



Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій  
Кафедра електропостачання та  
енергетичного менеджменту

## **ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І ПІДСТАНЦІЇ**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи «Вивчення  
струмообмежувальних реакторів»  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної форми навчання  
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»**

**Харків  
2024**



Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій  
Кафедра електропостачання та  
енергетичного менеджменту

## ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І ПІДСТАНЦІЇ

Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи «Вивчення струмообмежувальних  
реакторів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої  
освіти денної форми навчання  
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

Затверджено рішенням  
науково-методичної ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та комп'ютерних  
технологій  
Протокол № 5  
від 29 лютого 2024 року

Харків  
2024

УДК 621.31

С 31

Схвалено на засіданні кафедри  
електропостачання та енергетичного менеджменту  
Протокол №8 від 20.02.2024 р.

**Рецензенти:**

**С. О. Тимчук**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ;

**Ю. М. Хандола**, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

С 31 Електричні станції і підстанції: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи «Вивчення струмообмежувальних реакторів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: О. А. Савченко, С. А. Попадченко – Харків: [б. в.], 2024. – 19 с.

Методичні вказівки розроблено відповідно до програми навчальної дисципліни. Видання включає теоретичну частину, алгоритм виконання лабораторної роботи, контрольні запитання та перелік рекомендованої літератури.

Видання призначена для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**УДК 621.31**

**Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник**, д-р техн. наук

© Савченко О. А., Попадченко С. А., 2024

© ДБТУ, 2024

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

## ВИВЧЕННЯ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

**Мета:** Вивчення будови та принципу вибору струмообмежувальних реакторів.

### **Порядок виконання роботи:**

1. Вивчити будову струмообмежувальних реакторів.
2. Провести вибір реакторів.

### **Теоретичні дані.**

Реактор — це котушка з постійним індуктивним опором, включена в коло послідовно. У нормальному режимі на реакторі спостерігається падіння напруги порядку 3-4%. У разі короткого замикання велика частина падіння напруги припадає на реактор.

Струмообмежувальний реактор — електричний апарат, призначений для обмеження ударного струму короткого замикання.

При короткому замиканні струм у колі значно зростає в порівнянні зі струмом нормального режиму. У високовольтних мережах струми короткого замикання можуть досягати таких величин, що підібрати установки, які змогли б витримати електродинамічні сили, що виникають внаслідок протікання цих струмів, не є можливим. Для обмеження ударного струму короткого замикання застосовують струмообмежувальні реактори.

Основна сфера використання реакторів — електричні мережі напругою 6...10 кВ. Інколи струмообмежувальні реактори використовуються в устаткуванні на 35 кВ і вище (110...500 кВ), а також при напругах, нижчих за 1000 В. Реактори використовують також для обмеження пускових струмів синхронних електродвигунів та як споживачі реактивної потужності з метою підвищення пропускної спроможності ліній електропередачі.

Реактор виготовляється у вигляді індуктивної котушки без осердя з магнітного матеріалу. Завдяки цьому від має сталий

індуктивний опір, що не залежить від струму, який протікає. Реактивність прямо пропорційна індуктивному опору котушки. При великих струмах у котушок зі сталевими сердечниками відбувається насичення сердечника, що різко знижує реактивність, і, як наслідок, реактор втрачає свої струмообмежувальні властивості. З цієї причини реактори виконують без сталевих сердечників, незважаючи на те, що при цьому, для підтримки такого ж значення індуктивності, їх доводиться виготовляти великих розмірів і маси. Реактори на напругу до 35 кВ (для встановлення в закритих приміщеннях) виконуються у вигляді котушок, витки яких закріплені в бетонних колонах, а на 35 кВ і вище — у вигляді котушок поміщених в сталеві баки, заповнені трансформаторною оливою.

### **Види реакторів.**

Реактори діляться на декілька видів: бетонні, оливні, сухі.

#### *Бетонні реактори.*

Широке застосування одержали бетонні реактори з повітряним охолодженням. Вони прості за конструкцією та надійні в роботі. Обмотку реактора виконують з гнучкого багатожильного ізольованого проводу. Витки обмотки укладають на спеціальному каркасі та скріплюють бетонними колонками 2, які просочені лаком. У трифазних установках застосовують реактори які складаються з трьох котушок. Котушки ізольовані одна від одної та від заземлених частин.

Фазні котушки реактора розташовують так, що при складеному реакторі поля котушок розташовані зустрічно, що є необхідним для подолання динамічних зусиль при короткому замиканні.

Бетонні реактори набули поширення на внутрішній установці і на напруги до 35 кВ. На рисунку 1 показано бетонний реактор РБА 6-400-4, де Р – реактор, Б – бетонний, А – з алюмінієвою обмоткою, 6 – номінальна напруга, кВ, 400 – номінальний струм, А, 4 – індуктивний опір, %.

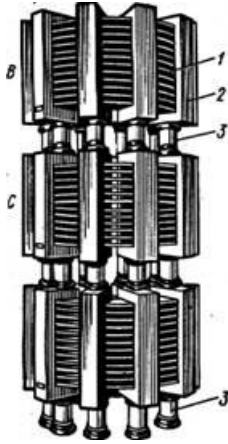


Рисунок 1 – Бетонний реактор РБА – 6 – 400 – 4  
1 – обмотка, 2 – бетонна колонка,  
3 – опорний ізолятор

Бетонні реактори виготовляють на номінальну напругу 6 та 10 кВ і струми до 4000 А при індуктивному опорі від 4 до 12%.

#### *Оливові реактори.*

При напрузі понад 35 кВ та при зовнішній установці реакторів застосовують оливові реактори. Схема такого реактора приведена на рисунку 2.

Оливові реактори можуть бути однофазного та трьохфазного виконання. У першому випадку одна котушка, а в другому випадку три котушки розташовані в сталевому баці, який заповнений трансформаторною оливою. Обмотки виконані з мідних провідників, які ізолювані кабельним папером та укладені на каркас з ізолюваного матеріалу. Кінці котушок виводяться зовні через прохідні фарфорові ізолятори на кришці реактора.

Обмотка реактора 2 намотується на спеціальний каркас з ізоляційного матеріалу типу гетинаксу. Ця обмотка занурюється в сталевий бак з трансформаторною оливою. Застосування оливи дає можливість зменшити відстань між обмоткою та заземленими частинами і покращити охолодження обмотки за рахунок конвекції оливи. Все це дає можливість зменшити масу та габаритні розміри.

Виводи реактора приєднуються до затискачів прохідних ізоляторів 4.

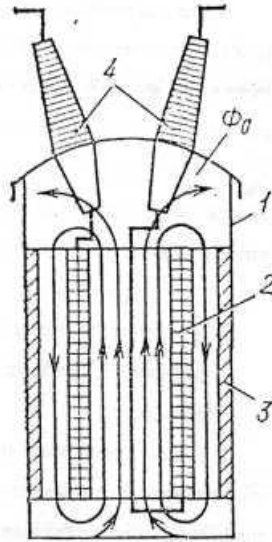


Рисунок 2 – Оливковий реактор  
1 – бак реактора, 2 – обмотка реактора,  
3 – коротко замкнута обмотка-екран,  
4 – прохідний ізолятор,  
 $\Phi_0$  – змінний магнітний потік реактора.

Змінний магнітний потік реактора  $\Phi_0$  замикається через бак, що приводить до його нагрівання до недопустимих температур. Для запобігання нагріву баку 1, всередині нього вмонтовують короткозамкнуту обмотку-екран 3 з міді, яка є вторинною обмоткою реактора. В цьому екрані наводяться струми, які створюють магнітний потік, який в стінках баку направлений проти магнітного потоку котушки реактора. В результаті через стінки баку замикається відносно незначний результуючий магнітний потік.

Можливий ще один варіант зменшення втрат на нагрів стінок баку. В цьому випадку на внутрішній поверхні сталевому



баку укріплюють сталеві пакети: створюється так мовити штучний магнітопровід з магнітним опором, який значно менший опору стінок баку. Для зменшення втрат на гістерезис шунт виконують з електротехнічної сталі, а для зменшення втрат на вихрові струми його набирають з тонких, ізольованих одна від одної сталевих пластин.

Вітчизняні заводи випускають оливкові реактори з електромагнітними екранами для зовнішньої установки, наприклад:

РТМТ-35-200-6: Р – реактор, Т – трифазний, М – охолодження природною циркуляцією повітря та оливи, Т – струмообмежувальний, на номінальну напругу 35 кВ, номінальний струм 200 А, індуктивний опір 6%, маса 11000 кг.

ТОРМ-220-325-12: Т – струмообмежувальний, О – однофазний, Р – реактор, М – з природним оливним охолодженням, на номінальну напругу 220 кВ, номінальний струм 325 А, індуктивний опір 12%, маса 44500 кг.

Оливкові реактори значно дорожчі сухих реакторів. Але вони надійно захищені від попадання в обмотку пилу, вологи та сторонніх предметів. Окрім цього їх можна встановлювати на будь-якій відстані від сталевих та залізобетонних конструкцій у відкритих пристроях.

Для недопущення вибухів, пов'язаних з перегріванням оливи в баку, згідно з ПУЕ, всі реактори на напругу 500 кВ і вище повинні бути забезпечені газовим захистом.

### *Сухі реактори.*

Сухі реактори, як новий напрямок в конструюванні струмообмежувальних реакторів, застосовуються в мережах з номінальною напругою до 220 кВ. В одному з варіантів конструкції сухого реактора обмотки виконуються у вигляді кабелів (зазвичай прямокутного перерізу для зменшення габаритів і підвищення механічної міцності) з кремнійорганічною ізоляцією, намотаних на діелектричний каркас. Перевагою застосування кремнійорганічної ізоляції є велика термостійкість, стійкість до електродинамічних навантажень, еластичність, герметичність,

незмінність діелектричних і механічних властивостей при тривалому часі експлуатації.

В іншій конструкції реакторів провід обмотки ізолюється поліамідною плівкою, а потім двома шарами скляних ниток з проклеюванням і просоченням їх кремнійорганічним лаком і наступним спіканням, що відповідає класу нагрівостійкості Н (робоча температура до 180 °С) Пресування і стягування обмоток бандажами робить їх стійкими до механічних напружень за ударних струмів.

На рисунках 3 і 4 представлено загальний вид сухого струмообмежувального реактора.

Переваги сухих струмообмежувальних реакторів:

1. Використання сучасних ізоляційних матеріалів класу нагрівостійкості F і H.
2. Малі габарити, маса та зменшені втрати.
3. Універсальність виконання виводів.

#### **Схеми включення реакторів.**

За способом установки реактори поділяють на:

- лінійні;
- групові;
- секційні.

На рисунку 5 представлено принцип роботи струмообмежувального реактора послідовного включення.

На рисунку 6 а і б представлено схеми включення одинарних і здвоєних реакторів.

В таблиці 1 і 2 представлені технічні параметри одинарних та здвоєних реакторів.

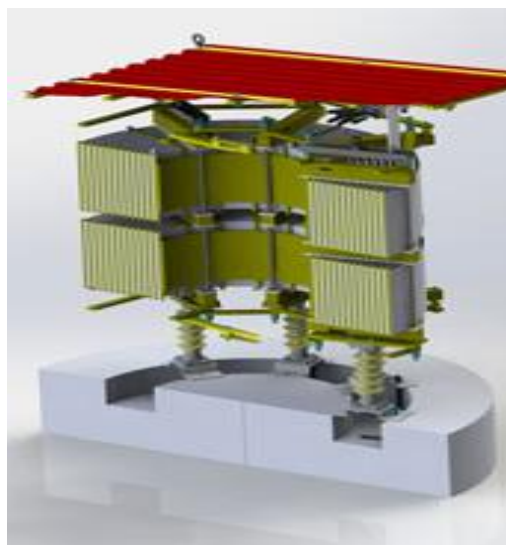
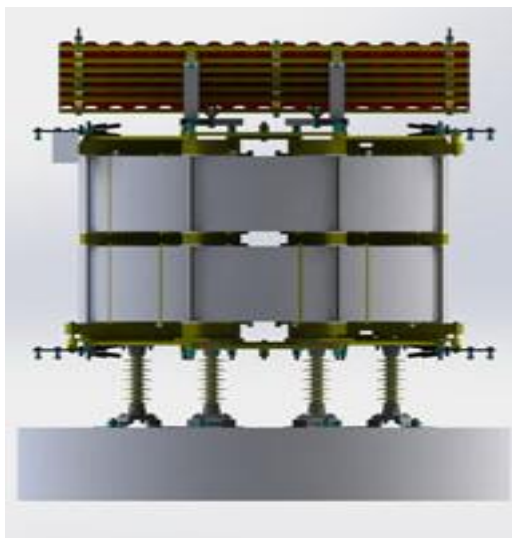


Рисунок 3 – Загальний вид сухого струмообмежувального реактора

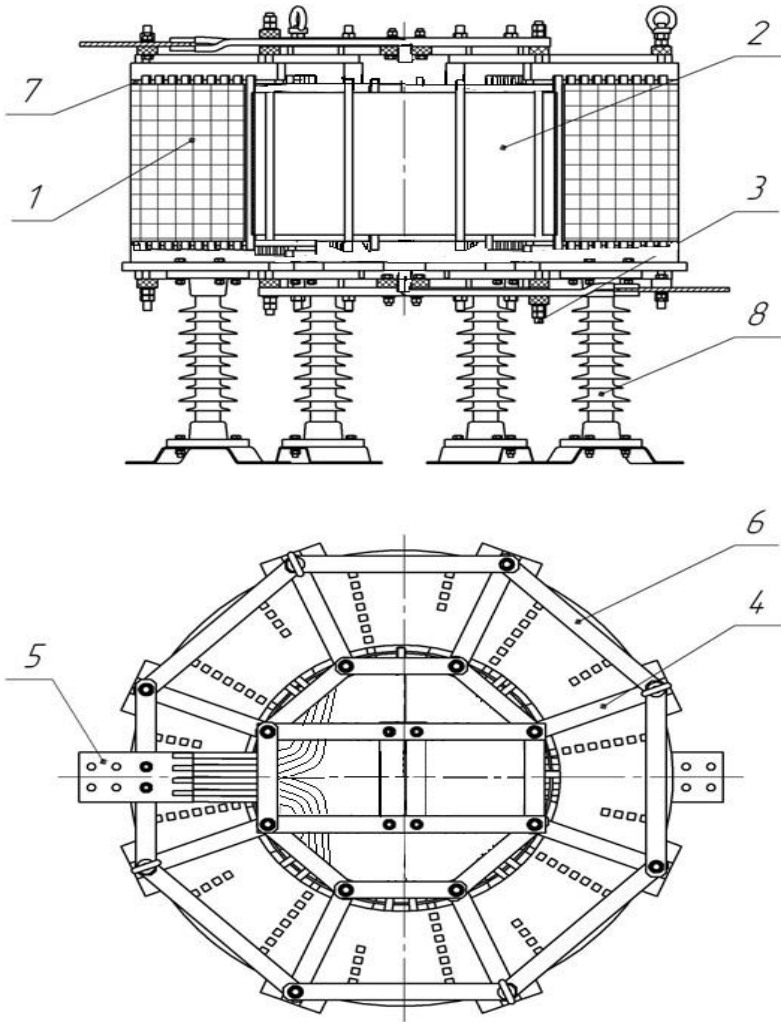


Рисунок 4 – Сухий струмообмежувальний реактор  
 1 – обмотка реактора, 2 – ізоляційний циліндр,  
 3 – осьові шпильки, 4, 6 – пресуюча система,  
 5 – струмопровідна шина, 7 - силіконова прокладка, 8 –  
 опорні ізолятори.

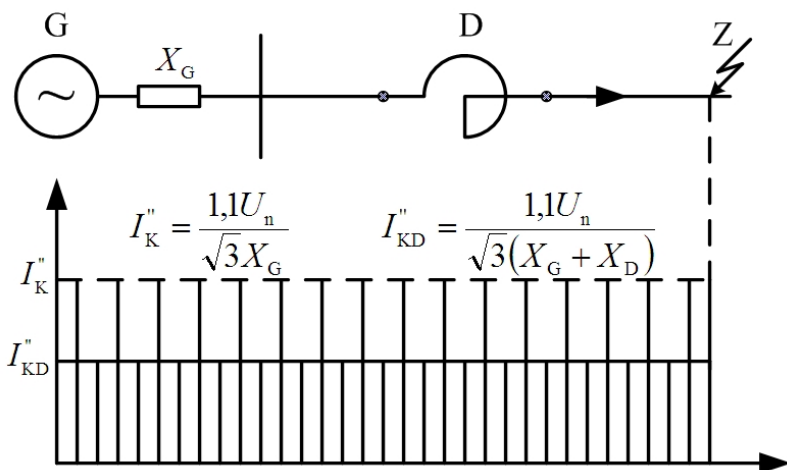
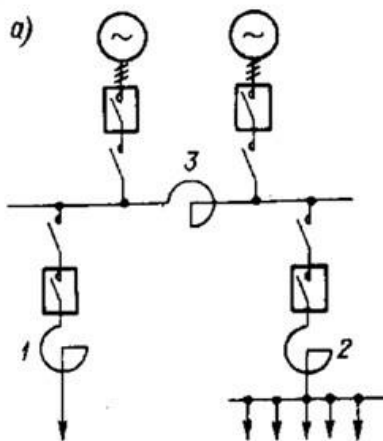


Рисунок 5 – Принцип роботи струмообмежувального реактора послідовного включення

$I''_{KD}$  – струм короткого замикання за реактором;

$I''_K$  – струм короткого замикання до реактора.



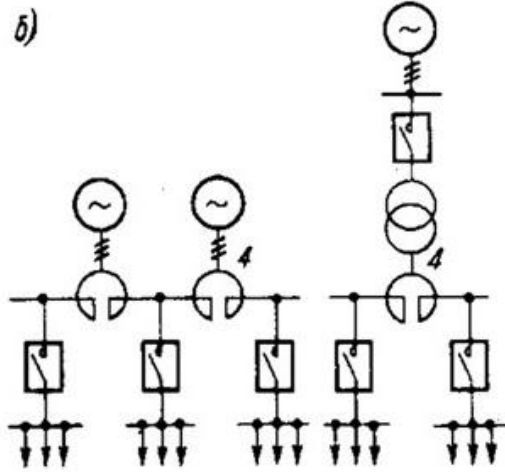


Рисунок 6 – а) схема включення одинарних реакторів  
 1 – фідерний, 2 – фідерний груповий, 3 – міжсекційний  
 б) схема включення здвоєних реакторів  
 4 – здвоєний реактор

**Структура умовного позначення реактора**

РТ X-X- X X - X-X X X

- Категорія розміщення
- Кліматичне виконання
- Номинальний індуктивний опір, Ом
- Номинальний струм, А; для здвоєного додається «2х»
- Клас напруги, кВ
- Розташування фаз: У – кутове, Г - горизонтальне, відсутня буква - вертикальне
- Вид охолодження: Д – примусове - повітряне, відсутня буква – природне повітряне
- Тип виконання за способом приєднання до мережі: С – здвоєний, відсутня буква - одинарний

Таблиця 1 – Технічні параметри реакторів

Параметр	Одиниця виміру	Величина
Розміщення фаз	РТОС	однофазні
	РТСТ	вертикальне
	РТСТГ	горизонтальне
	РТСТС	вертикальне (для здвоєних реакторів)
Номінальна напруга	кВ	3, 6, 10, 15, 20, 35, 110
Номінальний струм	А	250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 3200, 4000, 5000,
Номінальний індуктивний опір	Ом	0,05 ÷ 20
Кут між виводами	-	0, 90, 180, 270
Струм термічної стійкості	кА	до 50
Час протікання струму термічної стійкості	с	до 8
Ударний струм короткого замикання	кА	до 120

Таблиця 2 – Технічні характеристики здвоєних реакторів

Тип реактора для внутрішньої установки				
Параметри	РБС 10- 2х630- 0,25У3	РБСУ 10- 2х1000- 0,28у3	РБСУ 10-2х1600- 0,14у3	РБСДГ 10- 2х2500- 0,14
Номінальна напруга, кВ	10	10	10	10
Номінальний струм, А	2х630	2х1000	2х1600	2х2500
Номінальний індуктивний опір, Ом	0,25	0,28	0,14	0,14
Номінальний індуктивний опір двох гілок при послідовному з'єднанні, Ом	0,73	0,856	0,436	0,43
Номінальний індуктивний опір однієї гілки при зустрічних струмах, Ом	1,135	0,132	0,062	0,067
Номінальний коефіцієнт зв'язку	0,46	0,53	0,56	0,52
Номінальні втрати на фазу, кВ	4,8	10	11,5	22,5
Електродинамічний струм короткого замикання, кА	40	45	66	79
Електротермічний струм	15,75	17,75	26	31,1

короткого замикання, кА				
Час дії струму термічної стійкості, с	8	8	8	8
Електродинамічний струм при зустрічних струмах короткого замикання, кА	14,5	16	26	29,5
<b>Тип реактора для зовнішньої установки</b>				
Параметри	РБСНГ 10- 2x1000- 0,45	РБСНГ 10-2x1600- 0,25	РБСНГ 10- 2x2500- 0,14	
Номінальна напруга, кВ	10	10	10	
Номінальний струм, А	2x1000	2x1600	2x2500	
Номінальний індуктивний опір, Ом	0,45	0,25	0,14	
Номінальний індуктивний опір двох гілок при послідовному з'єднанні, Ом	1,298	0,754	0,45	
<b>Продовження таблиці 2</b>				
Номінальний індуктивний опір однієї гілки при зустрічних струмах, Ом	1,251	0,123	0,056	
Номінальний коефіцієнт зв'язку	0,442	0,508	0,6	
Номінальні втрати на фазу, кВ	15,4	22,1	29,3	
Електродинамічний струм короткого замикання, кА	29	49	79	
Електротермічний струм короткого замикання, кА	11,4	19,3	31,1	
Час дії струму термічної стійкості, с	8	8	8	
Електродинамічний струм при зустрічних струмах короткого замикання, кА	16	22	34	

**Задача.** Вибрати груповий реактор для обмеження струму короткого замикання в колі шести ліній, які живляться від шини 10 кВ, рисунок 7. Максимальний струм для кожної лінії  $I_{\max} = 310$  А. Сумарне початкове значення періодичної складової струму короткого замикання на шинах 10 кВ  $I_{в.о.} = 60,69$  кА. Струм відключення вимикача  $I_{\text{від. ном}} = 20$  кА. Час відключення короткого замикання релейним захистом  $t_{\text{від}} = 1,2$  с.



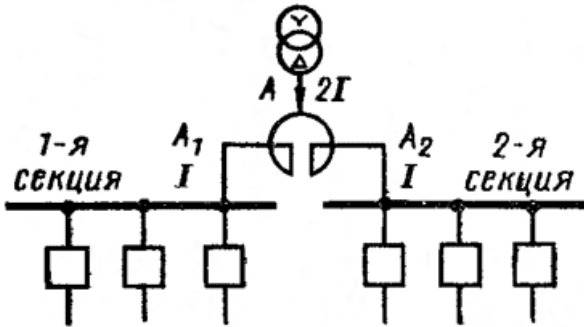


Рисунок 7 – Схема до задачі

**Рішення.** Пропонується до установки здвоєний реактора типу РБСГ (з горизонтальним розташуванням фаз) на номінальну напругу 10 кВ з номінальним струмом вітки  $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ A}$

$$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ A} > I_{\text{max}} = 3 \cdot 310 = 930 \text{ A}$$

Визначення результуючого опору кола короткого замикання при відсутності реактора, Ом:

$$X_{\text{рез}} = U_{\text{H}} / (\sqrt{3} \cdot I_{\text{в.о}}); \quad X_{\text{рез}} = 10,5 / (\sqrt{3} \cdot 60,69) = 0,1 \text{ Ом.}$$

Необхідний опір кола короткого замикання з умови забезпечення номінальної відключаючої здатності вимикача, Ом:

$$X_{\text{Т.від.}} = U_{\text{H}} / (\sqrt{3} \cdot I_{\text{від. ном}}); \quad X_{\text{Т.від.}} = 10,5 / (\sqrt{3} \cdot 20) = 0,303 \text{ Ом.}$$

Потрібний опір реактора для обмеження струму короткого замикання, Ом:

$$X_{\text{Т.Р}} = X_{\text{Т.від.}} - X_{\text{рез}}; \quad X_{\text{Т.Р}} = 0,303 - 0,1 = 0,203 \text{ Ом.}$$

Вибираємо реактор РБСГ-10-2х1000-0,22 з параметрами:

$$U_{\text{H}} = 10 \text{ кВ}; I_{\text{ном}} = 1000 \text{ A}; X_{\text{р}} = 0,22 \text{ Ом}; i_{\text{max}} = 55 \text{ кА.}$$

Результуючий опір кола короткого замикання з врахуванням реактора, Ом:

$$X'_{\text{рез}} = X_{\text{рез}} + X_{\text{р}}; \quad X'_{\text{рез}} = 0,1 + 0,22 = 0,32 \text{ Ом.}$$

Фактичне значення періодичної складової струму короткого замикання за реактором, кА:

$$I_{\text{п.р.}} = U_{\text{Н}} / (\sqrt{3} \cdot X'_{\text{рез}}); \quad I_{\text{п.р.}} = 10,5 \cdot /(\sqrt{3} \cdot 0,32) = 18,85 \text{ кА.}$$

### **Перевірка стійкості реактора в режимі короткого замикання.**

Електродинамічна стійкість.

Ударний струм короткого замикання, кА:

$$i^{(3)}_{\text{у}} = \sqrt{2} k_{\text{у}} \cdot I_{\text{п.р.}}; \quad i^{(3)}_{\text{у}} = \sqrt{2} \cdot 1,956 \cdot 18,85 = 52,35 \text{ кА,}$$

де  $k_{\text{у}} = 1,956$

Умова електродинамічної стійкості:

$$i_{\text{max}} = 55 \text{ кА} > i^{(3)}_{\text{у}} = 52,35 \text{ кА, виконується.}$$

Термічна стійкість. Завод гарантує час термічної стійкості  $t_{\text{тер}} = 8 \text{ с.}$  і струм термічної стійкості  $I_{\text{тер}} = 25,6 \text{ кА.}$

Умова термічної стійкості,  $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$ :

$$B_{\text{к}} = (I_{\text{тер}})^2 \cdot t_{\text{тер}} > B_{\text{к роз}} = (I_{\text{п.р.}})^2 \cdot t_{\text{від}};$$

$$B_{\text{к}} = 25,6^2 \cdot 8 = 5242,88$$

$$B_{\text{к роз}} = 18,85^2 \cdot 1,2 = 426,39$$

Умова виконується.

Залишкова напруга на шинах при короткому замиканні за реактором, %:

$$\Delta U_{\text{зал}} \% = (X_{\text{р}} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{п.р.}} \cdot 100) / U_{\text{Н}}$$

$$\Delta U_{\text{зал}} \% = (0,22 \cdot \sqrt{3} \cdot 18,85 \cdot 100) / 10 = 71,7$$

Втрата напруги при максимальному струмі в нормальному режимі роботи з врахуванням зменшення опору в нормальному режимі, %:

$$\Delta U_p\% = X_p \cdot (1 - k_{зв}) \cdot (\sqrt{3} \cdot I_{\max} \cdot 100 \cdot \sin\varphi) / U_H$$

де  $k_{зв} = 0,53$  – коефіцієнт зв'язку, значення для реактора з каталога.

$$\Delta U_p\% = 0,22 \cdot (1 - 0,53) \cdot (\sqrt{3} \cdot 0,93 \cdot 100 \cdot 0,53) / 10 = 0,88$$

Коефіцієнт потужності навантаження  $\cos \varphi$  прийнято рівним 0,85, тоді  $\sin\varphi = 0,53$ .

Вибраний реактор задовольняє всім вимогам.

Вибрати груповий реактор для обмеження струму короткого замикання в колі шести ліній, які живляться від шини 10 кВ рисунок 8 для даного варіанту.

#### Варіанти для виконання завдання по вибору реактора

Номер варіанта	$I_{\max}$ , А	$I_{В.О}$ , кА	$I_{\text{від. ном}}$ кА	$t_{\text{від}}$ , с
1	310	62,30	19	1,1
2	410	52,41	21	1,2
3	310	56,12	20	1,3
4	520	62,56	19	1,5
5	250	45,92	23	1,3
6	310	62,31	19	1,2
7	456	59,65	20	1,1

#### Запитання для контролю

1. Призначення реакторів.
2. Переваги оливних реакторів.
3. Переваги сухих реакторів.
4. Переваги бетонних реакторів.
5. В чому перевага здвоєних реакторів.
6. Привести схему включення одинарних реакторів.
7. Привести схему включення здвоєних реакторів.

## Література

1. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. Для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшков и др.; Под ред. А. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 189 с.
2. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть станций и подстанций / Неклепаев Б.Н.. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 156 с.
3. Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций / Рожкова Л. Д., Козулин В. С. –М.: Энергоатомиздат, 1987. – 214 с.

Навчальне видання

## ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І ПІДСТАНЦІЇ

Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
«Вивчення струмообмежувальних реакторів»

Автори-укладачі:  
**САВЧЕНКО** Олександр Анатолійович  
**ПОПАДЧЕНКО** Світлана Анатоліївна

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.  
Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44





