

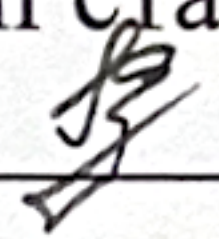
Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

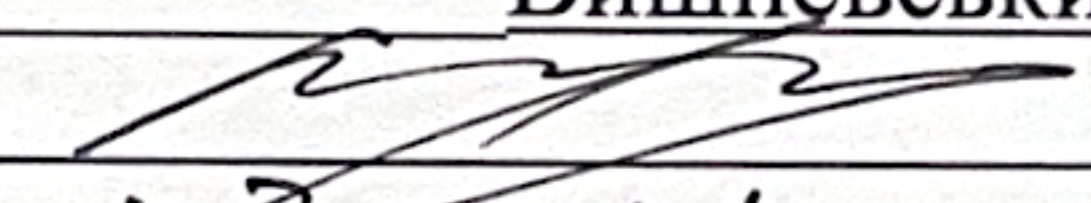
Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

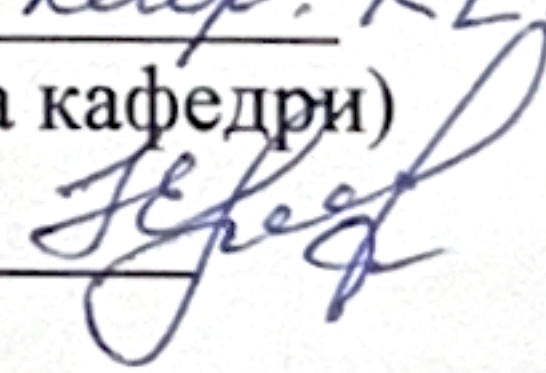
**Аналіз сучасних заходів та засобів з обмеження струмів коротких
замикань**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕС-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні станції»,
Косий О.Р. 

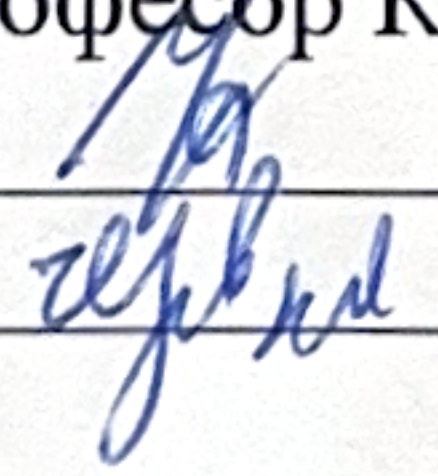
Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС
Вишневський С. Я.


« 02 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доц. каф. КЕМСК
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

Начака О.М. 
« 09 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


« 06 » 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
 Факультет електроенергетики та електромеханіки
 Кафедра електричних станцій та систем
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
 Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
 Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«10»

10 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Косому Олександру Романовичу.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Аналіз сучасних засобів та заходів з обмеження струмів коротких замикань»

Керівник роботи к.т.н., доцент каф. ЕСС Вишне夫斯基 С. Я.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи _03_ червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи:
 Енергетична стратегія України на період 2030 р. від 17 серпня 2017 р. № 145-
 р Київ : Розпорядження // Кабінет міністрів України. – 2017. – С. 75

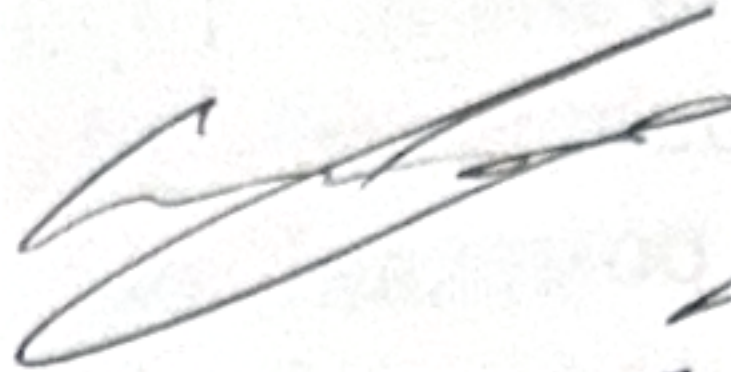
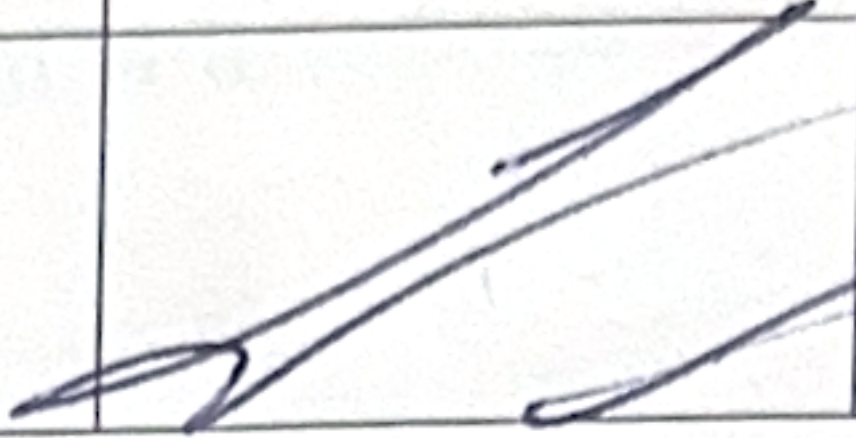
Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика
 [Електронний ресурс] - Режим доступу:
http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=227966

Кулик В. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою
 110-330 кВ: навчальний посібник / В. В. Кулик, В. В. Тептя, О. Б. Бурикін, О.
 В. Сікорська. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с.

IEEE Std 242-2001 - IEEE Recommended Practice for Protection and
 Coordination of Industrial and Commercial Power Systems.

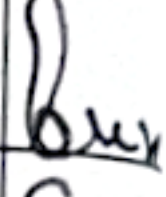
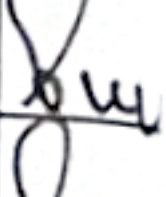
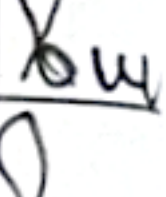
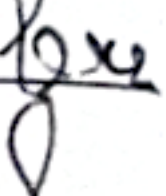
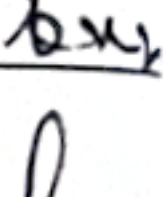
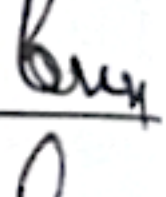
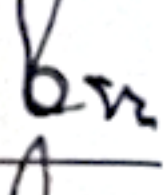
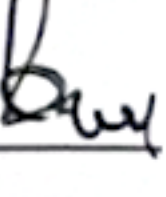
Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: для вибору
реактору $I_{no}=47,34$ кА; кількість ліній 8; $P_{p.отд.мах}=21,4$ МВт; $i_y=44,34$ кА

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Постановка задачі 2 Заходи обмеження
струмів к.з 3 Засоби обмеження струмів к.з 4 Охорона праці Висновки.
Список використаних джерел. Додатки.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Вишневський С. Я., к.т.н., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О.В д. пед. н., проф., завідувач каф.		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Прізвище
		Початок	кінець	
1	Формування та затвердження теми БКР	20.03.2025	21.03.2025	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	22.03.2025	24.03.2025	
3	Постановка задачі	25.02.2025	27.03.2025	
4	Заходи обмеження струмів к.з	28.03.2025	03.04.2025	
5	Засоби обмеження струмів к.з	04.04.2025	09.04.2025	
6	Охорона праці	10.04.2025	18.04.2025	
7	Формування висновків по роботі	19.04.2025	19.04.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки	20.04.2025	02.05.2025	
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	03.05.2025	05.05.2025	
10	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР	05.06.2025	06.06.2025	
11	Рецензування БКР	07.06.2025	09.06.2025	
	Захист БКР	10.06.2025	13.06.2025	

Студент

(підпис)

Косий О.Р.

Керівник роботи

(підпис)

С. Я. Вишневський

ЗМІСТ

Анотація.....	.....
Annotation.....	.....
Вступ.....	.....
1 Постановка задачі.....	.....
1.1 Класифікація методів і засобів обмеження струмів к.з.....	.....
2 Заходи обмеження струмів к.з.....	.....
2.1 Схемні рішення.....	.....
2.2 Розподіл мережі.....	.....
3 Засоби обмеження струмів к.з.....	.....
3.1 Загальні вимоги до струмообмежуючих пристроїв.....	.....
3.2 Струмообмежуючі реактори.....	.....
3.3 Трансформатори й автотрансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги.....	.....
3.4 Струмообмежуючі комутаційні апарати.....	.....
3.5 Струмообмежуючі пристрою резонансного типу.....	.....
3.6 Струмообмежуючі пристрої трансформаторного типу .....	.....
3.7 Струмообмежуючі пристрої реакторно-вентильного типу.....	.....
3.8 Струмообмежуючі пристрої з надпровідниками.....	.....
3.9 Вставки постійного струму і змінного струму непромислової частоти...	.....
3.10 Обмеження струмів короткого замикання на землю.....	.....
3.11 Вибір струмообмежуючого реактора.....	.....
4 Охорона праці.....	.....

4.1 Технічні рішення з безпечної організації робіт.....	
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	
4.1.2 Електробезпека.....	
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....	
4.2.1 Мікроклімат.....	
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	
4.2.3 Виробниче освітлення.....	
4.2.4 Виробничий шум.....	
4.3 Пожежна безпека.....	
Висновки.....	
Список використаних джерел.....	
Додатки.....	
Додаток А Протокол перевірки на плагіат.....	
Додаток Б Презентація	

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Косий Олександр Романович «Аналіз сучасних засобів та заходів з обмеження струмів коротких замикань». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 86 с. Бібліогр.: 19. Рис. : 22. Табл. : 13.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядалось питання обмеження струмів короткого замикання в електроенергетичних системах. Розглянуто теоретичні аспекти виникнення струмів короткого замикання, включаючи їхню природу, причини виникнення та наслідки, аналіз сучасних методик та нормативних вимог щодо обмеження струмів короткого замикання, вплив параметрів системи, таких як номінальна напруга, та потужності, на обмеження струмів короткого замикання

Ключові слова: коротке замикання, причини виникнення та наслідки кз, обмеження струмів короткого замикання.

ANNOTATION

UDC 621.311.1

Kosyi Oleksandr Romanovych "Analysis of Modern Means and Measures for Limiting Short-Circuit Currents". Bachelor's Qualification Thesis. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – 86 pages. Bibliography: 19. Illustrations: 22. Tables: 13.

This bachelor's qualification thesis explores the issue of limiting short-circuit currents in power systems. It examines the theoretical aspects of short-circuit current occurrence, including their nature, causes, and consequences. The thesis provides an analysis of modern methodologies and regulatory requirements for limiting short-circuit currents, as well as the influence of system parameters such as nominal voltage and power on the limitation of fault currents.

Keywords: short circuit, causes and consequences of short circuits, limitation of short-circuit currents.

ВСТУП

Короткі замикання в електроенергетичних системах становлять одну з найсерйозніших загроз для цілісності обладнання, стабільності функціонування мережі та безпеки обслуговуючого персоналу. Аварійні режими, пов'язані з виникненням струмів великої амплітуди, здатні спричинити теплові та електродинамічні ушкодження апаратури, загоряння, втрату енергопостачання та інші критичні наслідки, які ускладнюють відновлення нормальної роботи системи.

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку електроенергетики супроводжується зростанням складності, масштабності та інтеграційного рівня енергетичних систем. Збільшення потужності генераторних установок, ускладнення топологій мереж, а також інтеграція відновлюваних джерел енергії створюють нові виклики щодо забезпечення електробезпеки. Одним з ключових завдань у цій сфері є обмеження струмів короткого замикання (СКЗ), що дозволяє запобігти надмірному навантаженню на елементи електричної мережі та зменшити ймовірність каскадного розвитку аварії.

Проблематика обмеження СКЗ активно вивчається у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі. Розробляються ефективні методи й технічні рішення, що базуються на використанні нових матеріалів, вдосконалених алгоритмів моделювання, а також інтелектуальних систем релейного захисту. Зокрема, акцентовано увагу на широке застосування струмообмежувальних пристроїв (СОП), таких як реактори, надпровідникові елементи, обмежувачі струму з нелінійною характеристикою тощо.

Мета дослідження полягає у формуванні комплексного підходу до аналізу та обґрунтування методів і технічних рішень для ефективного обмеження струмів короткого замикання в електроенергетичних системах.

Це передбачає вивчення фізичних механізмів виникнення СКЗ, їх типових характеристик, а також розгляд існуючих і перспективних засобів їх обмеження.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати фізичні основи процесу короткого замикання, включаючи його динамічні та статичні параметри.
2. Розглянути типові причини виникнення СКЗ та їх вплив на режим роботи мережі.
3. Дослідити нормативну базу (наприклад, IEC 60909-0, IEEE Std 242-2001).
4. Визначити вплив структурних і параметричних характеристик системи (номінальна напруга, потужність джерел, імпеданси) на рівень СКЗ.
5. Сформулювати рекомендації щодо вибору, налаштування та розташування захисних і струмообмежувальних пристроїв у мережі.

Об'єкт дослідження: електроенергетична система як комплекс взаємодіючих елементів, що піддаються впливу коротких замикань.

Предмет дослідження: методи та технічні засоби обмеження струмів короткого замикання, включаючи реактори, резистори, комутаційні схеми та пристрої нелінійного типу.

Наукова новизна полягає у комплексному аналізі впливу різних факторів на процес обмеження СКЗ, з урахуванням розвитку новітніх технологій в галузі енергетичного обладнання та автоматизації.

Практична значущість. Результати дослідження можуть бути використані при проєктуванні, реконструкції та експлуатації електричних мереж. Запропоновані підходи та рекомендації дозволяють підвищити надійність

систем електропостачання, зменшити ризик виходу з ладу дорогого обладнання та запобігти техногенним аваріям.

Струми короткого замикання є однією з основних загроз функціональній цілісності електроенергетичних систем. Використання сучасних методів обмеження СКЗ забезпечує баланс між технічною ефективністю та економічною доцільністю, сприяючи створенню стабільних і безпечних енергетичних структур.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні тенденції розвитку енергетичних систем характеризуються значним зростанням рівнів струмів короткого замикання (КЗ), що суттєво ускладнює експлуатацію та знижує надійність роботи електрообладнання. У цьому контексті особливу увагу необхідно приділити проблемі забезпечення електродинамічної та термічної стійкості елементів електротехнічних пристроїв, таких як генератори, силові трансформатори, жорсткі та гнучкі струмопроводи розподільних пристроїв, шини та кабелі.

За інформацією з нормативного документа «Правила улаштування електроустановок» (ПУЕ), гнучкі струмопроводи розподільних пристроїв повинні проходити спеціальну перевірку на можливість зближення фазних провідників, що виникає під дією електродинамічних сил при струмах КЗ, які досягають рівнів, наведених у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Нормативні значення струмів короткого замикання

U _{ном} , кВ	110	150	220	330	500
S _к , млн кВА	4	6	8	12	18
I _к , кА	21	23	21	21	21

Дослідження експлуатаційної надійності силових трансформаторів в умовах зростання рівнів струмів КЗ демонструє критичність даної проблеми. Наприклад, у США в період з 1968 по 1969 роки кількість аварій трансформаторів напругою 34,5–138 кВ потужністю до 50 МВА зростає з 68 до 180 випадків. Аналогічна ситуація спостерігалась і у штаті Вірджинія, де з 716 трансформаторів, встановлених з 1959 по 1970 роки загальною потужністю 27504 МВА, зазнали ушкодження 44 одиниці (6,14%), а в подальші 18 місяців – ще 32 одиниці, збільшивши частку пошкоджених

трансформаторів до 10,6%. Більшість таких аварій були спричинені недостатньою електродинамічною стійкістю та зближенням фазних струмопроводів під дією електродинамічних сил при КЗ.

Для ефективного вирішення зазначених проблем у сучасній електроенергетиці розробляються та активно досліджуються новітні засоби обмеження струмів КЗ[2]. Основні напрямки включають:

- підвищення швидкодії існуючих комутаційних апаратів;
- впровадження нових високошвидкісних комутаційних пристроїв, здатних обмежувати і вимикати струм КЗ протягом першої половини періоду;
- використання безінерційних та інерційних струмообмежуючих пристроїв.

На рисунку 1.1 наочно представлені умови протікання та відключення струму короткого замикання різними комутаційними апаратами:

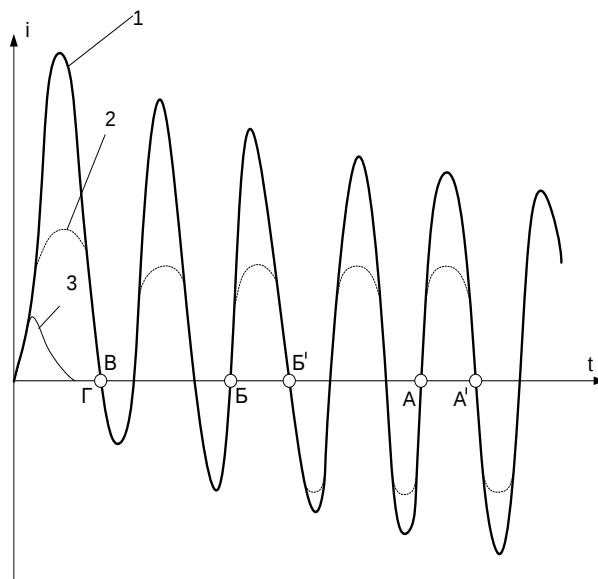


Рисунок 1.1 Умови відключення й обмеження струму к. з

1 — струм к.з. в ланцюзі; 2 — обмеження струму к.з. СП; 3 — обмеження струму к.з. струмообмежуючим комутаційним апаратом.

Впровадження двоперіодних та синхронізованих вимикачів дозволяє значно зменшити термічний вплив струму КЗ, однак максимальний електродинамічний ударний струм залишається не обмеженим. Запропоновано використання сучасних безінерційних комутаційних пристроїв, таких як тиристорні вимикачі з примусовою комутацією, вибухові обмежувачі ударного струму і спеціалізовані струмообмежуючі запобіжники, які дозволяють ефективно обмежувати і швидко відключати струм КЗ у найбільш критичний момент часу.

Незважаючи на ефективність таких рішень, вони мають певні обмеження через високу вартість, технічну складність і недостатність необхідних експлуатаційних характеристик. Тому подальші розробки спрямовані на зниження вартості та удосконалення технічних параметрів цих пристроїв.

1.1 Класифікація методів і засобів обмеження струмів КЗ.

У сучасній практиці енергосистем використовуються наступні методи обмеження струмів КЗ:

1. Оптимізація структури і параметрів мережі (схемні рішення):
раціональне проектування та розміщення трансформаторів, розподільних пристроїв.
2. Стаціонарний та автоматичний розподіл мережі, що забезпечує рівномірність навантаження і обмеження струмів КЗ.
3. Використання струмообмежуючих пристроїв: струмообмежуючих реакторів, трансформаторів з підвищеним значенням напруги КЗ, резонансних і реакторно-вентильних пристроїв, апаратів з надпровідними елементами, струмообмежуючих комутаційних пристроїв і резисторів.

4. Оптимізація заземлення нейтралі: застосування розземлення нейтралі частини трансформаторів, заземлення через струмообмежуючі пристрої (реактори, резистори).

Залежно від конкретних умов експлуатації та необхідного рівня обмеження струмів КЗ, вибираються відповідні засоби або їх комбінації, які забезпечують оптимальний техніко-економічний результат[13]. Найбільш поширені методи – стаціонарний і автоматичний розподіл мережі, використання струмообмежуючих реакторів, розземлення нейтралей, трансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги. Подальші розробки нових технічних рішень залишаються актуальною задачею сучасної електроенергетики.

2 ЗАХОДИ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КЗ.

2.1 Схемні рішення

Схемні рішення є невід'ємною складовою процесу проектування та розвитку сучасних енергосистем. Здебільшого вони формуються на етапах проектування великих електростанцій, розподільних мереж високих напруг, а також під час створення стратегій розвитку регіональних та загальнонаціональних енергетичних мереж. Головна мета таких рішень полягає у регулюванні жорсткості електричних зв'язків між різними вузлами енергосистеми, а також у виборі оптимальних структурних схем та параметрів, що відповідають заданим технічним та економічним критеріям [5].

Особливе значення схемні рішення мають при виборі принципових схем видачі потужності з великих електростанцій. Поступове збільшення потужності окремих генераторів до 300—1200 МВт, а також значне укрупнення електростанцій до рівня потужності 3600—6400 МВт обумовили необхідність переходу від простих схем, наведених на рисунку 2.1, а, до більш складних і технологічно вдосконалених схем (рисунок 2.1, б та 2.1, в).

На рисунку 2.1, а показано традиційну схему видачі потужності, характерну для теплових електроцентралей (ТЕЦ) з генераторами потужністю 30—100 МВт. Дана схема демонструвала істотні складності при регулюванні рівнів струмів короткого замикання (КЗ) в електричних мережах середньої та низької напруги.

Наступний етап еволюції схем (рисунок 2.1, б) характеризується застосуванням на блокових електростанціях генераторів потужністю 100—300 МВт. Цей підхід зменшив приріст струмів КЗ у низьковольтних мережах, однак призвів до істотного зростання рівнів струмів короткого замикання в мережах середньої напруги та помірного зростання у мережах вищої напруги.

При подальшому збільшенні потужності генераторів до 500—1200 МВт, відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.1, в, найбільший приріст

струмів короткого замикання зафіксовано в мережах вищої напруги (500—750 кВ). У мережах середньої та нижчої напруг цей приріст є менш вираженим.

Таким чином, застосування різних схем видачі потужності безпосередньо впливає на динаміку зростання струмів короткого замикання, змінюючи розподіл електродинамічного навантаження між різнорівневими електричними мережами. Це підтверджує важливість ретельного вибору схемних рішень з огляду на технічні й експлуатаційні особливості енергосистем.

Рисунок 2.1 – Типові схеми видачі потужності електростанцій різної одиничної потужності генераторів

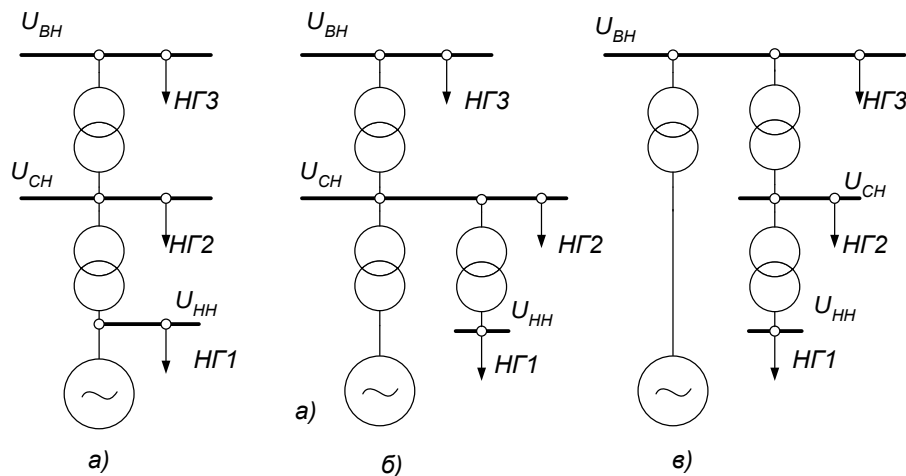


Рисунок 2.1 Принципові схеми видачі потужності електростанцій.

При цьому у мережах нижчих рівнів напруги можуть формуватись окремі зони зі стабільними максимальними значеннями струмів короткого замикання, що спрощує експлуатацію та забезпечує додаткову надійність [6].

Одним із найбільш ефективних схемних підходів для обмеження приросту рівнів струмів КЗ є оптимізація мережевої структури. Кожній структурі мережі, враховуючи параметри її окремих елементів при заданих інших умовах (таких як площа електропостачання, загальне навантаження,

розміщення потужних генеруючих джерел), властиві власні максимальні значення струмів КЗ, характерна крива розподілу цих струмів за вузлами мережі та певний темп їхнього приросту при подальшому розвитку.

У рамках таких схемних рішень можливе застосування периферійного або подовжнього розподілу мереж, що передбачає виокремлення територій або регіонів, які з'єднані між собою виключно через мережі підвищеної напруги (рисунк 2.2, а) [3].

;

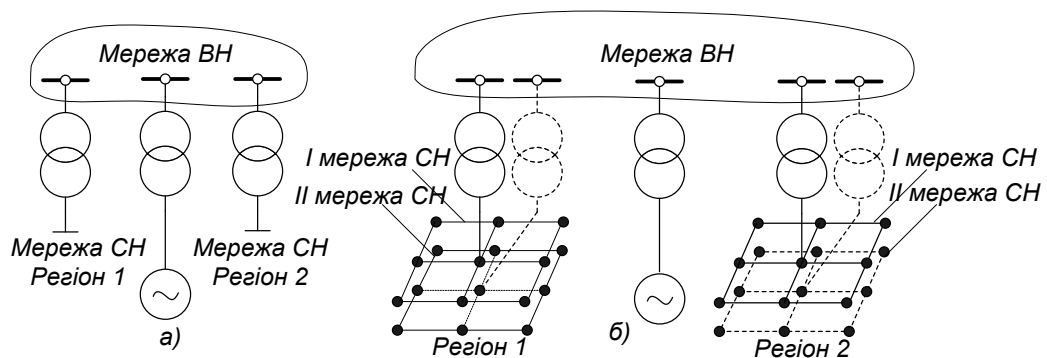


Рисунок 2.2 Варіанти схемних рішень

а — подовжній поділ мережі; б — поперечний поділ мережі.

Накладання електричних мереж однакових рівнів напруги на території визначеного регіону з їх взаємодією виключно через мережі вищих рівнів напруги (рисунк 2.2, б) отримало назву місцевого або поперечного поділу. Такий підхід дозволяє стабілізувати максимальні значення струмів короткого замикання навіть при значному зростанні навантаження.

Додатковими схемними рішеннями, що сприяють контролю рівня струмів короткого замикання, є:

- Розукрупнення електростанцій: поділ великих станцій на кілька менших за потужністю об'єктів.

- Розукрупнення мережевих вузлів: поділ розподільних пристроїв високої напруги електростанцій на окремі вузли з забезпеченням їхньої спільної роботи через вузлові підстанції. Включення частини генераторних блоків на мережі більш високих напруг.
- Використання так званих схем поздовжніх блоків (генератор–трансформатор–лінія передачі).

2.2 Розподіл електричної мережі

Для контролю й обмеження зростання рівнів струмів короткого замикання в процесі експлуатації сучасних енергосистем застосовується метод розподілу електричної мережі. Такий розподіл може виконуватись як стаціонарно (СПМ), так і автоматично (АПМ).

Стаціонарний розподіл мережі (СПМ) виконується шляхом комутаційних дій за допомогою шиноз'єднувальних, секційних або лінійних вимикачів. Суть цього методу полягає у створенні в нормальному режимі роботи системи спеціально заданої структури мережі, де певні лінії передачі або зв'язки вимкнені. Внаслідок цього підходу відбувається фіксація капітальних вкладень у непрацюючих лініях, проте метод дозволяє уникнути критичних значень струмів КЗ у конкретних вузлах мережі.

Застосування СПМ актуальне, коли максимальні значення струмів КЗ перевищують допустимі межі, встановлені для відповідного обладнання. Важливо зазначити, що зростання струмів КЗ відбувається незалежно від розподілу мережі, але застосування стаціонарного розподілу дозволяє суттєво зменшити максимальні значення цих струмів. Наприклад, порівняльний аналіз показав, що використання СПМ дозволяє майже вдвічі зменшити максимальний рівень струмів трифазного КЗ у мережах напругою 110 кВ порівняно з аналогічними мережами без застосування розподілу.

Згідно з експлуатаційними даними, вже у 1972 році в окремих енергосистемах було реалізовано 40 точок стаціонарного розподілу мереж напругою 110 кВ та 9 точок для мереж напругою 220 кВ [7].

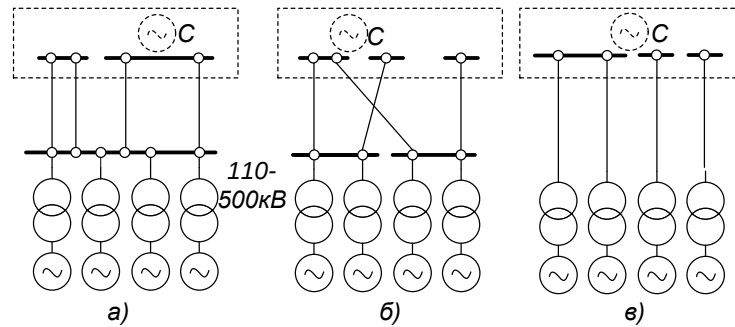


Рисунок 2.3 Розподіл мережі на електростанції з одним РУ підвищеної напруги.

а — вихідна схема; б -розподіл розподільчих пристроїв на дві частини; в — схема с подовженими блоками

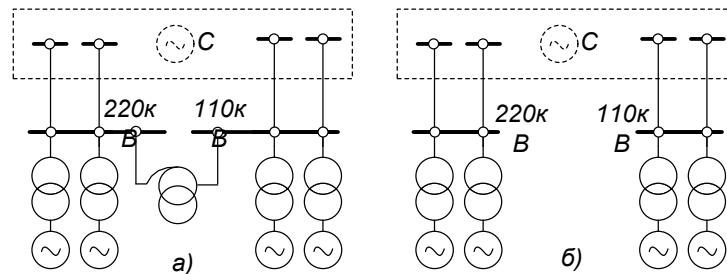


Рисунок 2.4 Розподіл мережі на електростанції з двома РП підвищеної напруги.

а — вихідна схема; б — розрив автотрансформаторного зв'язку між розподільчими пристроями двох підвищених напруг.

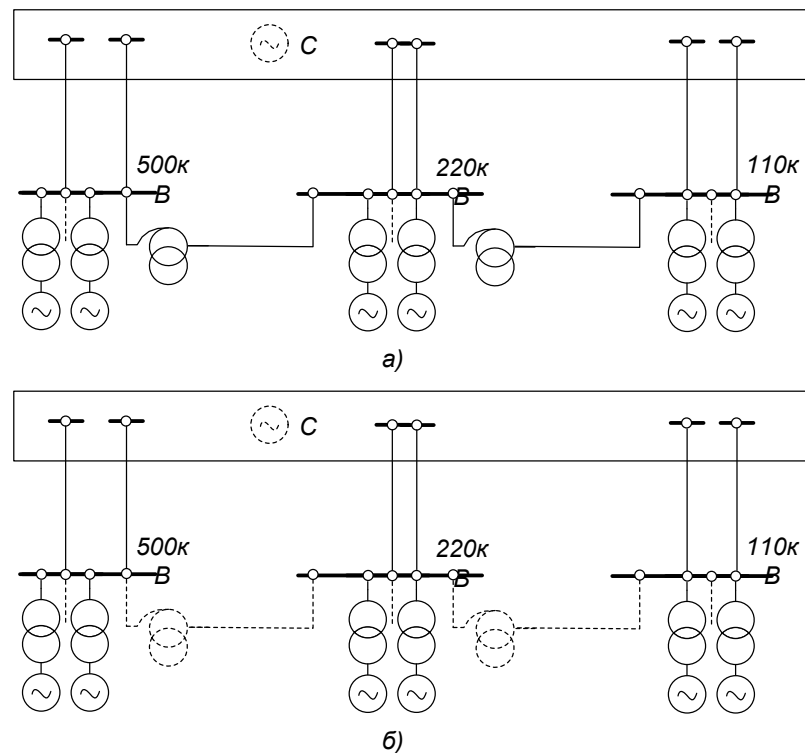


Рисунок 2.5 Розподіл мережі на електростанції з трьома РП підвищеної напруги.

а — вихідна схема; б — розриви автотрансформаторних зв'язків між двома або трьома розподільчими пристроями підвищених напруг.

На об'єктах електроенергетики, таких як підстанції та електростанції, обладнаних розподільними пристроями генераторної напруги, розподіл мережі може здійснюватися як на стороні вищої напруги, так і на стороні нижчої напруги. Вибір конкретного варіанту залежить від необхідності обмеження струму короткого замикання на відповідних рівнях мережевих напруг.

Зокрема, для блокових електростанцій типовим рішенням є розподіл мереж через розподільні пристрої високої напруги, що визначається умовами необхідного обмеження струмів КЗ. Варіанти розподілу мереж для блокових електростанцій, що мають один, два або три розподільних пристрої підвищеної напруги, наведено на рисунках 2.3–2.5.

На рисунку 2.3 (б) показано схему з поділом розподільчого пристрою. На рисунку 2.4 наведено варіант розподілу шляхом розриву автотрансформаторного зв'язку між двома розподільними пристроями підвищеної напруги. Рисунок 2.5 (б) демонструє схему, за якою автотрансформаторні зв'язки між двома або трьома пристроями високих напруг роз'єднуються з метою поділу мереж.

Важливо зазначити, що будь-яке рішення щодо розподілу мережі суттєво впливає на режими роботи, стійкість і надійність електростанцій та енергетичних систем загалом. Крім того, розподіл мережі може призводити до зміни втрат активної потужності та електроенергії у системі. Отже, при прийнятті рішення щодо способу розподілу необхідно проводити детальний аналіз всіх потенційних наслідків [4].

Автоматичний розподіл мережі, як правило, активується під час аварійних ситуацій, забезпечуючи зменшення навантаження на комутаційні апарати, які здійснюють вимкнення пошкодженого ланцюга. Цей розподіл зазвичай виконується за допомогою секційних чи шиноз'єднувальних вимикачів або, рідше, за допомогою вимикачів, приєднаних до потужних ліній.

Автоматичний розподіл дозволяє вимикати значно менші струми порівняно з повним струмом КЗ у пошкодженому ланцюзі, що полегшує експлуатацію комутаційних пристроїв. Однак такий спосіб каскадного автоматичного розподілу має певні суттєві недоліки, зокрема необхідність використання вимикачів, які здатні витримувати повний наскрізний струм КЗ і забезпечувати включення в режим короткого замикання без виникнення пошкоджень.

Це вимагає зміни координації номінальних параметрів вимикачів відповідно

$$\text{до виразів. } I_{\text{пр.с}} = I_{\text{вкл.ном}} \approx 1,4 \cdot I_{\text{откл.ном}} \quad (2.1)$$

$$i_{\text{пр.с}} = i_{\text{вкл.ном}} \approx 4 \cdot I_{\text{откл.ном}} \quad (2.2)$$

Розподіл мережі може призводити до значного небалансу потужностей між джерелами та навантаженням у відповідних частинах мережі у післяаварійному режимі. Це небалансування має вплив на стійкість роботи енергосистеми, а час відновлення нормального режиму є досить значним, становлячи від 5 до 10 секунд.

3 ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ К.З.

3.1 Загальні вимоги до струмообмежуючих пристроїв

У процесі дослідження та розробки струмообмежувальних пристроїв (СП) було визначено ряд основних вимог, яким вони повинні відповідати для ефективної експлуатації у складі сучасних енергетичних систем:

- **Обмеження максимальних значень струмів короткого замикання** – основна функція пристроїв, що дозволяє уникнути пошкодження обладнання та забезпечує стійкість роботи системи.
- **Підтримання стабільно високого рівня напруги у вузлових точках мережі**, що є критично важливим для забезпечення якості електропостачання споживачів.
- **Зменшення втрат активної потужності, яка скидається з генераторів електростанцій під час аварійних ситуацій** – важлива умова економічної ефективності роботи енергосистеми.
- **Забезпечення збереження нормального режиму роботи мережі після ліквідації аварійної ситуації**, що сприяє швидкому відновленню повноцінного функціонування енергосистеми.
- **Створення умов, необхідних для роботи чутливих пристроїв релейного захисту** – ця умова є важливою для швидкого та надійного усунення пошкоджень і локалізації аварій.
- **Відсутність істотних нелінійних спотворень параметрів режиму мережі** – ця вимога особливо актуальна в нормальних режимах роботи мережі, щоб уникнути негативного впливу на обладнання та електроспоживачів.
- **Стабільність технічних характеристик струмообмежувальних пристроїв при змінах у конфігурації електричних мереж** – це забезпечує гнучкість використання СП та надійність їх роботи у різних схемних рішеннях.

Відповідно до наведених вище загальних вимог, при розробці та виборі струмообмежувальних пристроїв необхідно, щоб їхні технічні параметри відповідали таким умовам:

При $I < I_{гр}$

$$\Delta U \rightarrow 0; R_{cn} \rightarrow \min; \Delta Z_{cn} \rightarrow 0 \quad (3.1)$$

де $I_{гр}$ -границьний струм при якому струмообмежуючий пристрій вступили в дію або “спрацювали”.

При $I = I_{гр}$ повинно бути:

$$x_{ту} \approx \Delta x_{нг} \quad (3.2)$$

$$R_{ту} \approx \Delta R_{нг} \quad (3.3)$$

$$Z_{ту} \approx \Delta Z_{нг} \quad (3.4)$$

$$I_{гр} > I_{тр.макс} \quad (3.5)$$

$$I_{гр} > I_{пр.доп} \quad (3.6)$$

де $I_{доп}$ -припустимий струм перевантаження ланцюга з СП

В окремих випадках, якщо це необхідно, може бути. накладено більш жорстку умову

$$I_{гр} > I_{ах}, \quad (3.7)$$

де $I_{ах}$ - припустимого асинхронного режиму по ланцюзі з СП.

При виконанні умови (3.4), що впливає з умов (3.2) і (3.3), стан роботи генераторів та попередньо включеного навантаження (зображено на рисунку 3.1) залишається незмінним при переході від нормального режиму до режиму короткого замикання (к.з.).

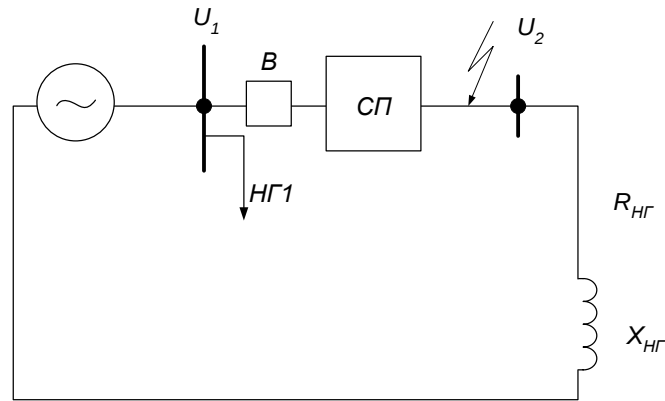


Рисунок 3.1 Схема, що пояснює вимоги до струмообмежуючих пристроїв

Водночас, практична реалізація умови (3.4) в типових енергетичних установках часто стикається зі значними труднощами через складність виконання супутньої умови (3.3). В реальних умовах потужних електроустановок найпростішим та найповнішим способом задоволення вказаних технічних вимог є забезпечення умови (3.2). Це досягається шляхом вибору й додавання до пошкодженого ланцюга додаткового індуктивного опору, наприклад у формі реактора [14].

Проведений аналіз технічних і експлуатаційних характеристик свідчить, що для ефективного виконання зазначених умов і загальних вимог струмообмежувальні пристрої повинні мати саме нелінійну залежність між параметрами струму та опору.

3.2 Струмообмежуючі реактори

Струмообмежуючі реактори характеризуються значною різноманітністю конструктивних варіантів, які істотно відрізняються за своїми технічними та економічними показниками.

Існує декілька підходів до класифікації струмообмежуючих реакторів. Основні критерії класифікації включають:

- Форма вольт-амперної характеристики: лінійна, нелінійна, обмежено-лінійна (квазілінійна).
- Конструкція магнітопроводу: реактори можуть виготовлятися без магнітопроводу (повітряні) або з магнітопроводом із сталі.
- Тип магнітної системи: існують стрижневі, броньові, бронестрижневі, тороїдальні, циліндричні або навивні реактори.
- Спосіб керування індуктивністю: нерегульовані, регульовані, керовані або з підмагнічуванням (поздовжнім, поперечним чи кільцевим).
- Тип ізоляції: масляна, суха (бетонна).
- Схема підключення: секційні, лінійні, заземлювальні.
- Конструктивне виконання: одинарні, здвоєні [14].

На сьогодні для практичного застосування в енергетичних системах для обмеження струмів короткого замикання використовуються переважно нерегульовані реактори з лінійною характеристикою. В електричних мережах середньої напруги (6-10 кВ) найбільш поширені сухі бетонні реактори (як одинарні, так і здвоєні), тоді як у високовольтних мережах (35-220 кВ) частіше використовуються масляні реактори.

Водночас, у різних дослідницьких центрах тривають роботи щодо створення більш ефективних, економічно доцільних та конкурентоспроможних типів реакторів з іншими характеристиками.

Характерними технічними параметрами реакторів з лінійною характеристикою є номінальна напруга $U_{ном}$, номінальний струм $I_{ном}$, а також індуктивний опір X_r , що може бути виражений як в абсолютних одиницях (омах), так і у відсотках відносно номінальних значень.

Електропромисловість поставляє реактори напругою 6-10 кВ одинарні з $I_{ном} = 0,4-4,0$ кА, $x_r = 3-12\%$ і здвоєні з $I_{НОМ} = 2 \times 0,6-2 \times 3,0$ кА, $x_r = 4-5\%$;

напругою 35 кВ з $I_{НОМ} = 0,2-1,0$ кА, $x_p = 6-10\%$; напругою 110 кВ з $I_{НОМ} = 0,65-1,35$ кА, $x_p = 15-16\%$; напругою 220 кВ з $I_{НОМ} = 0,325$ кА, $X_p = 12\%$.

Можливі схеми підключення лінійних і секційних реакторів наведені на рисунку 3.2.

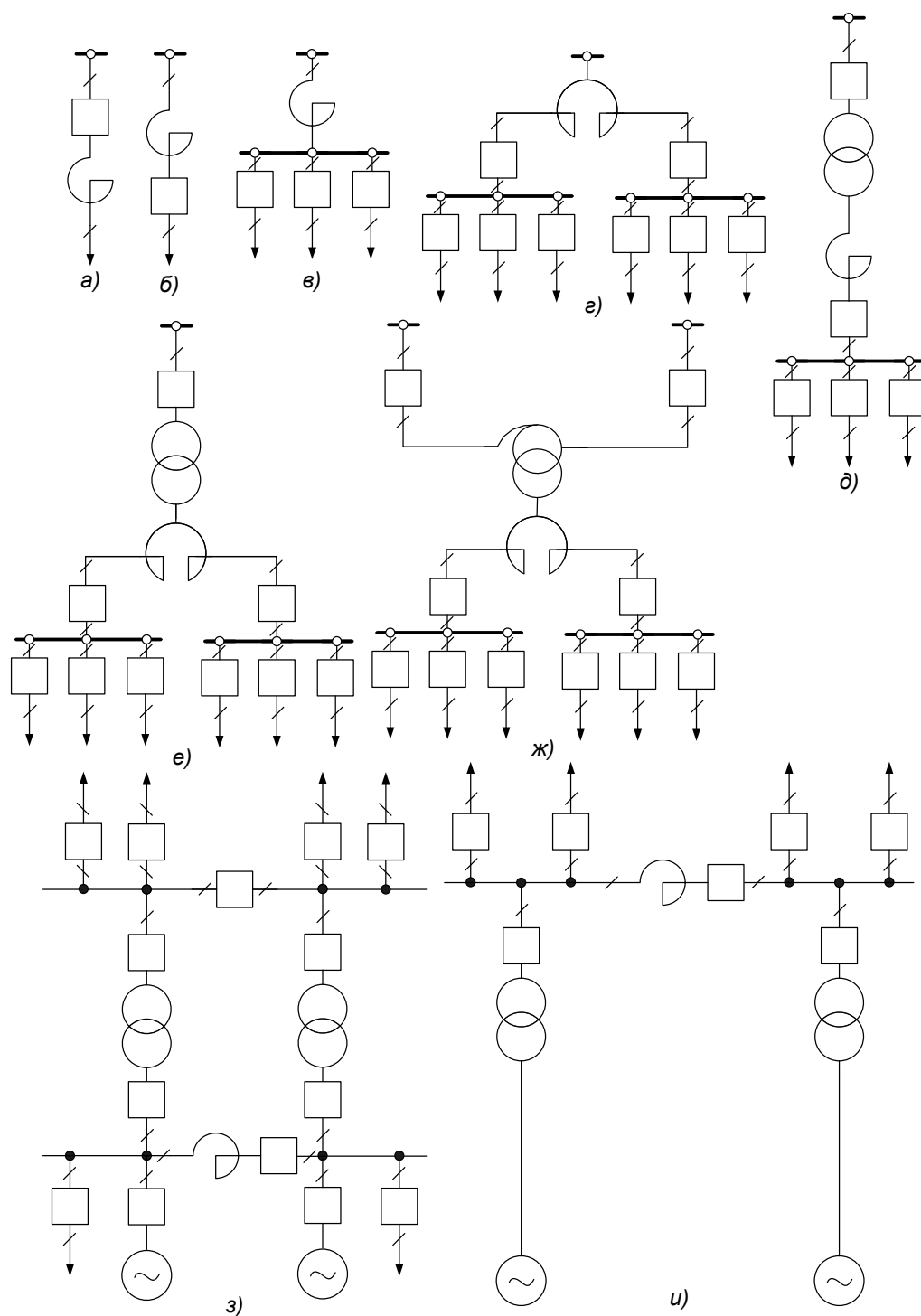


Рисунок 3.2 - Можливі схеми включення лінійних і секційних реакторів.

Характерні залежності для реактора представлені на рисунку 3.3

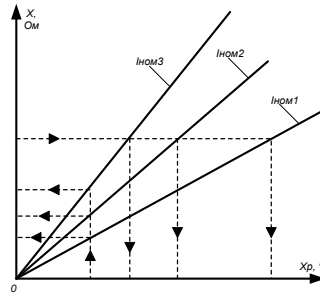


Рисунок 3.3 - Струмообмежуюча дія реакторів з різним номінальним струмом ($I_{\text{ном1}} > I_{\text{ном2}} > I_{\text{ном3}}$)

Дія струмообмежуючого реактора визначається його опором, виміряним в омах, що прямо пропорційний відносній реактивності і зворотно пропорційний номінальному струму реактора.

$$X_p = \frac{X_p(\%) \cdot U_{\text{ном}}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}} = X_{p(n)} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}} \quad (3.8)$$

Лінійні реактори, які включаються послідовно з відповідними лініями або приєднаннями електричної мережі, виконують функцію обмеження струму короткого замикання. Вони забезпечують досить високий рівень залишкової напруги у вузлах мережі, розташованих перед реактором. Проте під час нормальних умов експлуатації такі реактори характеризуються певними втратами активної та реактивної потужності, а також втратами електроенергії, що проявляється у зниженні рівня напруги на відповідних приєднаннях

З урахуванням представленої на рисунку 3.3 схеми, мають місце наступні відповідності.

$$\frac{I_{k-2}}{I_{k-1}} = \frac{1}{1 + x_c/x_p} \quad (3.9)$$

$$U_{\text{ш.зал}} = \sqrt{3} \cdot I_k \cdot X_p = \frac{E_c \cdot X_p/X_c}{1 + X_p/X_c} \quad (3.10)$$

$$\Delta U_{p.\text{норм}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{нг}} \cdot X_p \cdot \sin \varphi_{\text{нг}} \quad (3.11)$$

$$\Delta P_{p.\text{норм}} = 3 \cdot I_{\text{нг}}^2 \cdot R_p = 3 \cdot \Delta P_{p.\text{норм}} \cdot (I_{\text{нг}} / I_{\text{ном}})^2 \quad (3.12)$$

$$\Delta Q_{p.\text{норм}} = 3 \cdot I_{\text{нг}}^2 \cdot X_p \quad (3.13)$$

$$\Delta W_{p.\text{норм}} = 3 \cdot I_{\text{нг max}}^2 \cdot R_{pt} \quad (3.14)$$

де T — час максимальних втрат.

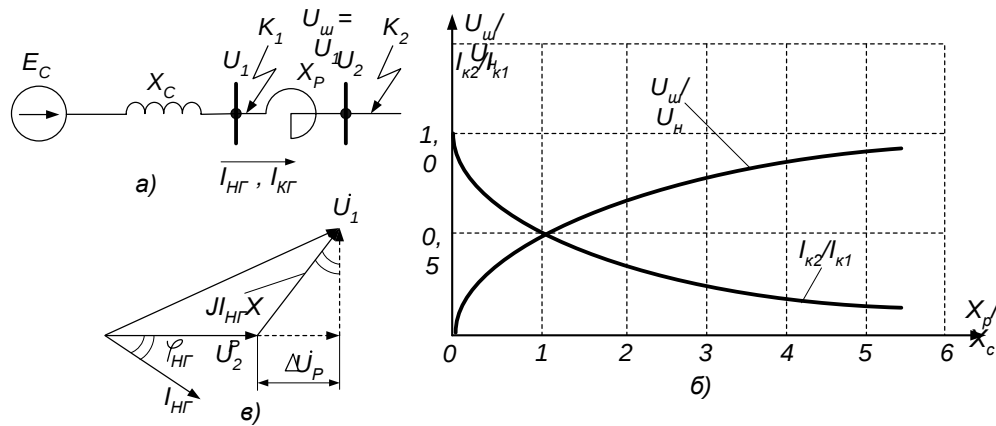


Рисунок 3.4 - Умови роботи лінійного реактора.

а — схема, що пояснює, б - струмообмежуючу дію реактора; в - векторна діаграма

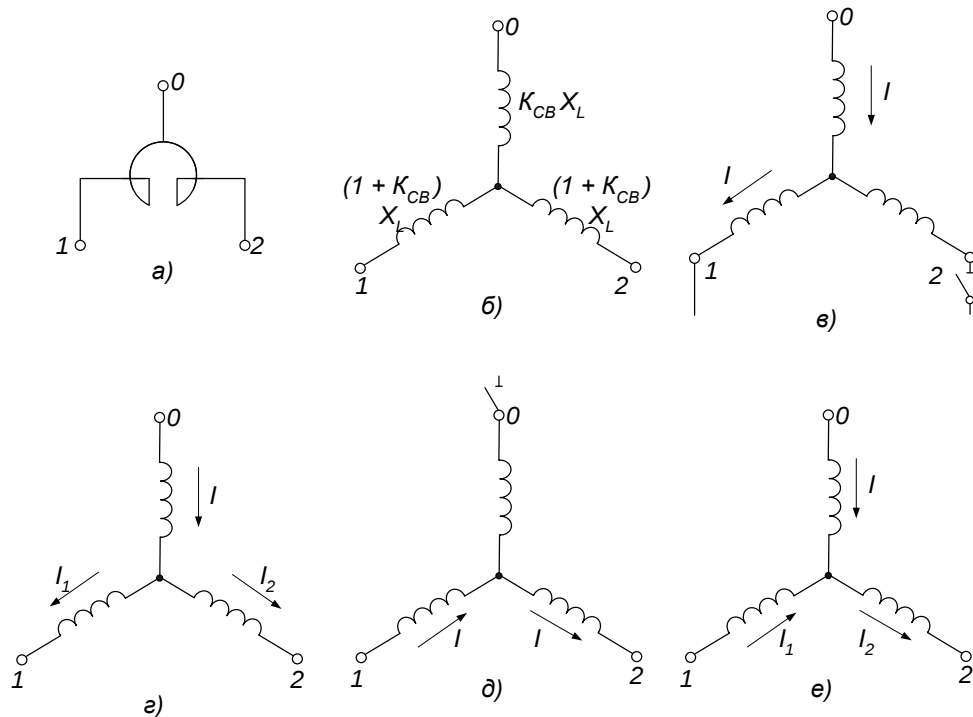


Рисунок 3.5 Режими роботи здвоєних реакторів.

а-пояснювальна схема; б — схема заміщення здвоєного реактора; в — одноланцюговий режим, м — двохланцюговий (наскрізний) режим; д — подовжній режим; е — подовжньо одноланцюговий (комбінований) режим.

Здвоєні реактори, що мають центральну точку виводу обмотки, демонструють більш привабливі техніко-економічні показники в порівнянні з одинарними лінійними реакторами, особливо щодо втрат напруги та реактивної потужності в нормальному режимі роботи. Завдяки наявності магнітного зв'язку між витками двох гілок здвоєного реактора можливо зменшити втрати напруги, не знижуючи при цьому ефективності струмообмеження в аварійних ситуаціях.

Коефіцієнт магнітного зв'язку (k) між витками обмоток здвоєних реакторів визначається наступним чином [14]:

$$k_{\text{св}} = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2} = M / L \quad (3.15)$$

Схема заміщення здвоєного реактора представлена на рисунку 3.5,б. В практиці експлуатації здвоєних реакторів виділяють декілька типових режимів роботи, серед яких:

- одноланцюговий (рисунок 3.5,в);
- дволанцюговий або наскрізний (рисунок 3.5,г);
- подовжній (рисунок 3.5,д);
- продольно-однolанцюговий або комбінований (рисунок 3.5,е).

$$X_{\text{однол}} = X_L$$

$$X_{\text{двохл}} = X_{\text{скв}} = \frac{1}{2}(1 - k_{\text{зв}}) \cdot X_L \quad \text{при } L_1 = L_2 \quad (3.16)$$

$$X_{\text{повз}} = 2(1 + k_{\text{зв}}) \cdot X_L$$

Результуючі опори здвоєних реакторів у зазначених режимах визначаються відповідними формулами та є ключовими характеристиками для їх вибору та експлуатації.

Варто зазначити, що допустимі значення коефіцієнта магнітного зв'язку здвоєних реакторів зазвичай обмежуються через максимально допустимий рівень перенапруги, що виникає на відключеній або слабко навантаженій обмотці реактора при короткому замиканні іншої обмотки (рисунок 3.6). Практичні значення коефіцієнта магнітного зв'язку, що застосовуються в реальних здвоєних реакторах, знаходяться у діапазоні від 0,4 до 0,6.

Секційні реактори, завдяки особливостям схеми їх включення, при однакових початкових умовах мають нижчу ефективність обмеження струмів короткого замикання порівняно з лінійними реакторами. Додатково, секційні реактори характеризуються підвищеними номінальними струмами, необхідними для забезпечення нормальних потоків потужності в післяаварійних та ремонтних режимах, що додатково зменшує їхню струмообмежувальну здатність.

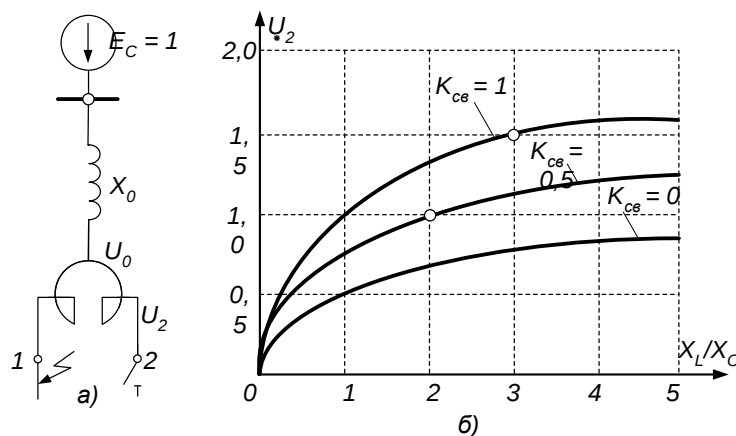


Рисунок 3.6 - Напруга на виводах відключеної вітки здвоєного реактора при к.з на виводах іншої вітки. а — пояснювальна схема, б — залежність напруги від коефіцієнта зв'язку і відносного опору вітки реактора.

За умови, що еквівалентні е.р.с. узагальнених систем з однієї і з іншої сторін від реактора рівні ($E_{c1}=E_{c2}=1$), маємо

$$\frac{I_{кр}}{I_{кнб}} = \frac{1}{1 + \frac{\beta^2 \alpha}{1 + \beta + \beta \alpha}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\gamma^2 + \gamma + \gamma \alpha}} = \frac{1}{1 + \frac{\beta \lambda}{1 + \beta + \lambda}} \quad (3.17)$$

де $a=x_p/x_{c2}$; $y=x_{c2}/x_{c1}$, $\lambda=x_p/x_{c1}$; $\gamma=x_{c1}/x_{c2}$; $I_{кр}$ тік--струм в крапці до з при наявності в мережі секційного реактора; $I_{кнб}$ — найбільший струм в точці к.з. при відсутності в мережі секційного реактора (секційний ланцюг замкнутий)

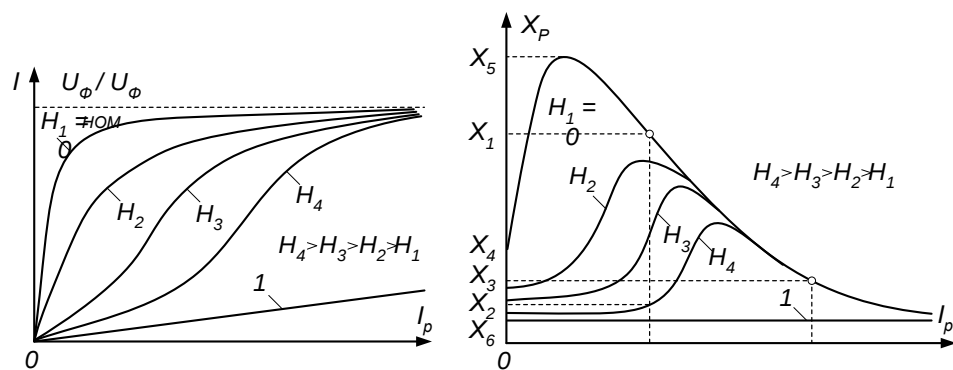


Рисунок 3.7 - Вольт амперні характеристики керованого реактора при різному ступені підмагнічування магнітопровода полем постійного струму — характеристика обмотки змінного струму реактора при відсутності підмагнічуваного магнітопровода

Струмообмежувальна здатність секційних реакторів, як правило, є обмеженою і значною мірою залежить від співвідношення їх власного індуктивного опору до еквівалентного опору електричної системи. Ефективність таких реакторів знижується зі збільшенням густоти електричної мережі, що пояснюється зростаючим впливом шунтуючих ланцюгів. Попри це, секційні реактори мають перевагу у вигляді мінімальних

втрат активної та реактивної потужності, а також менших втрат енергії й напруги в умовах нормальної роботи електроустановок.

До класу струмообмежувальних пристроїв з нелінійною вольт-амперною характеристикою належать керовані реактори та реактори, що насичуються. Керовані реактори являють собою варіант регульованих індуктивних пристроїв зі сталевим магнітопроводом, індуктивність яких змінюється в результаті впливу поля підмагнічування (зазвичай створеного постійним або випрямленим струмом).

За схемою підмагнічування розрізняють реактори з поздовжнім, поперечним та кільцевим підмагнічуванням. За рахунок спеціального розташування обмоток та їх відповідного з'єднання досягається електромагнітна розв'язка між колами змінного та постійного струму. У випадку кільцевого підмагнічування забезпечується магнітна симетрія, що дозволяє одержати майже синусоїдальний струм без значних гармонік у широкому діапазоні зміни струму підмагнічування.

Оцінка параметрів таких реакторів проводиться на основі подвійних кривих намагнічування, притаманних феромагнітним матеріалам. Якісну зміну індуктивності реактора в залежності від ступеня підмагнічування демонструє рисунок 3.7. Для кількісної оцінки застосовуються коефіцієнт регулювання $K_{\text{рег}} = x_1/x_2$ та коефіцієнт струмообмеження $K_{\text{со}} = x_3/x_2$, які відображають зміну опору реактора при різних режимах роботи.

Сучасні конструкції керованих реакторів, розроблені в науково-дослідних інститутах, демонструють $K_{\text{рег}}$ у діапазоні від 8 до 10 та $K_{\text{со}}$ від 4 до 72.

Реактори, що насичуються, є некерованими індуктивними пристроями з вираженою нелінійністю вольт-амперної характеристики. Нелінійна поведінка зумовлена насиченням магнітопроводу змінним струмом. Такі

реактори можуть мати як замкнуту магнітну систему, так і конструкцію з повітряними проміжками. Відсутність повітряних зазорів формує залежність типу $\mu = f(H)$, яка обумовлює експлуатаційні властивості пристрою.

Реактори, що насичуються, можуть працювати як на зростаючій, так і на спадній ділянках характеристики $I = f(x)$. При роботі на зростаючій частині характеристика забезпечує зростання опору в міру збільшення струму в межах x_4 до x_5 , що бажано з точки зору струмобмеження. У режимі спадної частини характеристики реактор демонструє зниження опору із зростанням струму в діапазоні x_5 до x_6 , що спричиняє нелінійні спотворення. Водночас, такий режим дозволяє реалізувати обмеження струму при зниженні напруженості поля в магнітопроводі. Тому насичувані реактори можуть застосовуватись як самостійні струмобмежувальні елементи або як компоненти складніших схем.

3.3 Трансформатори та автотрансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги

У практиці проектування електростанцій та підстанцій широке застосування знайшли силові трансформатори та автотрансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги. Їх використання дозволяє суттєво знизити струми короткого замикання в колах низьковольтного боку.

Підвищувальні трансформатори такого типу часто застосовуються при формуванні генераторних блоків на гідроелектростанціях, тоді як знижувальні трансформатори – на енергетичних підстанціях, у промислових електромережах та в системах власних потреб ТЕС і АЕС.

Типові схеми з'єднання трансформаторів з розщепленою на дві або три секції обмоткою нижчої напруги наведені на рисунку 3.8. Також представлено відповідні схеми заміщення.

Визначальним параметром таких трансформаторів є опір розщеплення $X_{рощ}$, який характеризує опір між двома довільними частинами розщепленої обмотки. За умови однаковості частин, наскрізний опір $x_{скв}$, тобто опір між виводами обмоток вищої напруги і об'єднаними точками частин обмотки нижчої напруги, приймається сталим. Коефіцієнт розщеплення визначається як:

$$K_{рощ} = X_{рощ} / x_{скв}$$

Цей параметр дозволяє оцінити ефективність зменшення струмів к.з. у вторинних ланцюгах трансформатора.

$$X_{рощ} = X_{HH1-HH2} = X_{HH2-HH3} = X_{HH1-HH3}$$

При розщепленні обмотки на дві частини $K_{рощ} < 4$, при розщепленні обмотки на три частини $K_{рощ} < 6$.

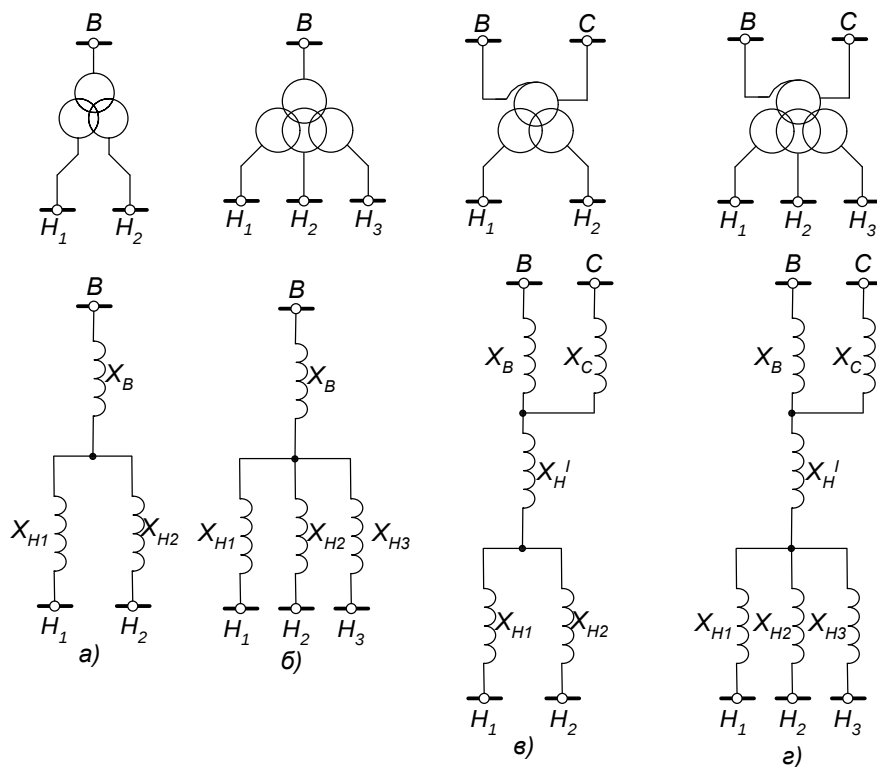


Рисунок 3.8 -. Вихідні схеми з'єднання силових трансформаторів і автотрансформаторів з розщепленою обмоткою нижчої напруги і відповідні їм схеми заміщення.

а — трансформатор з розщепленням обмотки на дві частини; б — трансформатор з розщепленням обмотки на три частини; в — автотрансформатор з розщепленням обмотки на дві частини; м - автотрансформатор з розщепленням обмотки на три частини.

Силові трансформатори і автотрансформатори, що складаються з групи однофазних елементів, представлені за допомогою знаків рівності. З урахуванням вищевказаного, параметри елементів у схемах заміщення, зображених на Рисунку 3.8, будуть такі:

для схеми заміщення на рисунку 3.8, а

$$X_{H1} = X_{H2} = X_{роц} / 2 = X_{скв} \cdot K_{роц} / 2$$

$$X_B = X_{скв} - X_{роц} / 4 = X_{скв} \cdot (1 - K_{роц} / 4) = X_{ВН} \cdot (1 - K_{роц} / 4);$$

- для схеми заміщення на рисунку 3.8, б

$$X_{H1} = X_{H2} = X_{H3} = X_{роц} / 2$$

$$X_B = X_{скв} - X_{роц} / 6 = X_{скв} \cdot (1 - K_{роц} / 6) = X_{ВН} \cdot (1 - K_{роц} / 6);$$

- для схеми заміщення на рисунку 3.9, в

$$X_{H1} = X_{H2} = X_{роц} / 2$$

$$X_B = (X_{B-H} + X_{B-C} - X_{C-H}) / 2$$

$$X_C = (-X_{B-H} + X_{B-C} + X_{C-H}) / 2$$

$$X_H = (X_{B-H} - X_{B-C} + X_{C-H}) / 2$$

$$X'_H = X_H - X_{роц} / 4$$

$$K_{роц} = X_{роц} / X_{скв} = X_{роц} / X_{скв, BC-H} = X_{роц} / [(X_B \parallel X_C) + X_H]$$

- для схеми заміщення на рисунку 3.8, г

$$X_{H1} = X_{H2} = X_{H3} = X_{\text{роц}} / 2$$

$$X_B = (X_{B-H} + X_{B-C} - X_{C-H}) / 2$$

$$X_C = (-X_{B-H} + X_{B-C} + X_{C-H}) / 2$$

$$X_H = (X_{B-H} - X_{B-C} + X_{C-H}) / 2$$

$$X'_H = X_H - X_{\text{роц}} / 6$$

$$K_{\text{роц}} = X_{\text{роц}} / X_{\text{скв}} = X_{\text{роц}} / X_{\text{скв, BC-H}} = X_{\text{роц}} / [(X_B \parallel X_C) + X_H]$$

Зазначимо, що перед підстановкою в наведені вирази всі опори (напруги к.з.) повинні бути приведені до номінальної потужності трансформатора або автотрансформатора.

3.4 Струмообмежуючі комутаційні апарати

Струмообмежувальні комутаційні апарати призначені для оперативного регулювання та обмеження струмів короткого замикання (к.з.) у початковий момент аварійного режиму. Їх принцип дії полягає у швидкому обмеженні ударного струму к.з. протягом першого напівперіоду його протікання та негайному відключенні пошкодженого ланцюга. Умовою ефективної роботи таких апаратів є нерівність:

$$I_{\text{скв}} < i_{\text{уд.оч}}$$

де $I_{\text{скв}}$ — наскрізний струм ланцюга при к.з.; $i_{\text{уд.оч}}$ — очікуваний ударний струм ланцюга при к.з.

До групи струмообмежувальних комутаційних апаратів належать струмообмежувальні запобіжники та обмежувачі ударного струму вибухової дії. Їх характерною особливістю є миттєва дія та здатність обмежувати перший пік струму к.з., що забезпечує зниження електродинамічного та термічного навантаження на обладнання.

Силові струмообмежувальні запобіжники типів ПК і ПКТ виготовляються для внутрішніх і зовнішніх електроустановок з

номінальними напругами від 3 до 35 кВ і відносно малими номінальними струмами. Залежність наскрізного струму короткого замикання $I_{скв}$ від попереднього струму $I_{п0}$ та номінального струму $I_{ном}$ можна представити як функцію:

$$I_{скв} = f(I_{п0}, I_{ном})$$

Запобіжники відрізняються простою конструкцією, низькою собівартістю, однак мають суттєві недоліки: одноразову дію, нестабільність у часі, обмежену надійність та вузький діапазон номіналів струму і напруги. Вони не підлягають зовнішньому керуванню і не можуть використовуватись у схемах з автоматичним повторним включенням (АПВ). Через це їх застосування обмежується ланцюгами з невисокими вимогами до надійності.

Запобіжники можуть діяти як основні комутаційні пристрої, встановлені безпосередньо в ланцюгу, що захищається, або як допоміжні елементи для шунтування секційних чи лінійних реакторів у нормальному режимі роботи.

Обмежувачі ударного струму вибухової дії — це високошвидкодійні, одноразові, керовані комутаційні апарати з великим номінальним струмом. Їх розробку здійснено в ряді країн. Наприклад, обмежувачі фірми «KALOR-EMAG» (ФРН), реалізовані у вигляді комірок КРП, мають такі технічні характеристики:

Таблиця 3.1

Номінальна напруга, кВ	0,75					10 12			20 24			30 36	
Номінальний струм, кА	1	2	3	4	5	1	2	3	1	1	6	2	

Конструктивно обмежувач являє собою герметичний циліндр з вмонтованим струмопровідним елементом, всередину якого інтегровано піропатрон. Вибуховий пристрій приводиться в дію сигналом, отриманим від зовнішньої системи керування, що реагує на величину струму к.з. та його похідну. Обмеження струму відбувається за $\sim 0,5$ мс, а повне відключення триває до 5 мс, що відповідає $1/4$ періоду мережі промислової частоти.

Для уникнення перенапруг при такій швидкій дії обмежувачі оснащуються шунтуючим запобіжником спеціальної конструкції. Проведені дослідження засвідчили, що перенапруга при спрацьовуванні не перевищує 18% фазної напруги мережі. У деяких моделях передбачено орган напрямку потужності, що розширює функціональність пристроїв.

У порівнянні із запобіжниками, обмежувачі ударного струму мають значні переваги:

- керованість від зовнішніх пристроїв;
- наявність спрямованої дії;
- висока стабільність та надійність;
- можливість реалізації одно-, дво- та трифазного відключення;
- більші номінальні струми.

Разом із тим, ці пристрої мають певні обмеження — одноразову дію, труднощі при реалізації АПВ, високу складність схеми керування та відносно високу вартість. Їх застосування наразі обмежено мережами з напругою до 35 кВ.

Типові варіанти включення обмежувачів ударного струму наведено на рисунку 3.9.

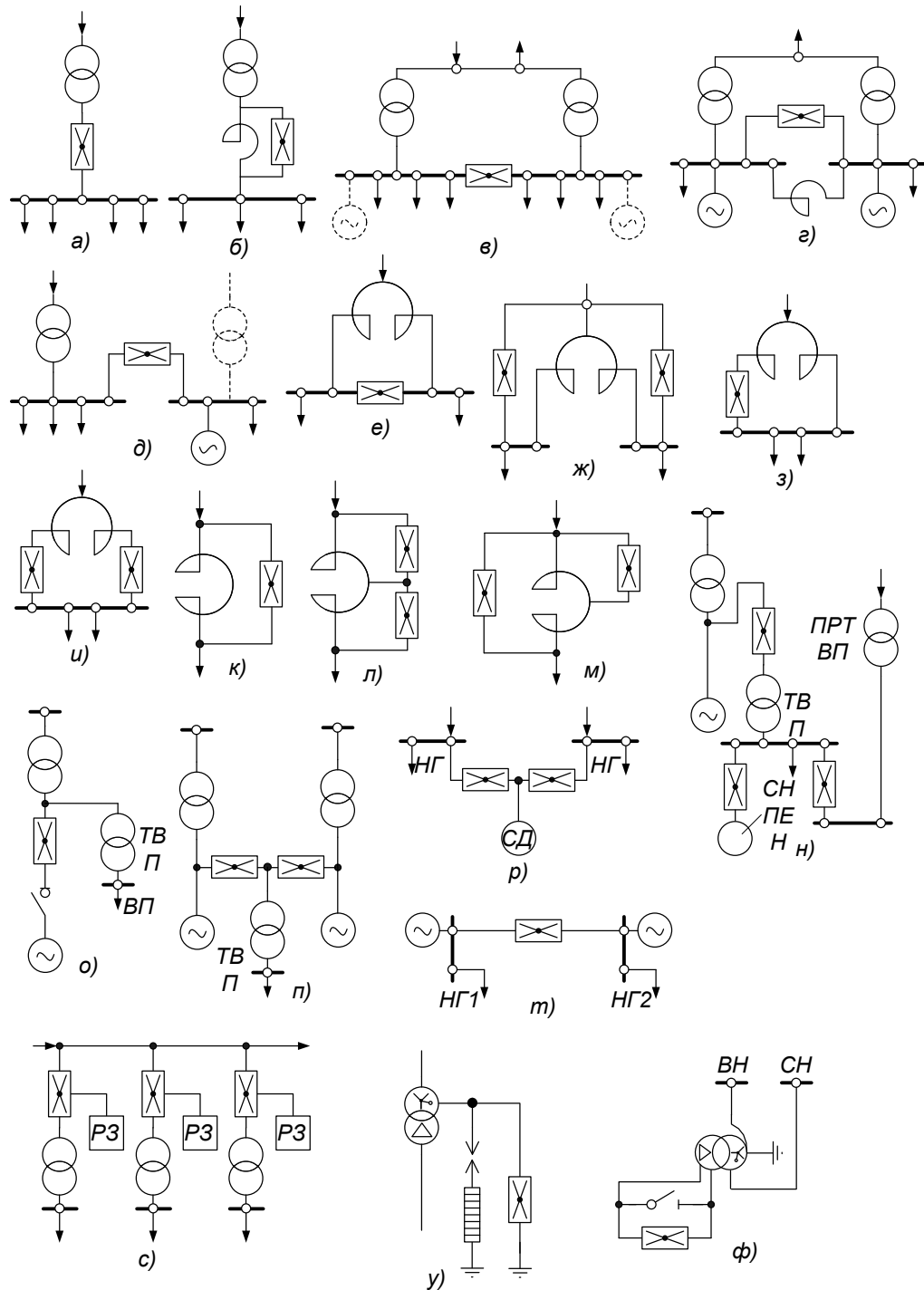


Рисунок 3.9 Можливі схеми включення обмежувачів ударного струму

У робочих режимах електричних установок напруга в реакторах відіграє ключову роль у формуванні нормальних умов роботи елементів мережі. Зокрема, у схемах, представлених на рисунку 3.9, варіанти "у" та "д" демонструють можливість реалізації режиму паралельної роботи за допомогою встановлених обмежувачів ударного струму.

Схеми, що зображені на рисунках 3.9, варіанти "б", "м", "е", "ж-м", розрізняються способом шунтування як одинарних, так і здвоєних реакторів. Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати активної та реактивної потужності та забезпечити стабільну роботу мережного обладнання, особливо в умовах зниженої комутаційної здатності чи нестійкості електричних мереж.

У схемі, наведеній на рисунку 3.9, обмежувачі ударного струму виконують функцію захисту блоку та трансформатора системи власних потреб (СВП). Вони забезпечують безпечне перемикання живлення з основного джерела на резервне та навпаки, а також дають змогу миттєво вимкнути електропривод живильного насоса (ПЕН) при критичних струмах короткого замикання в СВП. При цьому розрахункові умови короткого замикання в СВП значно спрощуються, оскільки насос ПЕН може бути виключений із розрахункової схеми.

Також, у схемі рисунка 3.9 представлено варіант встановлення обмежувача ударного струму в ланцюзі блоку, де він працює як полегшений апарат – вимикач навантаження. В комбінації з двома додатковими обмежувачами ударного струму та органами напрямку потужності, така схема забезпечує гарантоване електроживлення від двох незалежних джерел. Це має принципове значення для об'єктів хімічної промисловості, а також для так званих споживачів нульової категорії, для яких недопустиме навіть короткочасне припинення електропостачання.

У ще одному варіанті (рисунок 3.9) показано, як обмежувачі ударного струму майже повністю виключають вплив коротких замикань у трансформаторах підстанцій, що приєднані до відгалужень, на загальний режим функціонування зовнішньої мережі. Це стосується і інших підстанцій, які також підключені до тих самих відгалужень живильної лінії.

Крім того, в одній із схем на рисунку 3.9 представлена можливість безінерційного автоматичного розподілу мережі при короткому замиканні. В іншій — обмежувач ударного струму виконує розмикання третинної обмотки автотрансформатора при виникненні потужних струмів замикання на землю у прилеглих мережах.

Таким чином, спектр застосування обмежувачів ударного струму в сучасних енергосистемах є надзвичайно широким. Вони забезпечують ефективне обмеження аварійних струмів, підвищують надійність функціонування системи та дозволяють реалізувати складні схеми резервування та захисту.

3.5 Струмообмежуючі пристрою резонансного типу

До перспективних технічних рішень з обмеження струмів короткого замикання (к.з.) належать резонансні струмообмежувальні пристрої (РСП), принцип дії яких базується на використанні явища електричного резонансу у нормальних режимах роботи та його порушення під час аварій. У таких умовах пристрої автоматично переходять у струмообмежувальний режим.

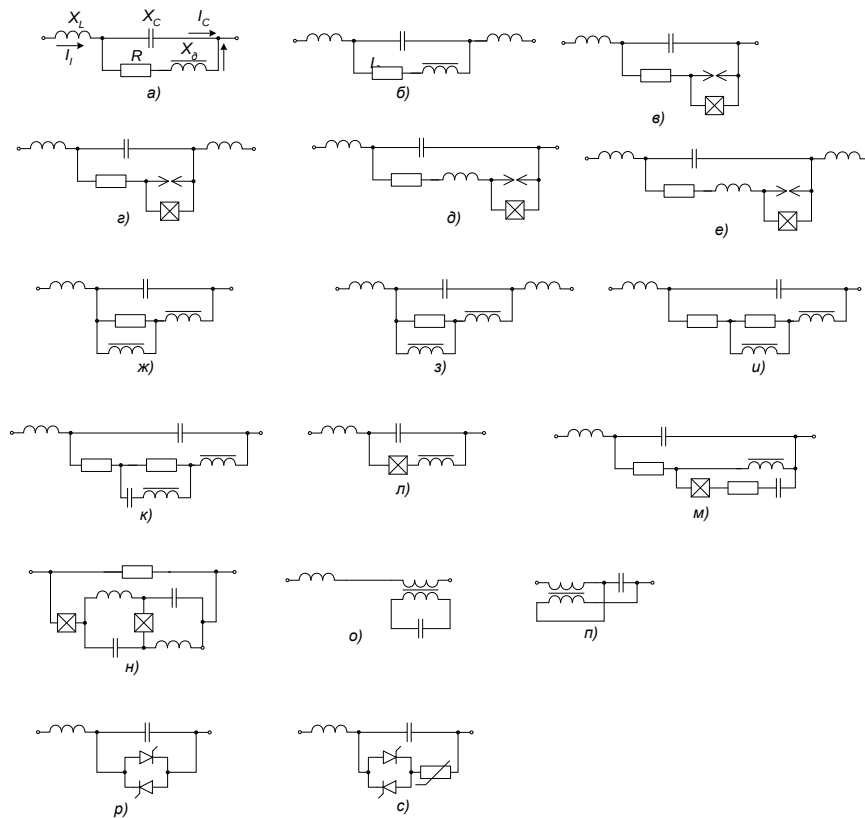


Рис 3.10 - Струмообмежуючі пристрої резонансного типу.

Станом на сьогодні існує понад 100 реалізованих схемних модифікацій РСП, які відрізняються як складом елементної бази, так і методами розстройки резонансу. Найбільш поширені варіанти таких схем наведено на рисунку 3.10. Зокрема:

- у схемах типу 3.10, а, б, ж, з, і, к, м – розстройка резонансу досягається шляхом включення реактора з нелінійною магнітною характеристикою;
- у схемах 3.10, в, д, е – за допомогою розрядника, який згодом шунтується швидкодіючим вимикачем;
- у схемах 3.10, л, н – шляхом застосування високошвидкісних вимикачів;
- у варіантах 3.10, о, п – через насичення магнітопроводу трансформатора серійного з'єднання;

- у схемах 3.10, р, с – за допомогою тиристорного комутаційного елемента [13] .

Загальна ефективність таких пристроїв значною мірою визначається коректністю вибору параметрів окремих елементів, які повинні відповідати низці технічних та економічних обмежень. Розглянемо приклад схеми (рисунок 3.10, а) з одним нелінійним реактором. При нехтуванні спотвореннями і резонансній умові $X_L = X_C$, діє співвідношення:

$$Z_{\text{сп}} = \frac{X^2 L}{R + j(X_d - X_L)} = \frac{RX^2 L}{R^2 + (X_d - X_L)^2} + j \frac{X^2 L}{R^2 + (X_d - X_L)^2} = R_e + j(X_L - X_e)$$

де R_e , X_e , — еквівалентні вхідні опори контура З, R, Xя.

Вимоги до параметрів РСП з урахуванням обмеження струму короткого замикання, тривалості перехідного процесу та забезпечення стабільної роботи пристрою зводяться до наступних умов:

$$R/x > 0,3; \quad X_{\text{днас}}/x < 1; \quad U_{\text{спт.доп}} < K_u U_{\text{ном}} \quad X_{\text{днас}}/x > 10$$

Крім цього, параметри окремих елементів обирають з урахуванням допустимої кратності струму короткого замикання $K_i = I_{\text{пр}}/I_{\text{ном}} K_i = I/I$, а також залежно від місцевих умов експлуатації.

Навіть за відсутності розстройки, РСП діють як адаптивні обмежувачі темпу зростання струму короткого замикання. Ефективність обмеження тісно пов'язана з добротністю резонансного контуру Q. Загальна динаміка зміни струму описується залежністю:

$$i = I_{\infty \text{MAX}} (1 - e^{bt}) \cdot \cos(\omega t + \alpha)$$

де $I_{\text{макс}}$ — амплітуда сталого струму к.з. в ланцюзі; $b = \omega\omega/2Q$ — коефіцієнт загасання; ω — частота мережі; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ — частота власних коливань

резонансного контуру; Q — добротність контуру; α — початкова фаза струму к.з.

Дослідження динаміки та статички резонансних СП, проведені в Московському енергетичному інституті (МЕІ) з використанням аналогових обчислювальних машин та лабораторних стендів, засвідчили їх технічну здійсненність і високу ефективність в реальних енергосистемах.

Важливо підкреслити, що при коректному виборі параметрів резонансні пристрої можуть виконувати функції багатофункціонального елементу системи, а саме:

- регулювання напруги;
- обмеження струмів короткого замикання;
- реалізація функції гальмування генераторів у перехідних режимах.

3.6 Струмообмежуючі пристрої трансформаторного типу

Основу трансформаторних струмообмежуючих пристроїв (СОП) становить послідовно включений силовий трансформатор, вторинна обмотка якого замкнена на нелінійний опір або інший керований елемент, наприклад тиристорний ключ або обмежувач ударного струму. Важливо, щоб конструкція трансформатора забезпечувала ненасичення магнітопроводу при граничних значеннях струму короткого замикання у випадку розімкнення вторинного кола.

У типовій схемі (рисунок 3.11, а) захист здійснюється через миттєве роз'єднання вторинної обмотки за допомогою обмежувача ударного струму, що забезпечує надшвидке струмообмеження. Альтернативно, як показано на

рисунку 3.11, б, застосовується тиристорний вимикач, який дозволяє реалізувати регульований перехід між робочим та обмежувальним режимами.

У конфігурації, зображеній на рисунку 3.11, в, вторинна обмотка замкнена на ємнісний опір, що компенсує реактивну складову падіння напруги у первинному колі трансформатора. Така схема забезпечує стабілізацію напруги в номінальному режимі, не погіршуючи струмообмежувальної функції.

Схема на рисунку 3.11, г додатково містить конденсаторну батарею, яка шунтується тиристорним вимикачем, що дає можливість гнучко налаштовувати параметри апарата у широкому діапазоні експлуатаційних режимів. У разі виникнення короткого замикання відбувається комутація тиристора, яка змінює конфігурацію вторинного кола і переходить пристрій у струмообмежувальний стан.

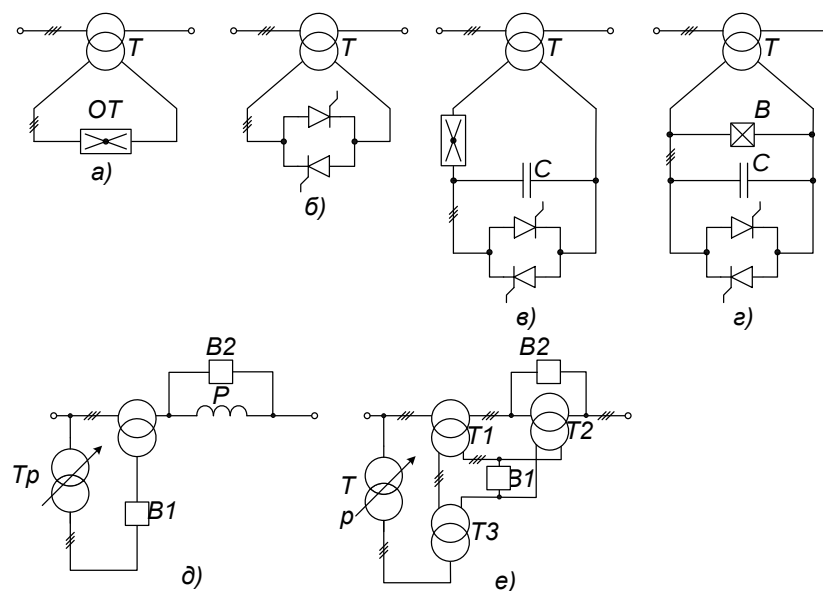


Рисунок 3.11 - Струмообмежуючі пристрої трансформаторного типу.

Конструктивно складніша схема (рисунку 3.11, д) передбачає паралельне підключення вторинної обмотки основного трансформатора до

вторинної обмотки допоміжного трансформатора, функція якого подібна до регулювального автотрансформатора. У ланцюг первинної обмотки включено реактор, що дешунтується в нормальному режимі. У разі к.з. відбувається розмикання вторинного кола основного трансформатора, а при необхідності — і дешунтування реактора.

Найбільш комплексну реалізацію демонструє схема на рисунку 3.11, е, яка містить чотири трансформатори: Т1 і Т2 — у первинному колі, ТР — як регулювальний трансформатор і ТЗ — як допоміжний роздільний елемент. У нормальному режимі тиристорні вимикачі В1 і В2 знаходяться у замкнутому стані. При короткому замиканні В1 миттєво розмикається, змінюючи умови роботи схеми. За необхідності В2 також розмикається, забезпечуючи глибоке обмеження струму. Різноманітність модифікацій таких схем дозволяє адаптувати їх до різних умов експлуатації.

3.7 Струмообмежуючі пристрої реакторно-вентильного типу

Комбіновані струмообмежуючі пристрої реакторно-вентильного типу поєднують у собі індуктивні елементи та силову електроніку. У схемі, представлений на рисунку 3.12, а, частина витків реактора нормально шунтується тиристорним ключем. У випадку аварійного режиму, тиристор відключається, вводячи в роботу додатковий індуктивний опір, що обмежує зростання струму к.з.

Варіант на рисунку 3.12, б передбачає включення реактора у вторинне коло трансформатора послідовного включення. У нормальному режимі через нього протікає випрямлений струм, для якого реактор має низький опір. Під час короткого замикання вентилі у вторинному колі миттєво розривають коло, забезпечуючи захист первинного ланцюга.

У схемі 3.12, в реактор включено в діагональ мостової випрямної схеми, де обмеження струму досягається за аналогією з миттєвим дешунтуванням реактора. Даний підхід дозволяє здійснити безінерційне введення реактора, що значно знижує амплітуду ударного струму.

У схемі 3.12, г застосовано здвоєний реактор, в одному з витків якого розміщується тиристорний вимикач. При нормальному режимі через вимикач проходить половина струму захищеного кола, що полегшує вибір електронних компонентів. При к.з. відключення витка реактора приводить до різкого збільшення опору кола, після чого відбувається комутація мережними апаратами.

У вдосконаленій конфігурації (рисунок 3.12, д) тиристори встановлені в обох витках здвоєного реактора. Один призначений для збільшення індуктивного опору, інший — для розриву кола при проходженні струму через нульову точку. Таким чином досягається одночасно струмообмеження та ефективне аварійне відключення.

У практиці також розроблено додаткові модифікації реакторно-вентильних СОП, спрямовані на покращення швидкодії, зниження втрат та підвищення надійності роботи в мережах середньої та високої напруги.

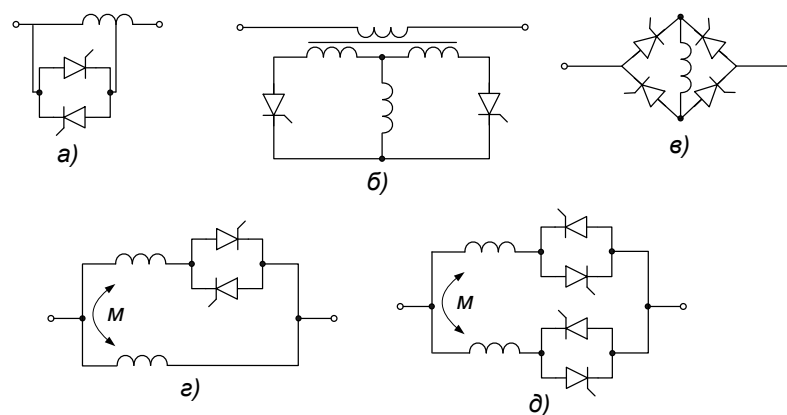


Рисунок 3.12 - Струмообмежуючі пристрої реакторно-вентильного типу

3.8 Струмообмежуючі пристрої з надпровідниками

Деякі метали, а також спеціально синтезовані матеріали, за температур, близьких до абсолютного нуля (у діапазоні від 1 до 18 К), здатні переходити у надпровідний стан, тобто характеризуються практично нульовим електричним опором. Це дозволяє розглядати їх як потенційно ефективні елементи струмообмежувальних пристроїв. Основною особливістю є те, що надпровідний стан зберігається лише за умови, що напруженість магнітного поля H на поверхні надпровідника не перевищує певне критичне значення $H_{кр}$

$$H_{кр} = H_0 \left[1 - \left(T/T_{кр} \right)^2 \right]$$

де H_0 — критична напруженість поля при температурі, рівної абсолютному нулеві.

Завдяки цій особливості, зміна температури або локального магнітного поля дозволяє миттєво перевести матеріал з надпровідного у резистивний стан, що забезпечує практично миттєве обмеження струму. Саме це явище і покладено в основу принципу дії струмообмежувачів на базі надпровідників.

Однак основним недоліком таких пристроїв є необхідність постійного підтримання кріогенних умов, зокрема температур нижче $T_{кр}$. Це потребує наявності дорогого обладнання для охолодження, зокрема використання рідкого гелію або високоефективних холодильників (рефрижераторів). Через це такі системи доцільно застосовувати лише у тих випадках, коли надпровідність вже використовується в інших елементах електроенергетичної системи — генераторах, трансформаторах, лініях електропередачі — де централізоване охолодження вже забезпечене.

На рисунку 3.13 наведені принципові реалізації струмообмежувальних пристроїв із застосуванням надпровідних елементів.

У схемі, зображеній на рисунку 3.13а, використано надпровідний елемент, який функціонує без зовнішнього керування. Такий елемент може бути включений безпосередньо в захищений ланцюг або у шиноз'єднувальний (секційний) комутаційний пристрій. При виникненні короткого замикання, коли струм перевищує критичне значення, надпровідник миттєво переходить у резистивний стан, що призводить до різкого зростання опору і обмеження струму. Важливо забезпечити тепловий захист такого елемента, оскільки надмірне нагрівання може призвести до його пошкодження або навіть руйнування.

Більш функціонально досконалим є пристрій, зображений на рисунку 3.13б, в якому надпровідний елемент реалізовано у вигляді криотрона — спеціалізованого пристрою з можливістю керування перехідними процесами за допомогою зовнішнього магнітного поля, що генерується автоматизованою системою. Такий підхід дозволяє керувати введенням або виведенням надпровідника із робочого режиму, що значно розширює функціональні можливості та підвищує надійність захисту мережі.

У зв'язку з розвитком технологій високотемпературної надпровідності (HTS), дослідження у цьому напрямі активно продовжуються, зокрема з метою зниження витрат на охолодження та підвищення експлуатаційної ефективності таких струмообмежувальних пристроїв.

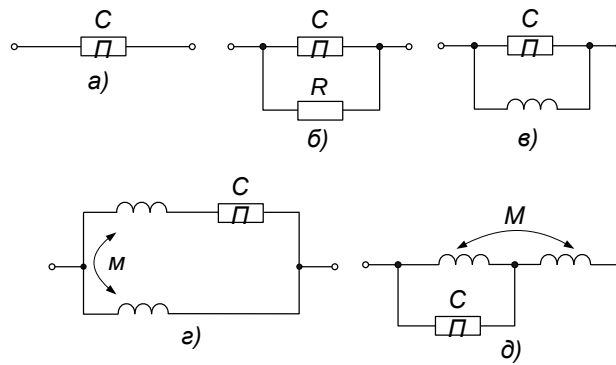


Рисунок 3.13 - Струмообмежуючі пристрої з надпровідниками.

На схемі, зображеній на рисунку 3.13б, криотрон виконує функцію резистора, тоді як на схемі, зображеній на рисунку 3.13в, він виконує функцію реактора. У схемі на рисунку 3.13г, криотрон відключає одну з витоків здвоєного реактора, а у схемі на рисунку 3.13д, він дешунтує витку здвоєного реактора.

3.9 Вставки постійного струму і змінного струму непромислової частоти

У сучасних електроенергетичних системах з переважним використанням змінного струму, з'являється потреба у застосуванні вставок постійного струму (ВПС) та вставок змінного струму непромислової частоти (ВЗСНЧ) як засобів забезпечення гнучкості структури мережі, підвищення стійкості та оптимізації режимів передачі потужності.

Вставки постійного струму

Вставка постійного струму, схема якої представлена на рисунку 3.14, а, є двоетапним перетворювальним комплексом, що включає:

- випрямляч ВВ,
- інвертор ІІ,
- лінію постійного струму ЛЛ,

- відповідні трансформатори $T1T_1$ та $T2T_2$, які забезпечують адаптацію напруги до випрямляча та інвертора відповідно.

Такі вставки виконують функцію гнучкого з'єднання енергетичних підсистем, які можуть мати як однакову, так і різну частоту (наприклад, 50 і 60 Гц). Крім того, ВПС ефективно ізолюють з'єднувані мережі у динамічних режимах, запобігаючи передаванню перехідних процесів між ними. У деяких випадках, за наявності економічної доцільності, такі вставки застосовуються як короткі з'єднувальні ділянки або як елементи струмообмеження, зокрема між підсистемами з різною номінальною напругою.

Особливість роботи ВПС полягає у наступному: струм у точці $K1K_1$, з боку випрямляча, формується виключно параметрами підключеної до нього системи $C1C_1$. З іншого боку, струм у точці $K2K_2$, на стороні інвертора, визначається параметрами системи $C2C_2$. Інші джерела енергії не впливають на ці точки, оскільки обмежуються номінальним струмом вставки.

Використання вставок постійного струму в електроенергетиці обмежується переважно високими капітальними витратами, обумовленими вартістю перетворювальних підстанцій. Однак прогрес у галузі силової електроніки, зниження вартості напівпровідникових елементів, а також підвищення надійності елементної бази зумовлює зростання зацікавленості до такого типу вставок в майбутньому.

Вставки змінного струму непромислової частоти

Вставки змінного струму з частотою, що відрізняється від стандартної промислової (наприклад, 25 Гц замість 50 Гц), є ще одним варіантом технологічного розв'язання задачі з'єднання мереж промислової частоти. Принципова схема такої вставки представлена на рисунку 3.14, б. Її структура включає:

- феромагнітний перетворювач частоти (дільник) П1П_1,
- лінію електропередачі ЛЛ,
- феромагнітний перетворювач частоти (помножувач) П2П_2.

Частота передачі в лінії зазвичай становить $f_p = 25$ Гц. Такі вставки є односпрямованими в плані потоку потужності (аналогічно лінії з одностороннім живленням), тобто передача потужності можлива лише в одному напрямку.

У випадку короткого замикання або перемикання в точках К1К_1 і К2К_2, відповідні струми формуються лише системами С1С_1 і С2С_2, що також забезпечує ізоляцію режимів функціонування підсистем.

Порівняльна перевага ВЗСНЧ полягає в тому, що:

- вартість феромагнітних перетворювачів значно нижча, ніж вартість випрямних та інверторних станцій;
- схема реалізації значно простіша;
- експлуатаційна надійність вища.

Ці фактори дозволяють розглядати ВЗСНЧ як техніко-економічно ефективнішу альтернативу у певних сценаріях розвитку мереж.

Таким чином, обидва типи вставок — постійного струму та змінного струму непромислової частоти — мають специфічні технічні області застосування та відповідні обмеження. Вибір між ними обумовлюється інженерно-економічними міркуваннями, вимогами до стабільності режимів, гнучкості мережевої топології та ступенем готовності до інтеграції високотехнологічних компонентів.

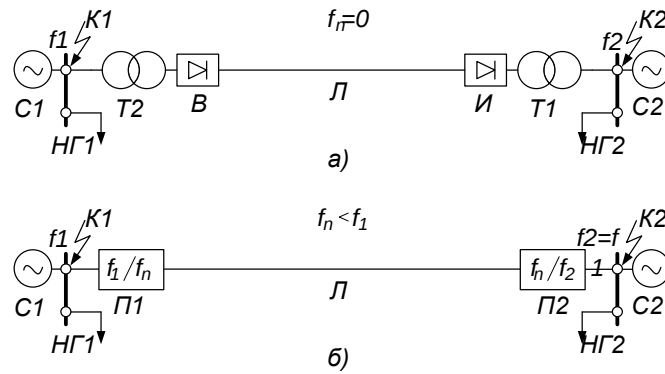


Рисунок 3.14 — Вставки мереж змінного струму енергосистем:

- **а** — вставка постійного струму;
- **б** — вставка змінного струму непромислової частоти.

3.10 Обмеження струмів короткого замикання на землю

У сучасних електроенергетичних системах, що експлуатуються на рівнях напруги від 110 до 1150 кВ, виникає нагальна потреба в ефективному обмеженні струмів однофазних коротких замикань на землю. Основною технічною стратегією у цьому контексті є підвищення еквівалентного опору нульової послідовності в точці виникнення короткого замикання. З огляду на характер циркуляції струмів нульової послідовності, доцільно збільшувати опір у специфічних витках, зокрема у заземлювальних ланцюгах нейтралей трансформаторів та автотрансформаторів, а також у третинних обмотках автотрансформаторів, що мають з'єднання за схемою "трикутник".

Зміна схеми заземлення нейтралі безпосередньо впливає на загальний режим заземлення мережі, що, у свою чергу, визначає поведінку ізоляції трансформаторного обладнання під час комутаційних та атмосферних перенапруг, а також в умовах короткого замикання на землю. Тому

правильний вибір режиму заземлення є критичним технічним фактором, який зумовлює низку обмежень щодо допустимих напруг на нейтралі.

Для трансформаторів вітчизняного виробництва напругою 110 кВ і вище, що були виготовлені до 1968 року, характерною є наявність послабленої ізоляції нейтралі класу 35 кВ з номінальною однохвилинною випробувальною напругою 85 кВ. Згідно з ДСТ 1516-68 та ДСТ 1516-73, для трансформаторів, виготовлених після 1968 року, ці значення дещо підвищені і становлять для трансформаторів з номінальною напругою 110, 150 і 220 кВ відповідно 100, 130 та 200 кВ. Ці напруги приймаються як гранично допустимі в умовах однофазного короткого замикання на землю.

Силові трансформатори класу напруги 330 кВ і вище не допускають експлуатації в режимі розземлення нейтралі. Відповідно, для їх нейтралей не нормуються ні однохвилинні, ні імпульсні випробувальні напруги. Це є важливим фактором у визначенні можливості застосування активних або реактивних опорів у колах заземлення нейтралі.

У відповідності до умов забезпечення електричної міцності ізоляції електроустановок мереж 110 кВ і вище, необхідно дотримуватись принципу ефективного заземлення. Це означає, що при короткому замиканні на землю в будь-якій точці мережі напруга на неушкоджених фазах не повинна перевищувати 80% від лінійної напруги мережі, тобто $1,4 U_{ф.ном.}$. Дане обмеження обумовлене необхідністю забезпечення коректної роботи розрядників з порогом спрацьовування на рівні 80% від номінальної напруги.

$$Z_0/Z_1 < 3-4$$

Крім того, для забезпечення коректної роботи вимикачів та узгодженості з режимами однофазних і двофазних коротких замикань, необхідно, щоб однофазні та двофазні струми замикання на землю не

перевищували величини трифазного струму короткого замикання в тій же точці мережі. Це досягається за умови:

$$X_0/X_1 > 1$$

Отже, при виборі режиму заземлення для мереж напругою 110 кВ і вище, який обумовлений режимом заземлення нейтралей силових трансформаторів, необхідно враховувати такі умови:

$$I_k^{(1)} / I_k^{(3)} \leq 1; I_k^{(1,1)} / I_k^{(3)} \leq 1$$

$$K_3 = U_{фз} / U_{ном} \leq 0,8$$

$$U_{нг} \leq U_{нг, доп}$$

де K_3 — коефіцієнт заземлення мережі; $U_{нг.яоп}$, $U_{нг.имп.доп}$ — допустимі напруги промислової частоти і імпульсні на нейтралі при к.з. в мережі.

Найбільш досяжним та практичним методом обмеження струмів однофазного короткого замикання на землю в мережах напругою 110–1150 кВ є оптимізація режиму заземлення нейтралей трансформаторів. Зокрема, часткове виведення заземлення нейтралей окремих трансформаторів із загальної схеми допускається за умови дотримання допустимих рівнів напруги на ізоляції цих нейтралей та недопущення утворення слабо або незаземлених ділянок мережі, де коротке замикання на землю неможливо буде локалізувати.

Альтернативний підхід передбачає встановлення додаткових реактивних або активних елементів — реакторів та резисторів — у коло заземлення нейтралі. Обидва ці засоби мають специфічні характеристики впливу:

- **Реактори:** при однаковому опорі дозволяють істотніше зменшити амплітуду струму короткого замикання порівняно з резисторами. Вони забезпечують менше підняття напруги на нейтралі під час аварійного режиму, однак мають істотний недолік: погіршення умов роботи

ізоляції нейтралі при дії атмосферних або комутаційних перенапруг. Це пояснюється резонансними явищами, які можуть виникати в індуктивному ланцюзі.

- **Резистори**, у свою чергу, мають нижчу ефективність обмеження струму, але забезпечують значно швидше згасання аперіодичної (вільної) складової струму короткого замикання. Це покращує умови для коректної роботи релейного захисту та дозволяє забезпечити більшу стабільність режиму нейтралі в перехідних процесах.

З урахуванням конструктивних особливостей та класів ізоляції нейтралей вітчизняних трансформаторів, доцільність вибору того чи іншого обмежуючого елемента варто визначати окремо. Зокрема:

- Для трансформаторів, вироблених до 1968 року (ізоляція нейтралі — класу 35 кВ), рекомендовано застосування **резисторів** у мережах з номінальною напругою 110–150 кВ.
- Для сучасних трансформаторів із покращеною ізоляцією нейтралі зона застосування **резистивного обмеження** значно ширша й може охоплювати мережі до 220 кВ включно.

Аналітична оцінка ефективності використання реакторів і резисторів для обмеження струмів короткого замикання на землю базується на аналізі приросту опору нульової послідовності:

$$\frac{I_{\text{кк}}^{(1)}}{I_{\text{к}}^{(1)}} = \frac{1}{1 + \Delta X_0 / \beta}$$

$$\frac{|I_{\text{кR}}^{(1)}|}{|I_{\text{к}}^{(1)}|} = \frac{1}{1 + \Delta R_0^2 / \beta^2}$$

де $v = 2x_1 + x_0 \Delta X$ — збільшення індуктивного опору нульової послідовності при установці реакторів; ΔR_0 — збільшення активного опору нульової послідовності при установці резисторів.

Вибір конкретної схеми обмеження має враховувати специфіку експлуатації трансформаторного обладнання, допустимі значення перенапруг, час відновлення ізоляції та наявність надійного захисту.

Наступна частина готова до опрацювання. Надішліть її, будь ласка.

Ось технічно переопрацьована версія науково-дослідницького тексту з повним збереженням обсягу і суті:

Варіанти реалізації заземлення нейтралі для обмеження струмів короткого замикання на землю

У системах електропостачання з рівнем напруги 110–220 кВ обмеження струмів однофазного короткого замикання на землю може бути реалізоване як шляхом постійного, так і тимчасового включення опорів у ланцюг заземлення нейтралі трансформаторів. У нормальному режимі нейтраль може бути або глухо заземленою, або залишатися в розімкнутому стані (розземленою), що визначається умовами надійності ізоляції та вимогами до захисту від перенапруг.

На **рисунку 3.15** представлені схеми реалізації заземлення нейтралі, які дозволяють ефективно керувати рівнем струмів замикання на землю.

- **Схема 3.15, а** — базова конфігурація, в якій нейтраль трансформатора може бути або глухо заземлена, або розземлена за допомогою пристрою короткозамикання або високовольтного заземлювача. При цьому захист ізоляції нейтралі від комутаційних і атмосферних

перенапруг реалізується через вентильні розрядники (типу РВМ-20, РВМ-35, РВС-60, РВС-110 залежно від класу напруги). Однак експлуатаційний досвід вказує на недостатню надійність такої схеми, оскільки ці типи розрядників не розраховані на значний супровідний струм КЗ.

- **Схема 3.15, б** — вдосконалений варіант, де розрядник працює разом із швидкодіючим короткозамикачем. При виникненні надструму короткого замикання розрядник ініціює спрацювання короткозамикача, який глухо заземлює нейтраль, забезпечуючи безпечний режим ізоляції.
- **Схема 3.15, м** — ізольована в нормальному режимі нейтраль, до якої при КЗ швидкодіючим апаратом вводиться реактор або резистор. Розрядник тут виконує функцію захисту ізоляції від перенапруг.
- **Схема 3.15, д** — інженерно складна конфігурація з контуром **C–D–R**, налаштованим у резонанс на робочій частоті мережі. При перевищенні напруги на нейтралі реактор з нелінійною характеристикою (реактор D) насичується, резонанс порушується, і в ланцюг вводиться індуктивний опір, що обмежує струм. Ємність у контурі виконує функцію захисту від імпульсних перенапруг, а розрядник є додатковим запобіжним елементом.
- **Схеми 3.15, е–з** — реалізують постійне підключення до нейтралі:
 - реактора, що насичується (нелінійна характеристика),
 - реактора з лінійною характеристикою,
 - або активного опору (резистора).

У першому випадку опір нейтралі змінюється залежно від напруги. Захист від перенапруг забезпечується розрядниками.

- **Схема 3.15, к** — нейтраль у нормальному режимі глухо заземлена. У разі виникнення КЗ швидкодіючим вимикачем у ланцюг заземлення

вводиться реактор або резистор, якщо величина струму перевищує задане розрахункове значення. Такий підхід дозволяє гнучко реагувати на аварійні ситуації без постійної присутності реактивного елементу в колі.

- **Схема 3.15, л** — представлена конфігурація з двома послідовно з'єднаними резонансними контурами. У нормальному режимі вони налаштовані на резонанс з частотою мережі. При виникненні КЗ на землю, насичення реактора порушує резонанс, в результаті чого в нейтраль вводиться відповідний індуктивний опір, що обмежує струм. Такий підхід дозволяє забезпечити високий ступінь адаптації до аварійних режимів.

Усі вищезазначені схеми мають як технічні, так і економічні переваги й недоліки, що слід враховувати при проектуванні системи заземлення високовольтичних трансформаторів. Основні критерії вибору схеми включають:

- напругу мережі;
- клас ізоляції нейтралі трансформатора;
- вимоги до допустимого струму КЗ;
- рівень допустимих перенапруг;
- необхідність збереження динамічної стійкості мережі.

Застосування відповідного методу має відповідати стандартам з електробезпеки та вимогам нормативної документації, зокрема [16].

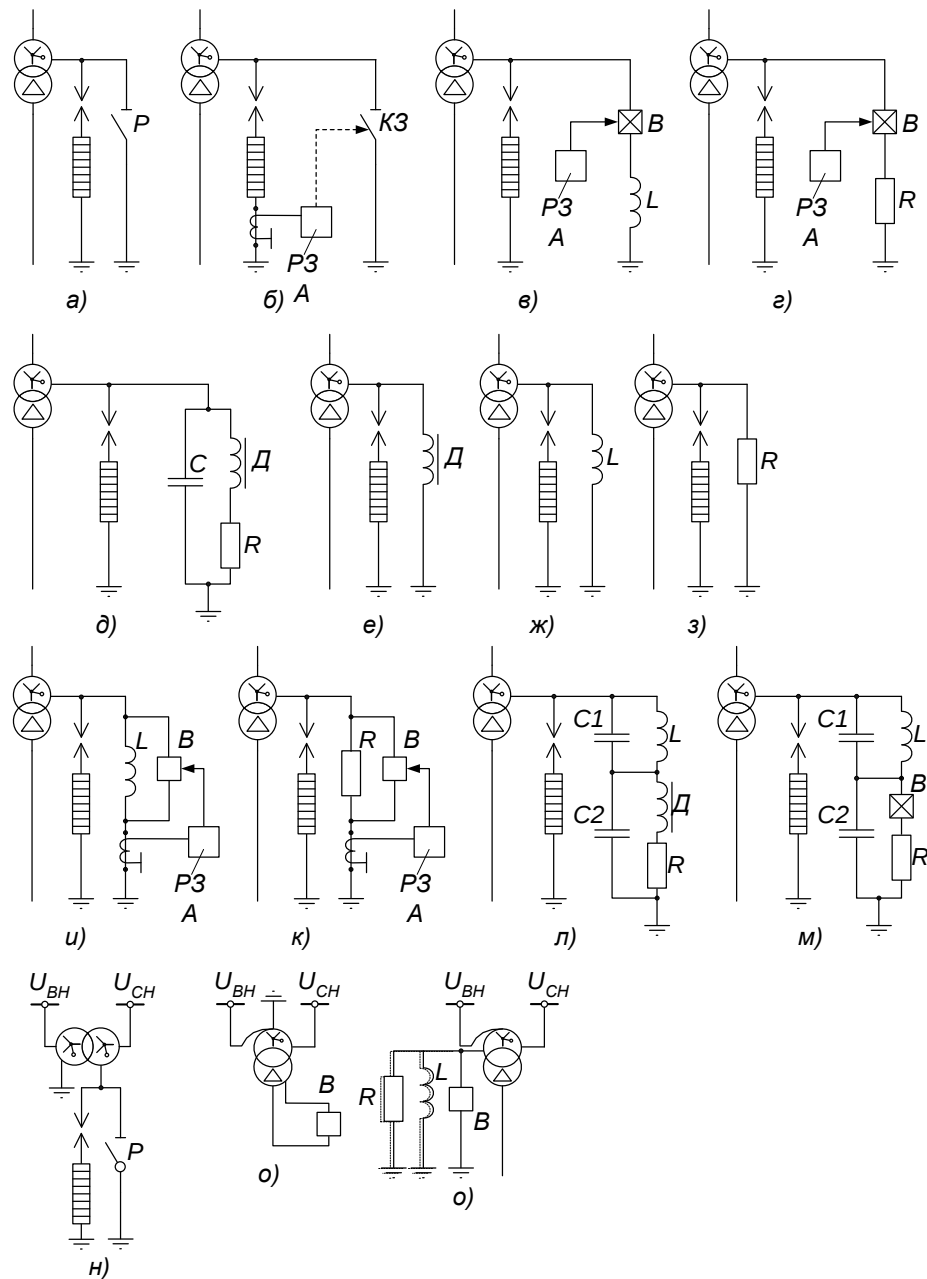


Рисунок 3.15 - Способи обмеження струму к.з. на землю.

Використання додаткових технічних рішень для обмеження струмів короткого замикання на землю

У схемах обмеження струмів короткого замикання на землю захисну функцію щодо імпульсних перенапруг виконують не лише традиційні вентильні розрядники, а й конденсатори імпульсного типу (C1 і C2), які

вбудовуються в схеми нейтралі. Їх доцільно використовувати через здатність ефективно гасити високочастотні компоненти перенапруг, що виникають під час комутацій або атмосферного впливу. Додатковим захисним елементом у таких схемах, відповідно до технічної логіки проектування, є розрядник, що спрацює у разі перевищення критичних значень напруги.

Схема, зображена на рисунку 3.15, є модифікацією попередніх рішень, однак має важливу конструктивну відмінність: розстройка резонансу здійснюється за допомогою швидкодіючого вимикача або аналогічного високошвидкісного комутаційного апарата. Це дозволяє значно знизити час реакції системи при виникненні перенапруг, мінімізуючи енергетичне навантаження на ізоляцію.

Альтернативні варіанти реалізації

1. Заміна автотрансформаторів зв'язку трансформаторами з розземленою нейтраллю на стороні середньої напруги (рисунк 3.15, н) є дієвим заходом обмеження струмів КЗ на землю. Такий підхід забезпечує розділення схеми нульової послідовності, що дозволяє локалізувати потоки аварійного струму та зменшити амплітуду імпульсу.
2. Безінерційне розмикання третинної обмотки, з'єднаної в трикутник (рисунк 3.15, о), також має потенціал до обмеження струмів. Проте його ефективність суттєво залежить від:
 - наявності постійного або змінного навантаження на третинній обмотці;
 - величини сумарного опору нульової послідовності приєднаних до автотрансформатора мереж.

Згідно з дослідженнями, проведеними у ЛПІ (Львівському політехнічному інституті), напруга на розімкненій третинній обмотці в умовах КЗ на землю не перевищує 1,5 номінального значення напруги

відповідної частини мережі, що підтверджує допустимість такого рішення в широкому діапазоні умов.

3. Відомі закордонні практики демонструють приклади експлуатації автотрансформаторів без третинної обмотки, що вказує на інше технічне мислення щодо управління нульовою послідовністю.

Критичний аналіз пропозицій

Були розглянуті численні пропозиції щодо тимчасового заземлення нейтралі автотрансформаторів у режимі КЗ або введення в ланцюг нейтралі реактивних чи активних елементів (рисунок 3.15, п). Проте, згідно з аналізом, ці методи у більшості випадків неприйнятні з таких причин:

- порушення допустимих умов роботи ізоляції самого автотрансформатора;
- негативний вплив на ізоляцію мереж середньої напруги;
- техніко-економічна неефективність реалізації комутаційних систем для короткочасного вводу опорів.

Внаслідок цього вітчизняна енергетика не використовує подібні рішення у своїй практиці, вважаючи їх небезпечними з точки зору надійності та довговічності обладнання.

Використання струмообмежувальних пристроїв у лінійних колах

Окрему категорію заходів становить включення струмообмежувальних пристроїв безпосередньо в ланцюг повітряних або кабельних ліній електропередачі, а не в ланцюг нейтралі. Таке конструктивне рішення дозволяє:

- забезпечити локальне обмеження струмів у конкретних гілках мережі;
- зменшити навантаження на трансформатори;

- уникнути необхідності зміни режиму заземлення нейтралі, що особливо важливо для об'єктів із жорстко регламентованими умовами експлуатації.

Такі пристрої можуть включати:

- резонансні фільтри,
- активні елементи на основі тиристорної комутації,
- реактори з регульованою характеристикою.

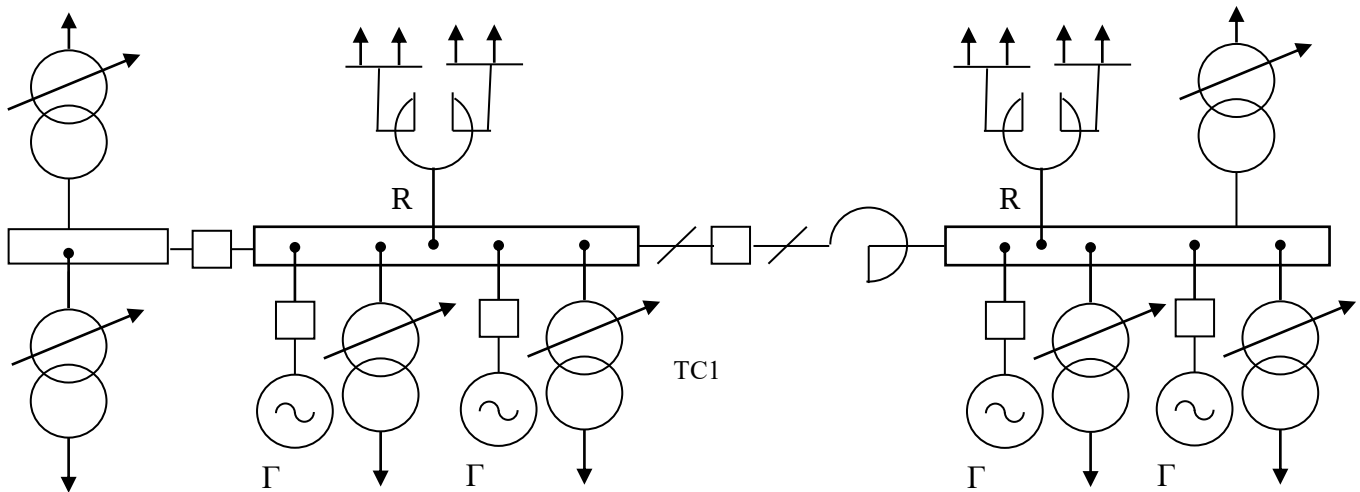
Застосування кожного з наведених рішень вимагає моделювання динамічних режимів енергосистеми та попереднього техніко-економічного обґрунтування з урахуванням типу навантаження, допустимих перенапруг, потужності джерел живлення та вимог до часу гасіння аварійного струму.

3.11 Вибір струмообмежуючого реактора

Наведемо приклад розрахунку необхідності встановлення реактора для обмеження струму кз.

Для заданої схеми вибрати реактор R якщо відомо, що

$I_{no}=47,34 \text{ кА}$; кількість ліній 8; $P_{р.отд.мах}=21,4 \text{ МВт}$; $i_y=44,34 \text{ кА}$



Реактори вибирають по номінальній напрузі, струму та індуктивному опору.

При виборі номінальної напруги реактора керуються відповідною номінальною напругою установки. При цьому передбачається, що реактори повинні довготривало витримувати максимальні робочі напруги, які можуть виникнути в процесі експлуатації. Допускається використання реакторів в електроустановках з напругою, меншою за номінальну напругу реакторів [8].

Номінальний струм реактора (гілки пареного реактора) не повинен бути меншим за максимальний тривалий струм навантаження ланцюга, до якого він підключений.

$$I_{ном} \geq I_{мах}$$

$$I_{мах} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{P_{\text{лінії}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\phi} = \frac{4}{4-1} \cdot \frac{2,675}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,8} = 0,245(\text{кА})$$

де $P_{\text{лінії}} = \frac{P_{\text{р.отд.мах}}}{n} = \frac{21,4}{8} = 2,675 \text{ (МВт)}.$

Сумарне значення $I_{no}=47,34 \text{ кА}$.

Порядок визначення опору реактора:

Вимагається обмежити струм короткого замикання (КЗ) таким чином, щоб у даному ланцюзі можна було встановити вимикач з номінальним струмом відключення $I_{ном.отк}$. Початкове значення періодичної складової струму КЗ, при якому забезпечується комутаційна спроможність вимикача, визначається значенням $I_{ном.отк}$. З метою спрощення, зазвичай, використовують:

$$I_{n0.треб} = I_{ном.отк}$$

До встановлення на лініях приймаємо вимикач ВМП-10К з $I_{отк.ном} = 20$ кА. Основний релейний захист максимальний струмовий з витягом часу, повний час відключення $t_{отк}=1.2\text{с}$. Намічаємо до встановлення спарений реактор серії РБСГ10-2х630-0,25УЗ $U_H=10\text{кВ}$, $I_{ном}=2\text{х}630\text{А} \geq I_{max}=245 \text{ (А)}$.

Результуючий опір ланцюга КЗ:

$$X_{рез} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot I_{no}}$$

$$X_{рез} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 47,34} = 0,128(\text{Ом})$$

Необхідний опір ланцюга КЗ для забезпечення $I_{n0.треб}$:

$$X_{рез.треб} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot I_{n0.треб}}$$

$$X_{рез.треб} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 20} = 0,3(\text{Ом})$$

Відмінність отриманих значень опорів дасть необхідний опір реактора:

$$X_{р.треб} = X_{рез.треб} - X_{рез}$$

$$X_{р.треб} = 0,3 - 0,128 = 0,172(\text{Ом})$$

Вибираємо реактор **РБСГ 10-2х630-0, 25УЗ** з параметрами:

$U_{ном}=10\text{кВ}$; $I_{ном}=630 \text{ А}$; $X_p=0.25 \text{ Ом}$; $i_{дин}=60 \text{ кА}$;

Значення фактичного струму при короткому замиканні за реактором визначається шляхом обчислення значення результуючого опору ланцюга короткого замикання з урахуванням реактора:

$$X'_{рез} = X_{рез} + X_p.$$

$$X'_{рез} = 0,128 + 0,25 = 0,378(\text{Ом})$$

Визначаємо початкове значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{н0} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot X'_{рез}}$$

$$I_{н0} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,378} = 16,03(\text{кА})$$

Перевірка по електродинамічній стійкості:

$$i_{дин} > i_y$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{но} \cdot K_y = \sqrt{2} \cdot 16,03 \cdot 1,956 = 44,34(\text{кА});$$

$$i_{дин} = 60 \text{ кА} > i_y = 44,34 \text{ кА}$$

Перевірка по термічній стійкості:

$$B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$$

$$I_{тер} = \frac{i_{дин}}{2,54}$$

$$B_k = I_T^2 \cdot t_T = 15,75^2 \cdot 8 = 1984,5 \geq B_{раз} = I_{но}^2 \cdot (t_{отк} + T_a) = 16,03^2 \cdot (1,2 + 0,23) = 367,45(\text{кА}^2 \cdot \text{с})$$

Перевірка по залишковому рівню напруги за реактором:

$$U_{ост}, \% = X_p \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{н0} \cdot 100}{U_{ном}} = 0,25 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 16,03 \cdot 100}{10,5} = 66,1\%$$

Вибраний реактор задовільняє всім висунутим вимогам [9].

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розділ з охорони праці бакалаврської роботи присвячений розробці заходів убезпечення працівників, які експлуатують систему релейного захисту, зокрема пристрої обмеження струмів коротких замикань. Згідно Гігієнічної класифікації, під час обслуговування діючих електроустановок (вимірювальних приладів, пристроїв релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку, пристроїв обліку електричної енергії та інших) на працівників впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]:

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної організації робіт

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час виконання робіт з вимірювальними приладами, пристроями релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку, з електролічильниками

Для убезпечення робіт, що їх провадять в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги слід постійно заземлювати. За

необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: зажими вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в пристроях РЗАіТ слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (наприклад, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела

знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗАіТ, провадять тільки оперативні працівники.

Записувати покази електролічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ, дозволяється:

- одноособово працівникам з групою II за наявності місцевих оперативних працівників (з чергуванням двох осіб) і з групою III — без місцевих оперативних працівників;
- працівникам інших організацій з групою III у супроводі місцевого оперативного працівника.

Встановлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий — групу III. За наявності в колах електролічильників контактів (блоків), що дозволяють працювати без розмикання кіл, підключених до вторинних обмоток трансформатора струму, ці роботи можна виконувати за розпорядженням, не знімаючи напруги зі схеми електролічильника. За відсутності вказаних контактів напругу і струм в колах електролічильника слід відключити.

Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття

електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги. Встановлення і зняття електролічильників безпосереднього ввімкнення допускається провадити за розпорядженням одному працівнику з групою III. Встановлення і зняття електролічильників, а також приєднання вимірювальних приладів виконуються зі зняттям напруги.

Роботи з електролічильниками на різних приєднаннях, розміщених в одному приміщенні, можна виконувати за одним нарядом (розпорядженням). Оформлення в наряді переходу з одного робочого місця на інше не вимагається.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огорожувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [3], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

Керівники підприємств, установ, організацій та інші посадові особи несуть персональну відповідальність за виконання вимог цих Правил у межах покладених на них завдань та функціональних обов'язків згідно з чинним законодавством. Працівників, які обслуговують електроустановки, необхідно забезпечити усіма необхідними засобами захисту, навчити правилам користування цими засобами і зобов'язати застосовувати їх для створення безпечних умов праці.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт) [6]. Параметри мікроклімату в

приміщенні наведено в таблиці 4.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці передбачається [7]:

- в холодну пору року – використання калорифера;
- в літню пору – застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву,
- провітрювання приміщень.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Теплий	ІІб	15-29	70 при 25°С	0,2-0,5
Холодний	ІІб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК [6] наведено в таблиці 4.2.

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено [7]: провітрювання приміщень; встановлення пиловловлюючих засобів.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглецю оксид (СО)	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

4.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення на робочому місці працівника. Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [8] розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Норми при штучному, природньому та суміщеному освітленні наведено в таблиці 4.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення виробничих приміщень

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Для забезпечення нормативних значень освітлення передбачено:

- використання додаткового штучного освітлення, а саме світлодіодних ламп;
- необхідна кількість природного світла (великі вікна);
- для підтримки постійної освітленості повинно бути організовано систематичне, не рідше двох разів на місяць, очищення арматури

світильників і ламп від пилу та бруду, а в приміщеннях із значним виділенням пилу, диму та кіптяви - не рідше чотирьох разів на місяць згідно з графіком.

4.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [9].

Норми звукового тиску на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі (ширми, екрани тощо); для

боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [11, 12]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14].

Приміщення підстанцій за вибухонебезпечною та пожежонебезпечною відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-Іа в приміщеннях, де є тверді горючі речовини чи матеріали (сир, масло, тара).

Будівля, в якій розташовані приміщення підстанції, характеризується ІІІ ступенем вогнестійкості.

До ІІІ ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.4.

Межі вогнестійкості самонесучих стін, які враховуються в розрахунках жорсткості та стійкості будинку, приймають, як для несучих стін. Будівельні конструкції класифікують за вогнестійкістю та здатністю поширювати вогонь. Показником вогнестійкості є межа вогнестійкості конструкції, що визначається часом (у хвиликах) від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів конструкції:

- втрати несучої спроможності (R);
- втрати цілісності (E);
- втрати тепло та ізолювальної спроможності (I).

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбура-шлюзу, не нижче
------------------------	--	---	-----------------------------------	--

Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.7 (знаменник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків, сільськогосподарських будівель і споруд потрібно приймати за таблицею 4.7 (знаменник) [15].

Таблиця 4.7 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
III	6/9	8/9	10/12

На території підстанції встановлено 25 вогнегасників ВВП-5 (ВП-5) та 12 ВВП-9 [16].

У випадку виникнення пожежі робітники повинні: прийняти всі заходи по ліквідації вогню; місце, яке загорілось слід гасити вогнегасниками; при загоранні електропроводів слід відключити лінію, а ізоляцію електропроводів необхідно гасити тільки порошковими вогнегасниками ВП-5 або піском; зупинити обладнання.

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено комплексний аналіз сучасних засобів та технічних рішень щодо обмеження струмів короткого замикання (КЗ) у системах електропостачання високої та надвисокої напруги. Основна увага приділялася практичним і теоретичним аспектам вибору методів обмеження струмів КЗ, особливо струмів замикання на землю, що мають значний вплив на електробезпеку, довговічність обладнання та стабільність функціонування енергосистеми.

Основні висновки дослідження полягають у наступному:

Обмеження струмів КЗ є критично важливим при проектуванні, модернізації та експлуатації енергосистем, зокрема на рівнях напруги від 110 до 1150 кВ. Це дозволяє запобігати руйнуванню комутаційної апаратури, аваріям та тривалим простоям в електропостачанні.

Аналіз конфігурацій заземлення нейтралей трансформаторів і автотрансформаторів показав, що саме ці ланцюги є ключовими з точки зору циркуляції струмів нульової послідовності. Впровадження реакторів та резисторів у ці ланцюги дозволяє суттєво знизити струми однофазного КЗ на землю. При цьому враховуються допустимі рівні напруг на ізоляції нейтралі, згідно з ДСТ 1516-68, ДСТ 1516-73 та експлуатаційними нормами.

Нормативні документи, такі як IEEE Std 242-2001 та IEC 60909-0, надають рекомендації та методи розрахунку струмів короткого замикання. Вони допомагають інженерам і проектувальникам враховувати різні фактори, такі як тип короткого замикання та характеристики системи, для забезпечення безпеки та надійності [16, 17].

Встановлено, що вибір між реактором і резистором має здійснюватися з урахуванням не лише ступеня струмообмеження, але й динаміки аперіодичної складової, рівня перенапруг і вартості рішень. Реактори ефективніше обмежують струми, але ускладнюють роботу ізоляції. Резистори менш ефективні, але швидше пригашують аперіодичну складову та менш небезпечні при перенапругах.

Оцінено ефективність динамічних схем обмеження струмів із використанням швидкодіючих вимикачів, нелінійних реакторів, резонансних контурів (C-D-R), пристроїв, що налаштовуються на мережеву частоту, та конденсаторів імпульсного типу. Всі ці рішення мають переваги в оперативності реагування на аварії, але вимагають точного інженерного проєктування та селекції параметрів.

Особливу увагу приділено схемам автоматичного розімкнення третинної обмотки автотрансформаторів при виникненні КЗ на землю, що дозволяє зменшити струм та напругу нульової послідовності. Зазначено, що за кордоном активно використовуються автотрансформатори без третинної обмотки, що свідчить про зміну парадигми в сучасному енергетичному проєктуванні.

Виявлено, що оптимальні стратегії заземлення нейтралей трансформаторів повинні базуватися на глибокому розрахунку: співвідношення опорів нульової і прямої послідовностей, динамічної поведінки струмів однофазного та трифазного КЗ, допустимих напруг ізоляції і вимог до надійності.

Практика показує, що обмеження струмів КЗ не повинно впливати негативно на надійність роботи ізоляції електроустановок. Тому будь-які опори, що вмикаються в нейтраль, мають бути належним чином ізольовані та захищені від перенапруг.

Перспективним напрямом є використання струмообмежувальних пристроїв у лінійних колах (а не тільки в нейтралях), що дозволяє зберегти глухе заземлення та водночас забезпечити обмеження струму в аварійному напрямку. Особливо актуальним це є для ліній, що живлять споживачів "нульової категорії".

Інновації в області надпровідних струмообмежувачів, комбінованих з іншими елементами систем (генератори, трансформатори, ЛЕП), відкривають нові можливості для інерційного та безпечного реагування на КЗ. Їх впровадження доцільне в умовах централізованого кріогенного охолодження.

Таким чином, ефективне обмеження струмів короткого замикання є не лише питанням безпеки, але й стратегічним напрямом розвитку електроенергетики. Його реалізація потребує системного підходу: поєднання класичних і новітніх методів, моделювання динамічних режимів, дотримання міжнародних стандартів та глибоких інженерних знань. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію схем заземлення, впровадження інтелектуальних систем комутації та адаптацію до умов переходу на гнучкі енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. “Програма забезпечення надійності роботи електричних мереж у 2018 році” затверджена наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 22.05.2018 N345;
2. . Енергетична стратегія України на період 2030 р. від 17 серпня 2017 р. № 145-р Київ : Розпорядження // Кабінет міністрів України. – 2017. – С. 75
3. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=227966
4. Кулик В. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110-330 кВ: навчальний посібник / В. В. Кулик, В. В. Тептя, О. Б. Бурикін, О. В. Сікорська. Вінниця: ВНТУ, 2018. 110 с.
5. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 194 с.
6. Проектування електричної частини електричних станцій та підстанцій: Ч. 1 [Електронний ресурс] : навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад. Є. І. Бардик, П. Л. Денисюк, Ю. В. Безбереж'єв. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,75 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2011.
7. Проектування електричної частини електричних станцій та підстанцій. Ч. 2 [Електронний ресурс] : навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад. Є. І. Бардик, П. Л. Денисюк, Ю. В. Безбереж'єв. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,13 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2012.
8. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: О.В. Остапчук, П.Л. Денисюк, Ю.П. Матеєнко/КПІ ім. Ігоря Сікорського, –

Електронні текстові дані (1 файл: 4,62 Мбайт). Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2022. 183 с.

9. Електрична частина станцій та підстанцій аеропортів : підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова. К. : НАУ, 2018. 312 с.

10. 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.

11. Бардик Є.І., Лукаш Н.П. Електрична частина електростанцій і підстанцій: навчальний посібник. К. НТУУ «КПІ» 2011р. 220с.

12. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. Для ВНЗ / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папайка, Л. І. Несен, за ред.. Г. Г. Півняка. МОН України, Нац. гірн. гн-т. 5-те вид. Дніпро: НГУ, 2016. 600 с.

13. Лесько В. О., Кравчук С.В., Сікорська О.В. Електричні апарати: Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 145 с.

14. Карпов Ю.О., Кухарчук В.В., Ведміцький Ю.Г., Кацев С.Ш. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола Підручник: – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. 456 с.

15. Правила улаштування електроустановок. Глава 1.7 «Заземлення і захисні заходи електробезпеки»: ПУЕ:2006.

16. IEEE Std 242-2001 - IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems.

17. IEC 60909-0 - Short-Circuit Currents in Three-Phase AC Systems - Part 0: Calculation of Currents.

18. "Оптимізація параметрів системи обмеження струмів короткого замикання" - О.В. Пономарьов, В.В. Храпачевський. (2018).

19. "Аналіз впливу фізичних параметрів на ефективність обмеження струмів короткого замикання" - І.М. Дяченко, О.В. Лисенко. (2017).
20. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
21. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
22. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.
23. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
24. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
25. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
26. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
27. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
28. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

29. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
30. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
31. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
32. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
33. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
34. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
35. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Аналіз сучасних засобів та заходів з обмеження струмів коротких замикань

Бакалаврська кваліфікаційна робота студента групи ЕС-216
Косого Олександра Романовича

Виконана на кафедрі електричних станцій та систем
Факультету електроенергетики та електромеханіки
Вінницького національного технічного університету.

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма: Електричні станції



Наслідки струмів коротких замикань



Передчасний вихід з ладу електрообладнання

Надмірні струми призводять до механічних пошкоджень та незворотних змін у структурі матеріалів електрообладнання, що значно скорочує термін його експлуатації та підвищує експлуатаційні витрати.



Прискорення процесів старіння ізоляції

Термічний вплив високих струмів призводить до деградації ізоляційних матеріалів, що збільшує ризик виникнення нових аварійних ситуацій у майбутньому.



Руйнування струмоведучих частин

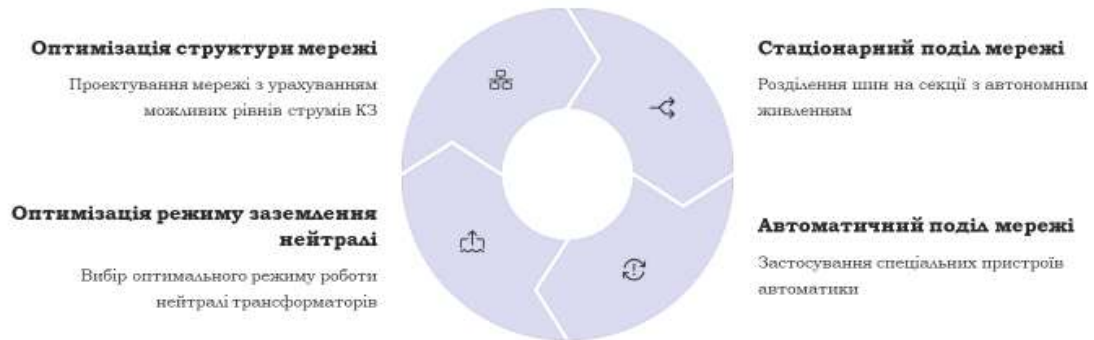
Електродинамічні сили, що виникають при коротких замиканнях, можуть призвести до фізичного руйнування шин, ізоляторів та інших елементів електроустановок.



Збільшення вартості ремонту

Ліквідація наслідків коротких замикань вимагає значних матеріальних та трудових ресурсів, що негативно впливає на економічні показники роботи енергетичних об'єктів.

Заходи обмеження струмів коротких замикань



Обмеження струмів коротких замикань можна досягти шляхом реалізації різних схемно-режимних заходів. Оптимізація структури мережі дозволяє проектувати електричні системи з допустимими рівнями струмів КЗ, враховуючи параметри обладнання та конфігурацію мережі.

Застосування поділу мережі (стационарного або автоматичного) та правильний вибір режиму заземлення нейтралі сприяють значному зниженню рівнів струмів коротких замикань без суттєвих капіталовкладень.

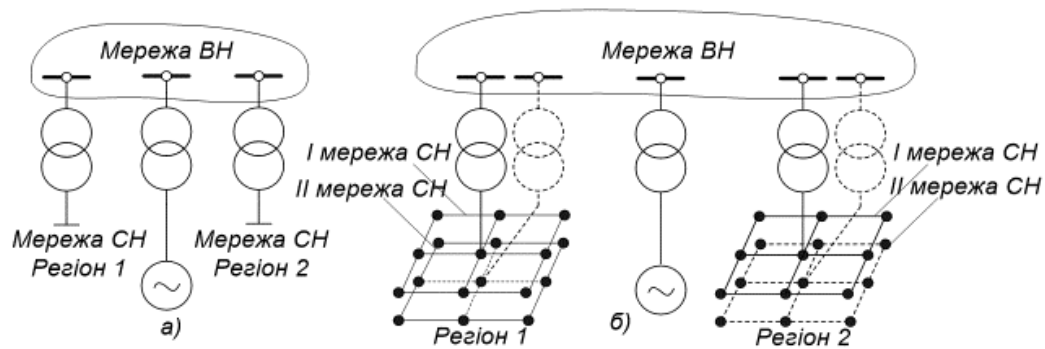
Виклики зростання рівнів струмів коротких замикань



Постійне зростання потужності електростанцій та ускладнення структури електромереж призводить до підвищення рівнів струмів коротких замикань. Це вимагає нових технічних рішень, які забезпечать надійну роботу комутаційної апаратури та захист електрообладнання від руйнівної дії цих струмів.

Важливим аспектом є також економічна складова, оскільки вартість обладнання з вищими показниками стійкості до струмів короткого замикання значно перевищує вартість стандартного обладнання.

Варіанти схемних рішень



Варіанти схемних рішень

а — повздовжній поділ мережі; б — поперечний поділ мережі.

Варіанти схемних рішень для поділу мережі

Повздовжній поділ мережі

Поділ збірних шин електроустановки на окремі секції з використанням секційних вимикачів. Кожна секція може отримувати живлення від окремого джерела, що суттєво знижує рівні струмів короткого замикання.

Повздовжній поділ широко застосовується на підстанціях різних класів напруги та дозволяє зменшити струми КЗ на 40-60% залежно від схеми живлення.

Вибір конкретної схеми поділу мережі залежить від особливостей електроустановки, режимів її роботи та вимог до надійності електропостачання. Важливо знайти оптимальний баланс між зниженням рівнів струмів КЗ та збереженням гнучкості в керуванні режимами роботи мережі.

Поперечний поділ мережі

Створення незалежних електрично не пов'язаних між собою частин електроустановки. Даний метод забезпечує максимальне обмеження струмів КЗ, але вимагає дублювання обладнання.

Поперечний поділ ефективний для особливо відповідальних об'єктів, де необхідне суттєве зниження рівнів струмів короткого замикання при збереженні високої надійності електропостачання.

Розподіл мережі на електростанціях



Електростанція з одним РУ підвищеної напруги

Для електростанцій з одним розподільчим пристроєм підвищеної напруги застосовується схема з поділом збірних шин на секції та подвійною системою збірних шин з обхідною.

- Забезпечує високу надійність видачі потужності
- Дозволяє проводити планові ремонти без зниження виробництва



Електростанція з двома РУ підвищеної напруги

Для електростанцій з двома розподільчими пристроями підвищеної напруги використовуються більш складні схеми з поділом генераторів між різними РУ.

- Підвищує маневреність станції
- Знижує рівні струмів КЗ на кожному з РУ

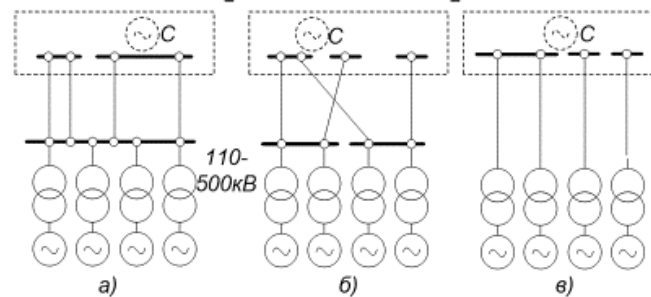


Ефективність обмеження струмів КЗ

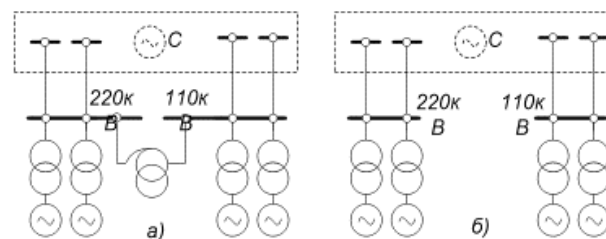
Правильно обрана схема розподілу мережі на електростанції дозволяє знизити рівні струмів КЗ на 30-50% без використання додаткових струмообмежуючих пристроїв.

Розподіл мережі на електростанціях є ефективним заходом для обмеження струмів короткого замикання, особливо для потужних електростанцій, де рівні струмів КЗ можуть досягати критичних значень.

Розподіл мережі на електростанціях



Розподіл мережі на електростанції з одним РУ підвищеної напруги



Розподіл мережі на електростанції з двома РУ підвищеної напруги

Засоби обмеження струмів коротких замикань

Струмообмежуючі реактори

Електротехнічні пристрої, що включаються в розрив електричного кола для обмеження струмів КЗ за рахунок внесення додаткового індуктивного опору. Ефективні для мереж середньої та високої напруги.

Трансформатори з розщепленою обмоткою

Спеціальні трансформатори, в яких обмотка нижчої напруги розділена на дві або більше частин, що працюють паралельно. Забезпечують зниження струмів КЗ без додаткових пристроїв.

Струмообмежуючі комутаційні пристрої

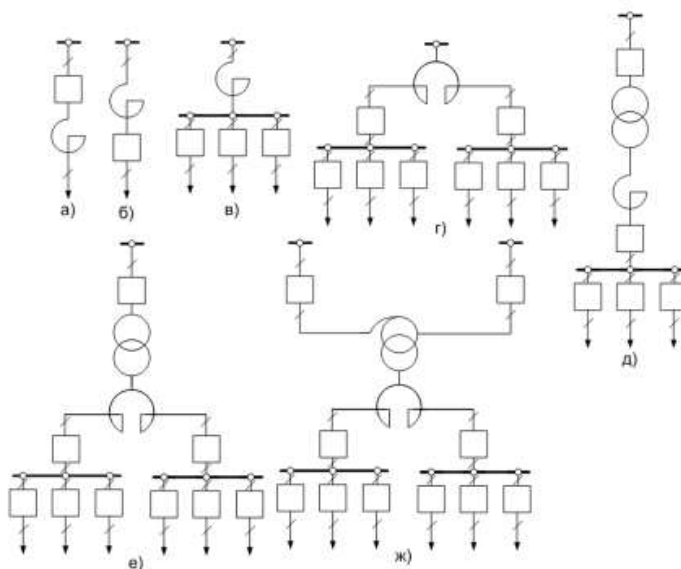
Пристрої, що обмежують струм КЗ за час менший, ніж перший півперіод синусоїди струму. Застосовуються в мережах низької та середньої напруги.

Вставки постійного струму та трансформатори з підвищеною напругою КЗ

Спеціальні пристрої та обладнання, що забезпечують обмеження струмів КЗ за рахунок власних конструктивних особливостей.

Вибір конкретних засобів обмеження струмів КЗ залежить від багатьох факторів: напруги мережі, очікуваних рівнів струмів КЗ, наявного обладнання, економічної доцільності та технічних вимог.

Можливі схеми включення реакторів



Лінійні реактори

Включаються послідовно в лінію, яку необхідно захистити від надмірних струмів КЗ. Забезпечують локальне обмеження струмів КЗ конкретної лінії.



Секційні реактори

Встановлюються між секціями збірних шин. Дозволяють обмежити струм КЗ при збереженні зв'язку між секціями в нормальному режимі.



Групові реактори

Застосовуються для захисту групи ліній, що відходять від одних шин. Дозволяють оптимізувати кількість використовуваних реакторів.



Здвоєні реактори

Мають дві обмотки на одному магнітопроводі. Використовуються для обмеження струмів КЗ у схемах з двома паралельними лініями.

Правильно обрана схема включення реакторів забезпечує ефективне обмеження струмів короткого замикання при мінімальному впливі на нормальні режими роботи електричної мережі. Важливо враховувати особливості конкретної мережі та режимів її роботи.

Характеристики струмообмежуючої дії реактора

Струмообмежуюча дія реактора характеризується його опором (O_m), який прямо пропорційний відносній реактивності і зворотно пропорційний номінальному струму реактора. Це фундаментальне співвідношення визначає ефективність реактора в обмеженні струмів короткого замикання.

Лінійний реактор, що включається послідовно в відповідну лінію (приєднання), обмежує струм КЗ і підтримує відносно високий рівень залишкової напруги в вузлах мережі. Однак в нормальному режимі в ньому мають місце втрати активної і реактивної потужності, втрати енергії, а також падіння і втрата напруги, що необхідно враховувати при проектуванні.

Важливими параметрами реактора є індуктивний опір (X_p), номінальний струм ($I_{ном}$) та номінальна напруга ($U_{ном}$). Індуктивний опір визначає ступінь обмеження струму КЗ: чим більше значення X_p , тим ефективніше обмежується струм КЗ, але при цьому збільшуються втрати напруги в нормальному режимі.

Коефіцієнт струмообмеження реактора (k) можна розрахувати як відношення струму КЗ без реактора до струму КЗ з реактором. Типові значення k знаходяться в діапазоні від 1,5 до 3, залежно від конкретних умов застосування та вимог до обмеження струмів КЗ.

При виборі реактора необхідно враховувати також його термічну та динамічну стійкість. Реактор повинен витримувати тепловий імпульс струму КЗ без пошкоджень, а його конструкція має забезпечувати механічну міцність при дії електродинамічних сил, що виникають під час КЗ.

Сучасні реактори виготовляються з різних матеріалів та в різних конструктивних виконаннях: сухі бетонні, сухі з ізоляцією з епоксидного компаунду, масляні. Кожен тип має свої переваги та обмеження, які слід враховувати при проектуванні систем обмеження струмів КЗ.

Трансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги



Призначення розщеплення обмоток

Розщеплення обмоток нижчої напруги трансформаторів дозволяє обмежити струми КЗ без застосування додаткових пристроїв, зберігаючи при цьому високу надійність електропостачання.



Сфери застосування

Трансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги використовуються для формування укрупнених блоків електростанцій, особливо на ГЕС, а також на підстанціях енергосистем і в системі власних потреб потужних теплових і атомних електростанцій.



Опір між виводами

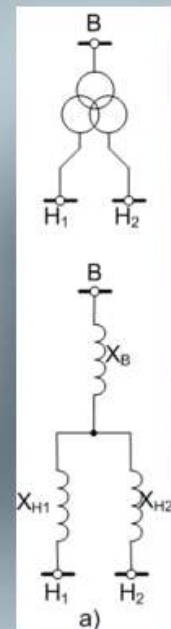
Хропц — опір між виводами двох довільних частин розщепленої обмотки, визначає ефективність обмеження струмів КЗ. Чим більший цей опір, тим ефективніше обмеження струмів КЗ.



Ефективність

При правильному застосуванні трансформаторів з розщепленою обмоткою можна досягти зниження рівнів струмів КЗ на 30–40% без збільшення втрат в нормальному режимі.

Технологія розщеплення обмоток є економічно ефективним рішенням для обмеження струмів короткого замикання, оскільки не вимагає встановлення додаткового обладнання та забезпечує необхідне обмеження безпосередньо в трансформаторі.





Практичне застосування реактора для обмеження струму короткого замикання

47,34 кА

Початковий струм КЗ

Розрахункове значення струму КЗ без застосування засобів обмеження

8

Кількість ліній

Число ліній, підключених до секції шин

21,4 МВт

Потужність

Номинальна потужність електроустановки

60 кА

Динамічна стійкість

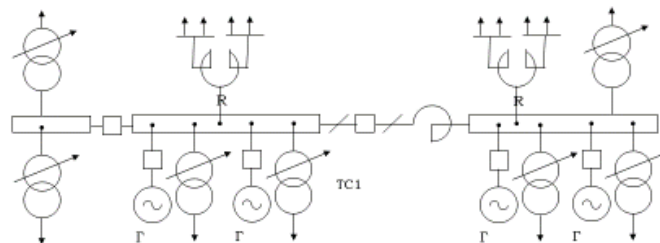
Показник стійкості обраного реактора

Для обмеження струму короткого замикання обрано реактор серії РБСГ10-2х630-0,25У3 з такими параметрами: номінальна напруга 10 кВ, номінальний струм 2х630 А, індуктивний опір 0,25 Ом, динамічна стійкість 60 кА.

Даний реактор повністю задовольняє всі висунуті вимоги щодо обмеження струму короткого замикання в конкретній електроустановці. Застосування цього реактора дозволить забезпечити надійну роботу комутаційного обладнання та запобігти пошкодженню елементів електроустановки при виникненні коротких замикань.

Обмеження струму короткого замикання за допомогою реактора

- $I_{по} = 47,34$ кА; кількість ліній 8; $P = 21,4$ МВт ; $i_y = 44,34$ кА



Реактор серії РБСГ10-2х630-0,25У3 $U_{нн} = 10$ кВ, $I_{ном} = 2 \times 630$ А $X_p = 0,25$ Ом; $i_{дин} = 60$ кА

$$X_{рез} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 47,34} = 0,128(Ом) \quad X'_{рез} = 0,128 + 0,25 = 0,378(Ом)$$

$$I_{п0} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,378} = 16,03(кА) \quad i_y = \sqrt{2} \cdot I_{по} \cdot K_y = \sqrt{2} \cdot 16,03 \cdot 1,956 = 44,34(кА)$$

Обраний реактор задовільняє всім висунутим вимогам