$S_{\text{НОМ}G3}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	137.5	137.5	125	78.75	188.2
$x''_{d^* \text{НОМ} G3}, \text{В.О.}$	0.18	0.18	0.205	0.13	0.16
Тип $LR$	РБДГ-10-4000-0.18	РБДГ-10-2500-0.3	РБДГ-10-2500-0.3	РБДГ-6-4000-0.18	РБДГ-10-2000-0.35
$x_{\text{НОМ} LR}, \text{В.О.}$	0.18	0.3	0.3	0.18	0.35
Тип трансформаторів $T1, T2$	ТРДН-63000/110	ТРДН-63000/150	ТРДЦН-63000/220	ТРДН-40000/35	ТРДН-63000/330
$u_k \text{ВН-НН}, \%$	10.5	20	12	9.5	11
Тип трансформатора $T3$	ТДЦ-125000/110	ТДЦ-250000/150	ТДЦГ-180000/220	ТДНС-10000/35	ТДЦ-125000/330
$u_k, \%$	10.5	11	12	8.5	11
Тип трансформатора $T4$	ТДН-16000/110	ТДН-16000/150	ТДЦГ-90000/220	ТДЦ-80000/35	ТДЦ-125000/330
$u_k, \%$	10.5	11	12.2	11	11

Таблиця 4.7. – Розрахунок струмів трифазного КЗ з урахуванням розрахованих опорів у відносних одиницях

Точка КЗ	К-1	
Базова потужність $S_6, \text{МВ} \cdot \text{А}$	1000	
Середня напруга $U_{\text{сер1}}, \text{кВ}$		
Джерела	$(C + G2 + G3)$	$G1$
Номинальна потужність джерел $S_{\text{ном.дж}}, \text{МВ} \cdot \text{А}$	$\Sigma$	
Результуючий опір $x_{*\text{рез}}, \text{в.о.}$		
Базовий струм, кА $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}$		
$E''_*$ (див. табл. 4.2)	$E''_{*\text{ЭКВ2}} = 1, \dots$	$E''_{*G1} =$
$I_{\text{п0}}^{(3)} = \frac{E''_*}{x_{*\text{рез}}} \cdot I_6, \text{кА}$		
$I_{\text{ном.дж}} = \frac{S_{\text{ном.дж}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{сер}}}, \text{кА}$		
$\frac{I_{\text{п0}}^{(3)}}{I_{\text{ном.дж}}}$		
$\tau = (0.01 + t_{\text{в.ч.відкл}}), \text{с}$		
$\gamma_{*t}$	див. Додаток А	
$I_{\text{пт}}^{(3)} = \gamma_{*t} \cdot I_{\text{п0}}^{(3)}, \text{кА}$		
$k_{\text{уд}}$ (див. табл. 4.2)		
$T_a, \text{с}$ (див. табл. 4.2)		
$i_{\text{уд}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{п0}}^{(3)}, \text{кА}$		
$e^{-\frac{\tau}{T_a}}$		
$i_{\text{ат}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}}^{(3)} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}}, \text{кА}$		

Таблиця 4.8. – Розрахунок струмів трифазного КЗ з урахуванням розрахованих опорів схем заміщення

Точка КЗ	К-1	
Базова (середня) напруга $U_{\text{ср}}$ , кВ		
Джерела	$(C + G2 + G3)$	$G1$
Номинальна потужність джерел $S_{\text{ном}}$ , МВ·А		
Результуючий опір $x_{\text{рез}}$ , в.о.	$x_{21} = \dots$ , Ом	$x_8 = \dots$ , Ом
$E''$ (див. табл. 4.2)	$E''_{*3\text{кВ}2} = 1, \dots$	$E''_{*G1} =$
$I_{\text{п0}}^{(3)} = \frac{E''_* \cdot U_6}{\sqrt{3} \cdot x_{*\text{рез}}}$ , кА		
$I_{\text{ном.ист}} = \frac{S_{\text{ном.ист}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср}}}$ , кА		

Таблиця 4.9 – Зведена таблиця результатів розрахунку струмів КЗ

Точка КЗ	$U_{\text{ср}}$ , кВ	Джерела	Токи трехфазного КЗ, кА				
			$I_{\text{п0}}^{(3)}$	$I_{\text{пт}}^{(3)}$	$i_{\text{ат}}^{(3)}$	$i_{\text{уд}}^{(3)}$	$\sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}}^{(3)} + i_{\text{ат}}^{(3)}$
К-1		$(C + G2 + G3)$					
		$G1$					
		Сумарне значення					
		Розрахункові значення для вибору апаратів у ланцюзі генератора $G1$ (зона III)					
		Розрахункові значення для вибору апаратів у ланцюзі трансформатора зв'язку $T1$ (зона II)					

## 4.5 Зміст звіту

- 4.5.1 Мета роботи.
- 4.5.2 Розрахункова схема електричної установки.
- 4.5.3 Еквівалентна схема заміщення із проміжними схемами перетворення.
- 4.5.4 Розрахунок приведених значень опорів .
- 4.5.5 Розрахунок струмів трифазного КЗ
- 4.5.6 Висновки

## 4.6 Контрольні запитання

- 4.6.1 Що називається коротким замиканням?
- 4.6.2 Причини виникнення короткого замикання.
- 4.6.3 До чого може призвести зниження напруги при КЗ?
- 4.6.4 Види КЗ у трифазній електричній мережі.
- 4.6.5 Охарактеризуйте складові повного струму КЗ?
- 4.6.6 Які методи застосовуються для обмеження струмів КЗ?
- 4.6.7 Призначення та конструктивні особливості струмообмежувачів реакторів.
- 4.6.8 Режими роботи зведеного реактора (схеми).
- 4.6.9 Призначення релейного захисту. Типи реле.
- 4.6.10 Типи релейного захисту трансформаторів.
- 4.6.11 Ушкодження генераторів в електроустановках.

## 4.7 Література

Коспект лекцій з дисципліни «Основи електроенергетики»  
[2], с. 147-152, 184-196; 484-485;  
501-503; 512-515

## 5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### Вибір основного електрообладнання для схеми електричної станції. Характеристики захисних розрядників

#### 5.1 Мета роботи

Обрати основне електрообладнання для заданої електричної схеми. Провести перевірку електричних апаратів на термічну стійкість. Вивчити конструкцію, принцип дії та область застосування захисних розрядників.

#### 5.2 Завдання

5.2.1 Ознайомитися із схемою електричних з'єднань підстанції. Вивчити основні елементи схеми та їх призначення.

5.2.2 Виписати з каталогу номінальні параметри основного електротехнічного обладнання (силових трансформаторів, трансформаторів струму та напруги, вимикачів, роз'єднувачів, короткозамикачів, запобіжників).

5.2.3 Вивчити конструкцію та призначення окремих елементів вентильних і трубчастих розрядників.

5.2.4 Накреслити типову схему грозозахисту підстанції високої напруги (рис.5.1). Клас напруги підстанції задається у табл. 5.1 згідно варіанту заданого викладачем.

5.2.5 Доповнити схему підключенням розрядників зі сторони ВН трансформатора. Вибрати тип розрядників. Виписати їх основні параметри.

5.2.6 Дати аналіз надійності схеми грозозахисту підстанції.

#### 5.3 Методичні вказівки

На рис. 5.1 наведена схема з'єднань підстанції високої напруги (табл. 5.1) промислового підприємства з двома силовими трансформаторами. Для захисту від струмів КЗ використовуються плавкі запобіжники. Підстанція може забезпечувати споживачів, у яких можливі перерви живлення на час ручних перемикачів на стороні НН. У нормальному режимі секційний вимикач високої на-

пруг вимкнений і трансформатори працюють окремо. Для вимикання трансформатора в режимі неробочого ходу встановлено роз'єднувач. Перед вимиканням роз'єднувача з трансформатора знімається навантаження на боці НН.

5.3.1 Накреслити типову схему грозозахисту підстанції. Клас напруги схеми згідно варіанту задається викладачем. Проставити на схемі умовні позначення елементів.

5.3.2 У табличній формі (табл. 5.2) виписати параметри основного електроустаткування із каталогу [3].

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для схеми електричних з'єднань

Клас напруги	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Варіант №4	Варіант №5
$U_{ВН}$	330	220	150	110	35
$U_{НН}$	35	20	15	6	10

Таблиця 5.2 – Основні параметри електроустаткування

Параметр	Вимикач	Роз'єднувач	Трансформатор струму	Трансформатор напруги
Тип				
Номінальна напруга, кВ				
Номінальний струм, А				
Номінальний струм відключення, кА		-	-	-
Граничний наскрізний струм, кА			-	-
Граничний струм термічної стійкості, кА/с				
Клас точності				
Номінальне навантаження, ВА				
Електродинамічна стійкість, кА				

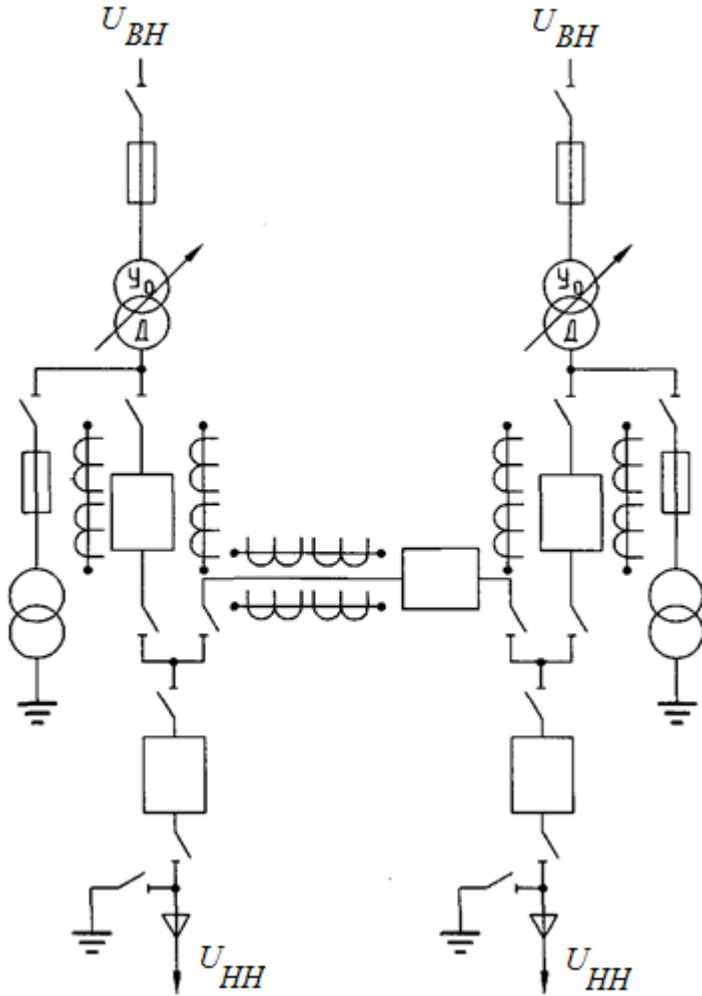


Рисунок 5.1 – Схема електричних з'єднань підстанції з двома трансформаторами високої напруги

5.3.3 Вибрати з [3] та вказати на схемі типи захисних розрядників. Виписати з [3] електричні характеристики вибраного типу розрядників.

5.3.4 На схемі вказати відстань від розрядників до трансформаторів,  $l_p$  і довжину захищеного підходу  $l_n$ , табл.5.3.

Таблиця 5.3 - Відстань від розрядника до силового трансформатора і довжина захищеного тросом підходу лінії

Номинальна напруга $U_{ном}$ , кВ	Відстань від розрядників до трансформаторів $l_p$ , м		Довжина підходу $l_n$ , км
	Середні значення	Можливий діапазон	
35	60	30-90	0,5-2,0
110	70	30-120	1,0-3,0
150-220	90	30-150	2,0-3,0
330	130	45-220	3,0-3,5
500	160	95-240	3,0-3,5

5.3.5 Розрахувати електричні апарати (вимикачі та роз'єднувачі на термічну стійкість згідно прийнятих параметрів.

5.3.6 Провести аналіз роботи схеми та зробити висновки по надійності її експлуатації.

## 5.4 Розрахункові формули

Умови вибору електричних апаратів та провідників:

$$U_{ном} \geq U_{мережі}; I_{ном} \geq I_{роб.нб}; I_{вкл} \geq I_{п0}; i_{гр.наскр.} \geq i_{уд}. \quad (5.1)$$

Термічна стійкість електричних апаратів визначається

$$B_k \cong I_{п0}^2 (t_{відкл.} + T_a), \quad (5.2)$$

де  $t_{відкл.}$  – час відключення вимикачів з [3], с;

$T_a$  – періодична складова струму КЗ ( $0.1 \div 0.25$ ), с;

$I_{п0}$  – граничний наскрізний струм, кА (табл. 5.2).

Електричний апарат вважається термічно стійким, якщо виконується умова

$$I_T^2 \cdot t_T \geq B_K. \quad (5.3)$$

## 5.5 Зміст звіту

5.5.1 Мета роботи.

5.5.2 Типова схема електричних з'єднань підстанції (рис. 5.1).

5.5.3 Технічні характеристики основного електрообладнання (табл. 5.2)

5.5.4 Технічні характеристики розрядників.

5.5.5 Розрахунок електричних апаратів на термічну стійкість.

5.5.6 Висновки

## 5.6 Контрольні запитання

5.6.1 Що відноситься до основного електрообладнання на електричних станціях та підстанціях?

5.7.2 Номінальні параметри та умови роботи синхронних генераторів.

5.6.3 Перерахуйте системи охолодження генераторів.

5.6.4 Способи збудження СГ.

5.6.5 Номінальні параметри та умови роботи трансформаторів.

5.6.6 Системи охолодження трансформаторів.

5.6.7 Графічні позначення та буквенний код елементів електричних схем (трансформатор (з ПБЗ, РПН, дво- та триобмотковий, з розщепленням обмотки НН), автотрансформатор, трансформатора на пруги та струму, реактор, реактор здвоєний, вимикач, роз'єднувач, короткозамикач).

5.6.8 Дати визначення в/в апаратах: вимикач, розєднувач, короткозамикач, запобіжник.

5.6.9 Призначення та особливості конструкції трубчастих розрядників.

5.6.10 Призначення та особливості конструкції вентильних розрядників.

5.6.11 Умови вибору електричних апаратів.

5.6.12 Призначення і принцип дії накресленої схеми підстанції в нормальному і аварійному режимах?

5.6.13 Яким чином захищається обладнання підстанції від прямого удару блискавки?

5.6.14 Яким чином захищається обладнання підстанції від грозових і комутаційних перенапруг?

## **5.7 Література**

[1], с. 272-284;

[2], с. 332-338, 544-568;

[4], с. 629-638;

[5], с. 480-525;

[6], с. 284-309, 348-349, 356-357;

[8], с. 181-191, 191-206;

[9], с. 366-369, 373-381, 397-402, 513-520;

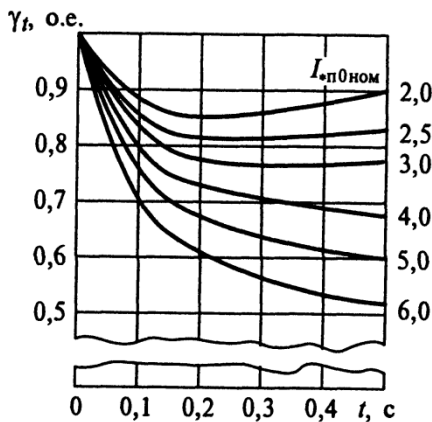
[10], с. 207-210, 313-335.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

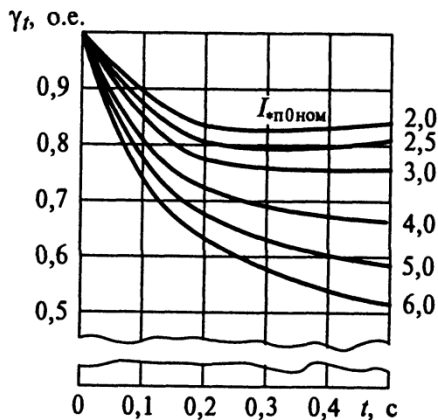
1. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах./Под ред. Ларионова В.П.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-464 с.
2. Электрическая часть электростанций и подстанций/Неклепаев Б.Н., -М.; Энергоатомиздат, 1986.-640 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т./ Под. общ. ред. А.А. Федорова. Т. 2. Электрооборудование. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.; ил.
4. Электрические аппарат .Общий курс/ Чунихин А.А. -М.: Энергоатомиздат , 1988. -720 с.
5. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения /Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, И.М.Бортник и др.: Под ред. В.В.Афанасьева.-Л.: Энергоатомиздат, 1987.-544 с.
- 6.Техника высоких напряжений: /Л.Ф.Дмоховская, В.П.Ларионов, Ю.С. Пинталь и др.: Под. ред. Д.В. Разевига. – М.:Энергия, 1976.-488с.
7. Изоляция установок высокого напряжения/ Под ред. Кучинского Г.С.-М.:Энергоатомиздат, 1968.-368 с.
8. Лабораторные работы по технике высоких напряжений / М.А.Аронов, В.В Базуткин, П.В.Борисоглебский и др. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 352 с.
- 9.Техника высоких напряжений /Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, К.П. Кадомская и др.: Под ред. М.В.Костенко.-М.: Высшая школа, 1973.-528с.
10. Техника высоких напряжений в электроэнергетике/ Долгинов А.И. - М.:Энергия, 1968.-464с.

## Додаток А

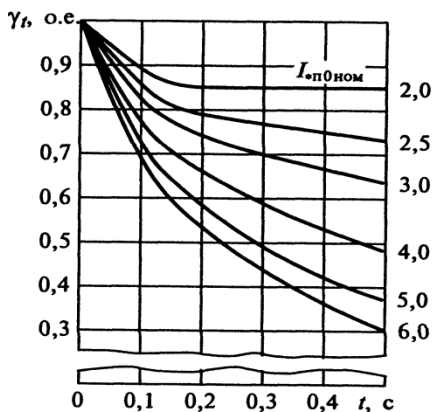
### Типові криві змінення періодичної складової струму КЗ



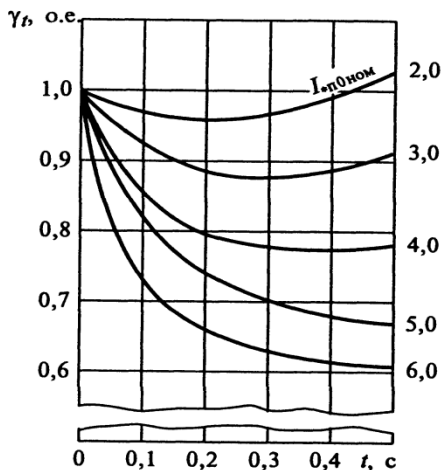
а



б



б





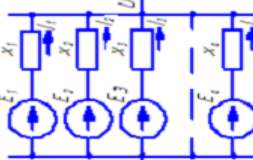
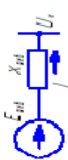
г

- а – тиристорна незалежна система збудження СГ;  
 б – тиристорна система самозбудження СГ;  
 в – діодна незалежна система збудження СГ;  
 г – діодна безщіточна система збудження СГ

## Додаток Б

### Основні формули для перетворення схем та визначення струморозподілу

Виконуємоє перетворення	Схема		Умове позначення перетворення	Формули опорів елементів перетвореної схеми	Формули розподілу струмів у схемі до її перетворення
	до перетворення	після перетворення			
1	2	3	4	5	6
Послідовне			+	$X_{\text{екв}} = X_1 + X_2 + \dots + X_n$	$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I_a$
Паралельне				$X_{\text{екв}} = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}}$ При 2-х гілках $X_{\text{екв}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$	$I_a = I \cdot \frac{X_{\text{екв}}}{X_a}$
Перетворення трикутника в еквівалентну зірку			$\Delta Y$	$X_L = \frac{X_{ML} \cdot X_{LN}}{X_{ML} + X_{LN} + X_{NM}}$ ; $X_N = \frac{X_{LN} \cdot X_{NM}}{X_{ML} + X_{LN} + X_{NM}}$ ; $X_M = \frac{X_{ML} \cdot X_{NM}}{X_{ML} + X_{LN} + X_{NM}}$	$I_{ML} = \frac{I_M \cdot X_M - I_L \cdot X_L}{X_{ML}}$ ; $I_{LN} = \frac{I_L \cdot X_L - I_N \cdot X_N}{X_{LN}}$ ; $I_{NM} = \frac{I_N \cdot X_N - I_M \cdot X_M}{X_{NM}}$
			$Y/\Delta$	$X_{ML} = X_L + X_M + \frac{X_L \cdot X_M}{X_N}$ ; $X_{LN} = X_L + X_N + \frac{X_L \cdot X_N}{X_M}$ ; $X_{NM} = X_M + X_N + \frac{X_M \cdot X_N}{X_L}$	$I_L = I_{LN} - I_{ML}$ ; $I_M = I_{ML} - I_{NM}$ ; $I_N = I_{NM} - I_{LN}$
Перетворення зірки в еквівалентний трикутник					

1 Перетворення багатопрядневої зірки у багатокутник з діагоналями	2 	3 	4 +/-	5 $X_{LM} = X_L \cdot X_M \cdot \sum Y;$ $X_{MN} = X_M \cdot X_N \cdot \sum Y;$ ....., де $\sum Y = \frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_M} + \frac{1}{X_N} + \frac{1}{X_P}$	6 $I_L = I_{LM} + I_{LN} - I_{PL};$ ..... й так далі.
Заміна дельтових джерел еквівалентним				$E_{\text{екв}} = \frac{1}{Y_{\text{екв}}} \cdot \sum_{k=1}^{\alpha} Y_{\alpha} \cdot E_{\alpha}$ де $Y_{\text{екв}}$ - див. паралельне з'єднання елементів. При 2-х гілках $E_{\text{екв}} = \frac{E_2 \cdot X_1 + E_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$	$I_{\alpha} = \frac{E_{\alpha} - U_{\kappa}}{X_{\alpha}}$

**Додаток В**  
**Приклад титульного листа звіту**  
**з лабораторних робіт**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Запорізький національний технічний університет**

**Кафедра “Електричні машини”**

**ЗВІТ**  
**з забораторних робіт**  
**дисципліна “Основи електроенергетики”**  
**Бригада №1(...n)**

**Виконав**  
**ст. гр. \_\_\_\_\_**

\_\_\_\_\_

**Перевірив**  
**та прийняв \_\_\_\_\_**

\_\_\_\_\_