

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги
в мережі 6 – 35 кВ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕБ-24 мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Андрій ФРАНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Андрій МЕЗЕРЯ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ ____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Андрію ФРАНКУ

1. Тема «Ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги в мережі 6 – 35 кВ»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3664 від « 06 » 10 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: клас напруги мережі, тип нейтралі (ізольована, компенсована, заземлена через резистор або дугогасильний реактор), довжини та типи кабельних або повітряних ліній, ємнісні струми мережі відносно землі, потужність трансформаторів, конфігурацію схеми, кількість і розміщення трансформаторів напруги; параметри ВТН.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1.ПРИЧИНИ УШКОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ. РОЗДІЛ 2.ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ. РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АНТИРЕЗОНАНСНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ. ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ. СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 07 » _____ 10 _____ 2025 р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

_____ Андрій ФРАНКО

(підпис)

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	07.10.25 – 10.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	11.10.25 – 18.10.25	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	19.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 – 10.12.25	

Студент (ка)

(підпис)

Андрій ФРАНКО

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги в мережі 6-35 кВ», виконаної магістрантом Андрієм

ФРАНКОМ

Магістерська робота виконана на 79 сторінок, містить 2 таблиць, 30 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел 14.

Підвищення ефективності застосування антирезонансних трансформаторів є важливим технічним напрямом, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності систем електропостачання, зменшенню втрат електроенергії, підвищенню рівня електробезпеки та продовженню терміну служби обладнання. Традиційні трансформатори напруги не завжди здатні забезпечити стабільність роботи в умовах резонансних явищ, оскільки їх конструкція не передбачає заходів для обмеження амплітуди коливань напруги. У зв'язку з цим усе більшого значення набуває застосування антирезонансних трансформаторів напруги, які мають покращені конструктивні та електромагнітні характеристики, що дозволяють запобігати розвитку ферорезонансних коливань та знижувати рівень перенапруги у системі.

Мета магістерської: аналіз ефективності застосування антирезонансних трансформаторів напруги в електричних мережах 6–35 кВ з метою підвищення їх надійності, зменшення впливу ферорезонансних процесів і покращення енергетичних та експлуатаційних характеристик мережі.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення та вимірювання напруги в електричних мережах 6–35 кВ, що визначають надійність і стабільність роботи систем електропостачання.

Предмет дослідження: ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги та їх вплив на стійкість режимів роботи електричних мереж, рівень перенапруги і точність вимірювань у колах вторинної напруги.

Ключові слова: антирезонанс, трансформатор напруги, електрична мережа, надійність, коливання напруги, експлуатаційна характеристика.

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Effectiveness of the use of anti-resonant voltage transformers in the 6-35 kV network" by master's student Andriy FRANKO

The master's work is executed on 79 pages, contains 2 tables, 30 drawings, which characterize the results of research, used literary sources 14.

Increasing the efficiency of the use of anti-resonance transformers is an important technical direction that contributes to increasing the operational reliability of power supply systems, reducing electricity losses, increasing the level of electrical safety and extending the service life of equipment. Traditional voltage transformers are not always able to ensure stable operation under conditions of resonance phenomena, since their design does not provide measures to limit the amplitude of voltage fluctuations. In this regard, the use of anti-resonance voltage transformers, which have improved design and electromagnetic characteristics, which allow preventing the development of ferroresonance oscillations and reducing the level of overvoltage in the system, is becoming increasingly important.

The purpose of the master's thesis: analysis of the effectiveness of the use of anti-resonant voltage transformers in 6–35 kV electrical networks in order to increase their reliability, reduce the impact of ferroresonant processes and improve the energy and operational characteristics of the network.

Object of research: processes of voltage conversion and measurement in electrical networks of 6–35 kV, which determine the reliability and stability of the operation of power supply systems.

Subject of research: effectiveness of the use of anti-resonant voltage transformers and their impact on the stability of operating modes of electrical networks, the level of overvoltage and the accuracy of measurements in secondary voltage circuits.

Keywords: antiresonance, voltage transformer, electrical network, reliability, voltage fluctuations, operational characteristics.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ПРИЧИНИ УШКОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

1.1. Аналіз причин ушкодження вимірювальних трансформаторів напруги контролю ізоляції

1.2. Вплив характеру горіння дуги на пошкодження трансформаторів напруги контролю ізоляції

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Резонансні явища у ланцюгах з вимірювальними трансформаторами

2.2. Виникнення ферорезонансу в мережі 24 кВ генераторної напруги енергоблоків

2.3. Можливість використання трифазного стрічкового магнітопроводу для антирезонансного трансформатора напруги

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АНТИРЕЗОНАНСНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

3.1. Розробка антирезонансного індуктивного трансформатора напруги

3.2. Ефективність використання антирезонансних трансформаторів напруги в мережі 6 – 35 кВ

3.3. Дослідження резонансних перенапруг у вимірювальному трансформаторі та в електроустановках

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕС – електроенергетична система
АТН – антирезонансний трансформатор напруги
ТНКІ – трансформатор напруги контролю ізоляції
ТН - трансформатор напруги
ОЗЗ - однофазне замикання на землю
ОДЗ - однофазне дугове замикання
ПП - перехідний процес
ТНП - трансформатор нульової послідовності
РЗ - релейний захист
СВП - секція власних потреб
ТЕЦ - теплоелектроцентрально
СЕП - система електропостачання
ФП - ферорезонансний процес
РГ - розподілена генерація
ПЛ - повітряна лінія
КЛ - кабельна лінія
ВЛ - високовольтна лінія
ШР - шунтуючий реактор
ОАПВ – однофазне автоматичне повторне включення
ТП - трансформаторна підстанція

ВСТУП

Актуальність теми роботи.

Сучасний розвиток електроенергетики супроводжується активним упровадженням автоматизованих систем керування, цифрових вимірювальних комплексів та інтелектуальних пристроїв релейного захисту. Це зумовлює підвищення вимог до стабільності параметрів напруги, точності вимірювань і загальної надійності електричних мереж, а саме, напругою 6–35 кВ. Водночас збільшення частки кабельних ліній, застосування вакуумних вимикачів та інших нелінійних елементів значно підвищує імовірність виникнення ферорезонансних явищ, які мають складний характер і можуть спричиняти серйозні технічні наслідки.

Ферорезонанс у мережах середньої напруги часто проявляється у вигляді стрибкоподібної перенапруги, коливань струму та напруги, а також неадекватної поведінки вимірювальних трансформаторів. У результаті спостерігаються відмови або помилкові спрацьовування пристроїв автоматики, що негативно впливає на роботу підстанцій, систем обліку й керування. Крім того, тривале існування резонансних процесів призводить до термічного перевантаження обмоток і магнітопроводів, погіршення ізоляційних характеристик та передчасного виходу з ладу обладнання.

Підвищення ефективності застосування антирезонансних трансформаторів є важливим технічним напрямом, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності систем електропостачання, зменшенню втрат електроенергії, підвищенню рівня електробезпеки та продовженню терміну служби обладнання. Традиційні трансформатори напруги не завжди здатні забезпечити стабільність роботи в умовах резонансних явищ, оскільки їх конструкція не передбачає заходів для обмеження амплітуди коливань напруги. У зв'язку з цим усе більшого значення набуває застосування антирезонансних трансформаторів напруги (АТН), які мають покращені конструктивні та електромагнітні характеристики, що дозволяють запобігати розвитку ферорезонансних коливань та знижувати рівень

перенапруги у системі.

Актуальність теми також посилюється переходом енергетики до цифрових технологій і концепції Smart Grid, у рамках яких вимірювальні трансформатори виконують не лише функцію живлення вимірювальних і захисних кіл, але й є важливим елементом інформаційної інфраструктури підстанції.

Таким чином, дослідження ефективності застосування антирезонансних трансформаторів напруги в мережах 6–35 кВ має значне наукове й практичне значення, адже спрямоване на підвищення експлуатаційної надійності, стабільності параметрів напруги та загальної енергоефективності розподільчих електричних мереж.

Мета магістерської роботи: аналіз ефективності застосування антирезонансних трансформаторів напруги в електричних мережах 6–35 кВ з метою підвищення їх надійності, зменшення впливу ферорезонансних процесів і покращення енергетичних та експлуатаційних характеристик мережі.

Об’єкт дослідження: процеси перетворення та вимірювання напруги в електричних мережах 6–35 кВ, що визначають надійність і стабільність роботи систем електропостачання.

Предмет дослідження: ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги та їх вплив на стійкість режимів роботи електричних мереж, рівень перенапруги і точність вимірювань у колах вторинної напруги.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі основні завдання:

- провести аналіз фізичних причин виникнення ферорезонансних процесів у мережах середньої напруги та їх впливу на роботу трансформаторів напруги;
- розглянути принципи побудови, конструктивні особливості та характеристики антирезонансних трансформаторів напруги;

- адаптувати математичну модель для аналізу ефективності роботи антирезонансних трансформаторів у різних режимах мережі.
- оцінити вплив застосування антирезонансних трансформаторів на показники надійності та енергоефективності електричних мереж.
- надати рекомендації щодо вибору та практичного впровадження антирезонансних трансформаторів напруги у системах розподільчих мереж 6–35 кВ.

Теоретичні результати дослідження: отримання узагальненої моделі ферорезонансних процесів у колах з антирезонансними трансформаторами напруги, яка дозволить оцінити вплив параметрів обмоток, магнітопроводу та зовнішніх ємностей на стійкість режимів мережі. Передбачається визначення умов, за яких виникнення ферорезонансних коливань є найімовірнішим, та встановлення ролі конструктивних особливостей антирезонансних трансформаторів у запобіганні цим явищам. На основі проведеного аналізу розроблені критерії оцінювання ефективності таких трансформаторів за показниками стабільності вторинної напруги, рівня перенапруги і точності вимірювань

Практичні результати дослідження: застосування отриманих результатів для вибору та впровадження оптимальних типів антирезонансних трансформаторів у мережах середньої напруги. Розроблені рекомендації можуть бути використані при модернізації електроустановок, під час проектування систем релейного захисту та автоматики, а також для зниження ймовірності аварійних ситуацій, пов'язаних із ферорезонансними процесами. Крім того, результати дослідження сприятимуть підвищенню експлуатаційної надійності електричних мереж, зменшенню втрат електроенергії та підвищенню ефективності роботи вимірювальних і захисних систем.

У цілому теоретичні та практичні результати дослідження мають сприяти удосконаленню технічної бази енергетичних підприємств, оптимізації параметрів трансформаторів напруги та підвищенню рівня

електромагнітної сумісності елементів розподільчих мереж.

Методи дослідження: у процесі виконання роботи передбачається використання комплексу теоретичних, аналітичних та експериментальних методів. Теоретичне дослідження базується на використанні законів електромагнітного поля, теорії лінійних і нелінійних електричних кіл, а також принципів моделювання ферорезонансних процесів. Для опису поведінки антирезонансних трансформаторів напруги застосовуються методи математичного аналізу та чисельного розв'язання диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси у колах з індуктивно-ємнісними зв'язками.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів можуть бути залучені експериментальні дані або результати випробувань, опубліковані у технічній літературі. Також застосовуються методи порівняльного аналізу, енергетичного балансу та статистичної обробки даних для визначення тенденцій зміни параметрів і оцінки впливу конструктивних особливостей трансформаторів на їх роботу в умовах ферорезонансу.

РОЗДІЛ 1. ПРИЧИНИ УШКОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

1.1. Аналіз причин ушкодження вимірювальних трансформаторів напруги контролю ізоляції

У мережах напругою 6–35 кВ спостерігається підвищений рівень аварійності трансформаторів напруги, призначених для контролю ізоляції (ТНКИ). За окремими даними, щорічна частка пошкоджених трансформаторів напруги становить близько 7–10% від їх загальної кількості, а середній строк експлуатації не перевищує 3–5 [1] років. Незважаючи на порівняно невисоку вартість та компактність конструкції, трансформатори напруги виконують надзвичайно важливі функції в електричних мережах. Вони забезпечують контроль стану ізоляції, знижують високу напругу до рівня, необхідного для живлення кіл автоматики, релейного захисту та приладів обліку електроенергії.

В умовах сучасної ринкової економіки функція точного обліку електроенергії, яку виконують трансформатори напруги, набуває особливого значення, оскільки від неї безпосередньо залежать економічні показники роботи енергопостачальних компаній і споживачів. Окремі випадки аварій показують, що пошкодження трансформаторів напруги може супроводжуватися займанням та виникненням пожеж у комірках розподільчих пристроїв, що становить загрозу для персоналу й обладнання.

Таким чином, виявлення та аналіз причин пошкоджень трансформаторів напруги контролю ізоляції є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення надійності та безпеки експлуатації електричних мереж середньої напруги.

Попри достатню вивченість проблеми пошкодження трансформаторів напруги контролю ізоляції (ТНКИ), це питання залишається актуальним і потребує додаткового уточнення та аналізу. Ми вважаємо за доцільне

представити власні аргументи та внести певну ясність у природу виникнення пошкоджень цього типу трансформаторів. Визначення реальних причин відмов є важливою науково-практичною задачею, оскільки лише ґрунтуючись на достовірній інформації про механізми пошкоджень можна розробити ефективні та універсальні технічні заходи для їх запобігання.

Досвід експлуатації електричних мереж показує, що основними факторами, які призводять до термічної перевантаженості та пошкодження трансформаторів напруги, є дія ферорезонансних процесів у мережі та перезбудження трансформаторів підвищеною напругою. Якщо вплив ферорезонансних явищ розглядався у багатьох наукових роботах і технічних звітах, то проблема перезбудження, спричиненого підвищеними напругами в нормальних або післяаварійних режимах, залишається менш дослідженою. Через це випадки пошкодження трансформаторів напруги часто помилково приписуються саме ферорезонансним процесам, хоча реальна причина може бути іншою.

Отже, детальне вивчення фізичних механізмів виникнення пошкоджень трансформаторів напруги контролю ізоляції є необхідним для формування більш повного уявлення про їх роботу в реальних умовах експлуатації, а також аналіз їх впливу на стан обладнання та стабільність режимів електричних мереж.

1. Пошкодження трансформаторів напруги (ТН) внаслідок ферорезонансу.

Однією з основних причин виходу з ладу трансформаторів напруги контролю ізоляції є виникнення у мережі ферорезонансних процесів. У таких режимах через обмотки високої напруги можуть протікати струми, що у багато разів перевищують їх номінальні значення [2–3].

Ферорезонанс виникає тоді, коли індуктивний опір трансформатора напруги дорівнює ємнісному опору електричної мережі, тобто виконується умова $\omega L = 1/\omega C$. Це резонансне співвідношення може реалізовуватись не

лише на основній частоті (50 Гц), але й на вищих або нижчих гармонічних складових напруги.

Варто зазначити, що реальне пошкодження трансформаторів напруги спостерігається переважно при субгармонічному ферорезонансі, коли частота коливань є нижчою за основну. У таких режимах струм і магнітна індукція в осерді трансформатора можуть значно перевищувати допустимі рівні, що спричиняє його термічне або електричне руйнування. Водночас ферорезонансні процеси, які виникають на частоті 50 Гц і вище, як правило, не призводять до пошкодження ТН [2].

Необхідною, але недостатньою умовою виникнення ферорезонансного режиму є наявність у мережі несиметрії, яка спричиняє появу напруги зміщення нейтралі. Основним видом такої несиметрії в мережах 6–35 кВ є однофазні замикання на землю (ОЗЗ), тому доцільно досліджувати процеси, що виникають під час ОЗЗ та в момент їх ліквідації.

З метою аналізу цих явищ була розроблена модель фрагмента мережі у програмному середовищі MATLAB, яка дає змогу детально досліджувати поведінку електричної системи під час різноманітних перехідних процесів. Особливу увагу приділено однофазним дуговим замиканням (ОДЗ), що виникають через переривчасту дугу, а також процесам, які супроводжують відключення або самоусунення ОЗЗ.

Металеві замикання та замикання через стійку дугу за своїм впливом на трансформатори напруги практично не відрізняються. У цих режимах струми, що протікають через обмотки високої напруги, не перевищують допустимих значень і не становлять небезпеки для обладнання.

Однак після усунення замикання в мережі можуть виникати значні перехідні процеси (ПП), які супроводжуються збудженням ферорезонансних коливань. Такі коливання пов'язані з розрядом ємності нульової послідовності мережі через заземлені обмотки високої напруги трансформаторів.

Характер ферорезонансного процесу залежить від початкових умов та співвідношення параметрів мережі. У різних випадках ці коливання можуть бути як затухаючими, так і незатухаючими, що визначає ступінь їх впливу на працездатність трансформаторів напруги.

На рис.1.1 представлена схема заміщення мережі. На цій схемі трансформатор представлено у вигляді джерела електрорушійної сили E , фазної індуктивності розсіювання L_u та активного опору R_u . Електрична мережа моделюється зосередженими фазною ємністю C_ϕ і міжфазною ємністю $C_{m\phi}$, а також активним опором R_p , який відображає активні провідності лінії відносно землі.

Така узагальнена модель використовується для аналізу умов виникнення та розвитку ферорезонансних процесів у мережах 6–35 кВ. Вона дозволяє оцінити вплив параметрів мережі й трансформатора на характер перехідних процесів, визначити можливість появи стійких або нестійких коливань, а також оцінити ефективність засобів обмеження ферорезонансу, зокрема, антирезонансних трансформаторів напруги.

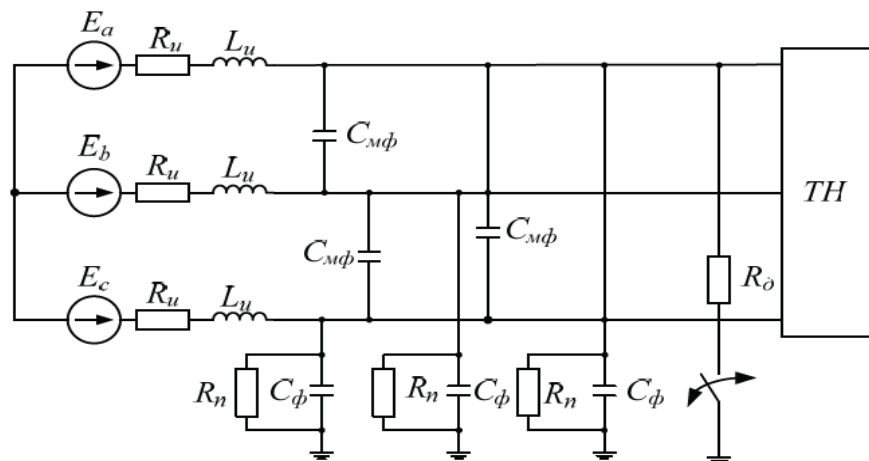


Рисунок 1.1 – Розрахункова схема мережі в режимі ОДЗ

Розглянемо режими роботи трансформаторів напруги типу НТМІ-6-66 та НАМІ-6-95. Їхні схеми заміщення наведено на рис.1.2 [3].

У моделі: L_m — результуюча нелінійна індуктивність магнітного кола, що характеризує процес намагнічування; R_1 — активний опір первинної обмотки; R_β — баластний опір, який вмикається в обмотку розімкнутого

трикутника з метою пригнічення ферорезонансних явищ; $L_{\text{тнп}}$ — індуктивність трансформатора нульової послідовності (ТНП).

Застосування такої схеми заміщення дозволяє більш точно відтворити електромагнітні процеси, що відбуваються у трансформаторі напруги під час виникнення ферорезонансних коливань, і надалі використовується для моделювання цих режимів у середовищі MATLAB/Simulink.

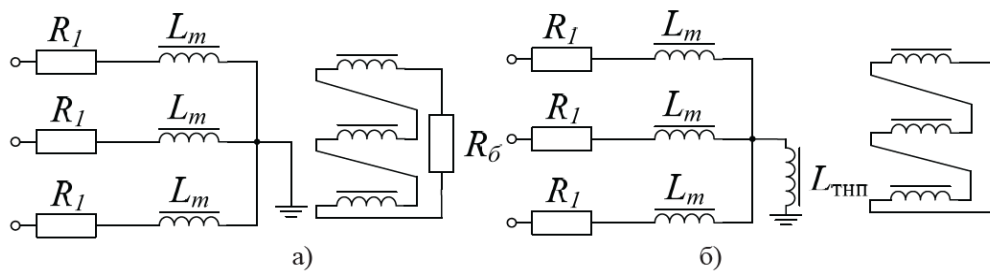


Рисунок 1.2 - Схема заміщення ТН типу НТМІ-6-66 (а), НАМІ-6-95 (б)

Практичний досвід експлуатації показує, що підвищена пошкоджуваність трансформаторів напруги контролю ізоляції характерна переважно для мереж із малими струмами замикання на землю — у діапазоні 1–10 А [4]. Саме за таких співвідношень індуктивності трансформатора напруги та ємності мережі виникають умови, за яких незатухаючий ферорезонанс стає можливим.

Як приклад, на рис. 1.3 наведено розрахункові осцилограми струму у високовольтній обмотці трансформатора напруги під час ферорезонансного процесу, що виник після відключення однофазного замикання на землю. У цьому режимі струми в обмотці високої напруги (ВН) перевищують значення термічної стійкості, яке становить приблизно 0,3 А. Тривале існування такого режиму призводить до перегріву та руйнуванню обмотки високої напруги трансформатора.

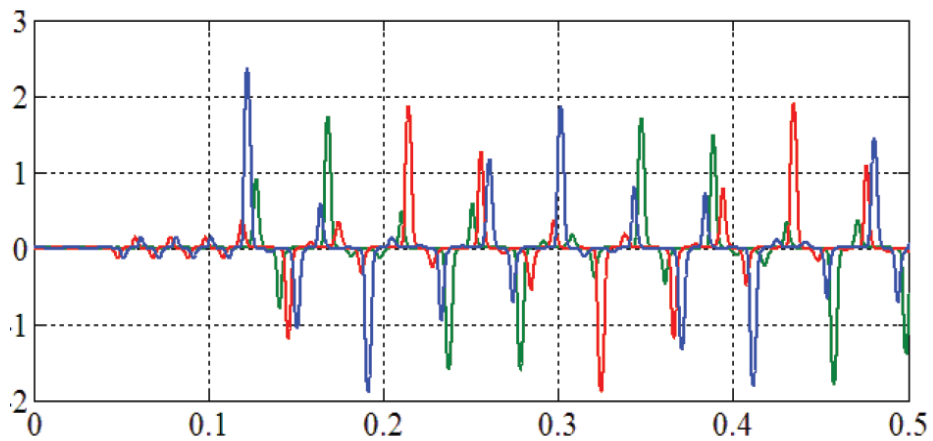


Рисунок 1.3 - Розрахункові криві струмів в обмотці ВН при ферорезонансі, що виникає у результаті відключення ОЗЗ, $C_{\text{ф}} = 0,5 \text{ мкФ}$

У результаті численних розрахунків встановлено, що для одного комплекту трансформаторів напруги типу НТМІ-6 зона існування стійкого ферорезонансного режиму спостерігається в діапазоні зміни фазної ємності від 0 до 1,5 мкФ, що відповідає ємнісному струму 0–5 А.

З метою максимального наближення математичної моделі до умов реальної мережі, у розрахунках було враховано низку факторів: можливу несиметрію магнітних характеристик фаз трансформаторів напруги, нерівномірність ємностей мережі, а також відхилення напруги джерела живлення від номінального значення.

Одним із найпростіших і найдоступніших способів пригнічення ферорезонансних процесів є включення в обмотку розімкнутого трикутника резистора опором близько 25 Ом [5].

Принцип дії такого резистора полягає у шунтуванні нелінійного магнітного контуру трансформатора напруги малим активним опором, що забезпечує створення додаткових активних втрат у контурі нульової послідовності. Це, у свою чергу, зменшує амплітуду коливань і сприяє загасанню ферорезонансу.

Слід зазначити, що умови виникнення ферорезонансу та параметри мережі у цьому випадку аналогічні тим, що були розглянуті для попереднього прикладу (рис. 1.3).

У результаті моделювання встановлено, що в усьому діапазоні існування стійкого ферорезонансного режиму підключення резистора опором 25 Ом до обмотки розімкнутого трикутника забезпечує повне пригнічення ферорезонансних коливань.

Разом із тим, існує поширена думка про низьку ефективність такого резистора в боротьбі з ферорезонансом. Це твердження ґрунтується переважно на практичному досвіді експлуатації електричних мереж. Зокрема, спостереження показують, що термічне пошкодження високовольтної обмотки ТН може відбуватися як при наявності баластного резистора, так і без нього, особливо під час ОЗЗ.

Крім того, за результатами натурних експериментів, наведених у роботі [5], встановлено, що під час замикань на землю через переривчасту дугу резистор опором 25 Ом не забезпечує належного захисту ТНКІ і не запобігає їх пошкодженню.

2. Пошкодження ТН можуть виникати внаслідок перенапруги. Для трансформаторів напруги класичної конструкції (типу ТНМІ, ЗНОМ ТА ЗНОЛ) характерним є швидке насичення магнітної системи.

Відомо, що робоча індукція трансформатора типу НТМІ-6 становить близько 0,95 Тл. У разі появи перенапруги, коли напруга на неушкоджених фазах зростає приблизно у три рази, магнітна індукція в осердях цих фаз підвищується до 1,65 Тл. Подальше збільшення напруги викликає глибоке насичення сталі осердя та суттєве зростання струму у високовольтній обмотці. У результаті цього магнітна система перегрівається, а обмотка високої напруги може вигоріти.

Перенапруга під час ОДЗ характеризується коефіцієнтом, що становить приблизно 2,6–3,2 Уф. Тривалість дії перенапруги визначається часом існування дугового розряду. Вплив напруги такої амплітуди на трансформатор напруги неминуче спричиняє глибоке насичення магнітопроводу та різке зростання струму у високовольтній обмотці.

З огляду на це можна зробити висновок, що основною причиною пошкодження трансформаторів напруги в умовах, описаних у [6], є надмірне збудження магнітної системи, викликане підвищенням напруги під час дії ОДЗ.

Наведені міркування підтверджуються результатами комп'ютерного моделювання, представленими на рис. 1.4. Розрахункові криві фазної напруги і струмів у високовольтній обмотці трансформатора отримані для випадку переривчастого однофазного замикання на землю.

Під час моделювання процесу горіння дуги було застосовано теорію Петерсена, згідно з якою займання дуги відбувається у момент максимального значення напруги пошкодженої фази, а її згасання — під час першого переходу високочастотної складової струму через нуль.

У такому режимі значення струмів є великими, що становить потенційну небезпеку для трансформатора напруги та елементів мережі.

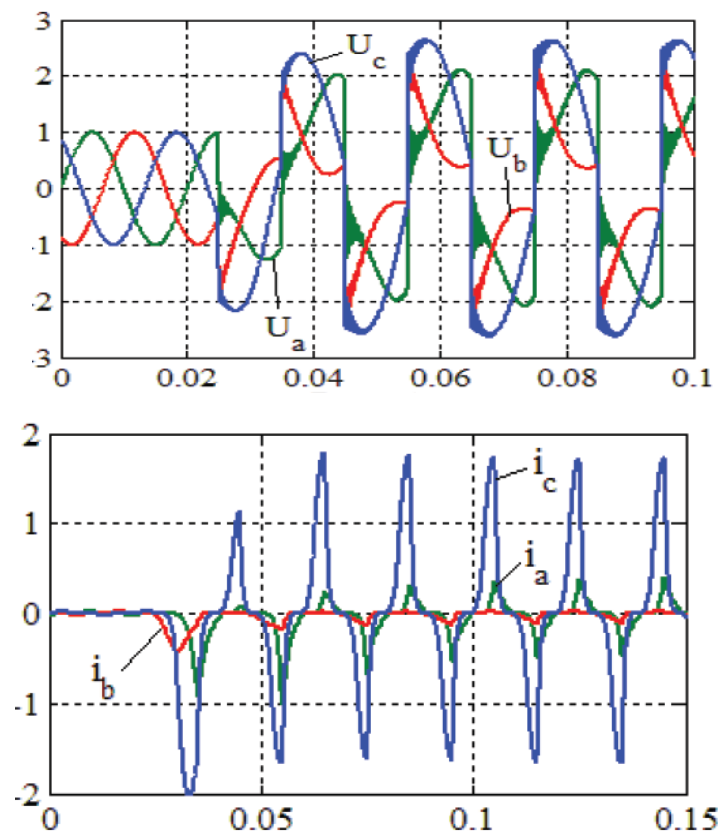


Рисунок 1.4 – Розрахункові криві напруги та струмів при ОДЗ

Не можна стверджувати, що подібна класифікація причин пошкодження трансформаторів напруги є новою або вперше наведена в цій

роботі. Термін «ферорезонанс» є добре відомим і загальноприйнятим у науковій практиці. Водночас поняття «перезбудження» використовується значно рідше та деякими авторами розглядається як різновид автопараметричного ферорезонансу [6].

Ототожнювати перезбудження трансформатора з автопараметричним ферорезонансом є некоректним. Виникнення великих струмів у його обмотках не обов'язково пов'язане з наявністю явища ферорезонансу.

Розрахунки показують, що при переривчастому однофазному замиканні на землю, резистора відповідного номіналу цілком достатньо для обмеження струму у високовольтній обмотці до безпечних значень. Однак слід зазначити, що такий резистор не впливає на порушення резонансних умов, а його основна функція полягає у виконанні ролі подільника напруги.

У разі значної перенапруги і переходу трансформатора напруги від індуктивності намагнічування до індуктивності розсіювання, струм у високовольтній обмотці обмежується переважно активним опором додаткового резистора та первинної обмотки. Ефективність обмеження струму зростає зі збільшенням величини додаткового опору.

Водночас необхідно враховувати негативний вплив додаткового резистора на метрологічні характеристики трансформатора напруги, який прямо пропорційний величині цього опору.

З одного боку, розв'язання питання класифікації пошкоджень трансформаторів напруги саме по собі не усуває проблему їх виникнення. Водночас наявність чіткої та однозначної класифікації причин пошкоджень і розуміння їхньої природи створюють передумови для пошуку найбільш ефективних і універсальних технічних рішень.

Для погашення ферорезонансних процесів доцільним є встановлення демпфувальних резисторів у коло розімкнутого трикутника. Щодо запобігання перезбудженню трансформаторів напруги, слід передбачити заходи, спрямовані на обмеження перенапруги під час однофазних

замикань на землю. Найбільш ефективним способом такого обмеження є застосування резистивного заземлення нейтралі мережі [7].

При цьому значення резистора вибирають із умови рівності активної складової струму, створюваної резистором у місці замикання, та ємнісної складової струму мережі. Обмеження перенапруги до рівня 2–2,2 U_f запобігає перезбудженню трансформаторів напруги, а отже, виникненню надструмів і можливим пошкодженням обладнання.

Крім того, застосування резистивного заземлення нейтралі повністю усуває прояви ферорезонансних процесів. Це пояснюється тим, що контур нульової послідовності трансформатора шунтується малим опором у нейтралі мережі, внаслідок чого стає неможливим процес розряду ємності мережі через високовольтні обмотки трансформатора.

3. Пошкодження антирезонансних трансформаторів напруги.

Природним кроком у вирішенні проблеми високої аварійності вимірювальних трансформаторів традиційних конструкцій стало створення нових, так званих антирезонансних трансформаторів напруги [7].

Основною відмінною особливістю трансформатора типу НАМІ-6-95 (рис.1.5) є наявність ненасичуваного трансформатора нульової послідовності (ТНП), індуктивний опір якого становить близько 300 кОм. Крім того, цей трансформатор має трьохстрижневу конструкцію, що запобігає значному насиченню магнітопроводу під дією напруги нульової послідовності.

Варто зазначити, що основний принцип побудови всіх антирезонансних трансформаторів полягає у використанні трансформатора зі зниженою робочою індукцією (0,3–0,4 Тл), який вмикається між фазою та землею або між нейтраллю високовольтної обмотки та землею.

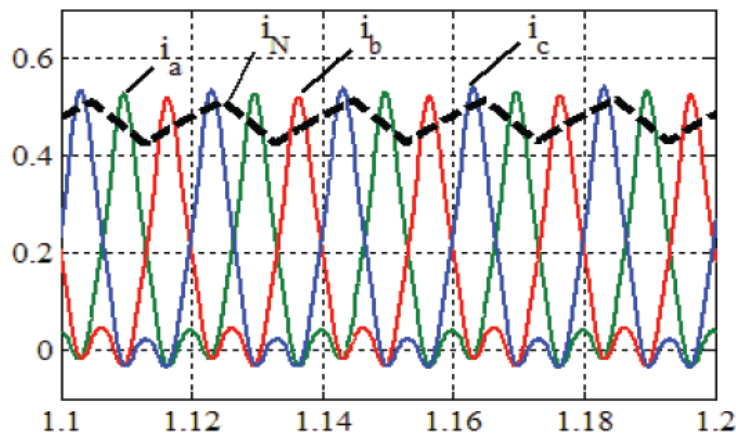


Рисунок 1.5 - Розрахункові криві струмів у нейтралі ТН при двохполярній несиметричній дузі (б). $C_f=1$ мкФ

Використання ненасичуваного трансформатора нульової послідовності забезпечує підвищену стійкість трансформаторів типу НАМІ-6-95 до явища перезбудження, оскільки навіть за кратності перенапруги 3Уф і більше суттєвого насичення магнітної системи не спостерігається. Практичний досвід підтверджує, що рівень пошкоджуваності антирезонансних трансформаторів напруги значно нижчий порівняно з трансформаторами традиційної конструкції.

Як показали результати досліджень [7], пошкодження антирезонансних трансформаторів напруги можливе у випадку несиметричної дуги, коли напруги займання на позитивній та негативній півхвилях відрізняються. Найбільш критичним різновидом несиметричної дуги є однополярна дуга, що запалюється та гасне лише один раз за період.

У цьому випадку в спектрі фазної напруги з'являється постійна складова, внаслідок чого через обмотки трансформатора починає протікати постійний струм. Його величина обмежується лише активним опором високовольтної обмотки та трансформатора нульової послідовності.

Найбільше значення струму буде йти по обмотці ТНП, оскільки в нейтралі струми підсумовуються. Саме цим пояснюється той факт, що в антирезонансних ТН частіше всього пошкоджується обмотка ТНП.

У підсумку слід наголосити на важливому аспекті, який потребує особливої уваги. Практичний досвід експлуатації показує, що підвищена аварійність трансформаторів напруги є характерною для повітряних електричних мереж із малою фазною ємністю. У таких мережах імовірність виникнення ферорезонансних процесів є вищою, ніж у кабельних мережах, що й пояснює збільшену кількість пошкоджень трансформаторів напруги при їх використанні в повітряних лініях. Водночас зазначене пояснення не враховує особливостей процесу горіння дуги, який має суттєвий вплив на характер аварій у повітряних мережах.

Кабельні електричні мережі характеризуються замкненим характером дугового розряду, що виникає, як правило, у разі пошкодження кінцевих або з'єднувальних муфт, а також ізоляції кабелю. На відміну від них, для повітряних мереж типовою є відкрита дуга, що вільно горить, яка може виникати внаслідок грозової або комутаційної перенапруги, пробойів чи механічних ушкоджень елементів лінії. У відкритих мережах дуга здатна підтримуватися протягом тривалого часу, а вплив вітру сприяє її періодичному згасанню та повторному запаленню. Тому ймовірність тривалого існування переривчастої дуги в повітряних мережах істотно вища, ніж у кабельних.

Із викладеного вище видно, що підвищений рівень аварійності трансформаторів напруги в повітряних мережах зумовлений не лише проявами ферорезонансних процесів, але й тривалим впливом режимів переривчастого однофазного дугового замикання. Отже, можна стверджувати, що роль ферорезонансу як основної причини пошкодження трансформаторів напруги певною мірою є перебільшеною.

Можна зробити висновок про те, що:

- Необхідно чітко розмежовувати пошкодження трансформаторів напруги, спричинені ферорезонансними процесами, та пошкодження, зумовлені перенапругою. Хоча обидва явища мають подібний тепловий

вплив на трансформатор, їхня фізична природа та методи захисту суттєво відрізняються.

Для захисту трансформаторів напруги від перенапруги основну увагу слід приділяти запобіганню надмірному магнітному насиченню осердя трансформатора. Натомість ефективним заходом протидії ферорезонансним процесам є введення додаткових активних елементів у ферорезонансне коло, які забезпечують збільшення активних втрат і, відповідно, стабілізацію режиму роботи.

- Ушкоджуваність ТН напругу пов'язана з режимом заземлення нейтралі мережі. Найменш дієвим способом заземлення нейтралі є ізольована нейтраль, так як для цього режиму нейтралі характерні значні дугові перенапруги, ферорезонансні явища. Зміни режиму нейтралі цих мереж дозволить повністю вирішити цю проблему.

1.2. Вплив характеру горіння дуги на пошкодження трансформаторів напруги контролю ізоляції

Під час теоретичних досліджень ефективності застосування різних типів трансформаторів напруги основну увагу зазвичай приділяють їхній стійкості до перезбудження під час дугової перенапруги і до впливу ферорезонансних процесів. Однак результати проведених досліджень показали, що характер горіння дуги має вирішальний вплив на режим роботи трансформаторів напруги, зокрема на величину струму в їхніх обмотках і, відповідно, на рівень пошкоджуваності трансформаторів у нестационарних режимах.

При цьому ключовим параметром трансформатора напруги є його вебер-амперна характеристика. На рис.1.6 надано криву намагнічування фази трансформатора типу НТМІ-6 без урахування індуктивності розсіювання. Ця залежність була отримана експериментально. Помилка вимірювання потокозчеплення становить 1,8%, струму намагнічування - 2%.

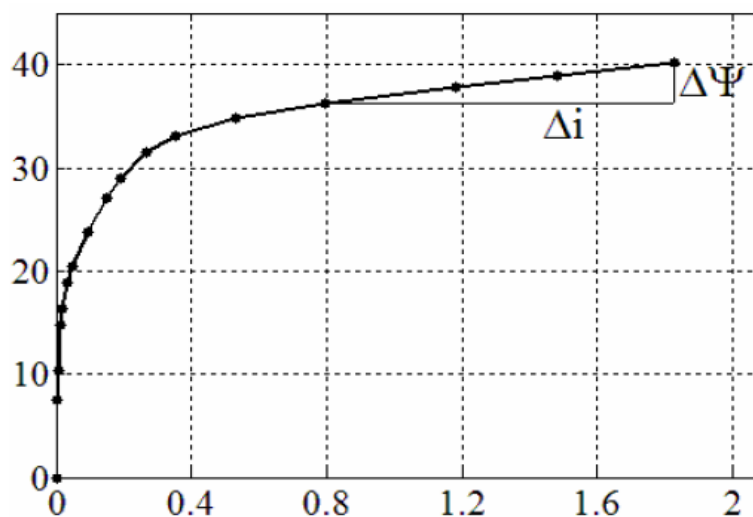


Рисунок 1.6 - Вебер-амперна характеристика фази ТН типу НТМІ-6

У режимі однофазного дугового замикання можливі два принципово різні стани горіння дуги — стійкий і переривчастий.

Стійка дуга за своїми електричними характеристиками подібна до металевого короткого замикання, тому не створює значної загрози для трансформатора напруги, оскільки режим роботи при цьому залишається відносно стабільним.

Натомість переривчасте (нестабільне) горіння дуги становить набагато більшу небезпеку [8]. У цьому випадку на трансформатор діють короточасні імпульсні перенапруги, які викликають періодичне насичення магнітопроводу. Такі процеси призводять до різких змін струму в обмотках, що може стати причиною локального перегріву та подальшого пошкодження трансформатора напруги.

Величина струму в обмотці при ОДЗ визначається, передусім, кратністю перенапруги, що виникає у момент горіння або згасання дуги.

Показовим є той факт, що навіть за відносно близьких значень кратності перенапруги у фазах (2,13; 2,45; 2,69) спостерігається істотна різниця в діючих значеннях струмів за фазами (0,19 А; 0,03 А; 0,85 А), причому їхній максимум припадає на фазу, що передуює аварійній (фаза С).

Таку нерівномірність можна пояснити спектральним складом фазних

напруги, який формується під час однофазного дугового замикання. Відповідні спектри наведено на рис.1.7, де показано характер гармонічних складових напруги, що зумовлюють різну реакцію трансформатора напруги в окремих фазах.

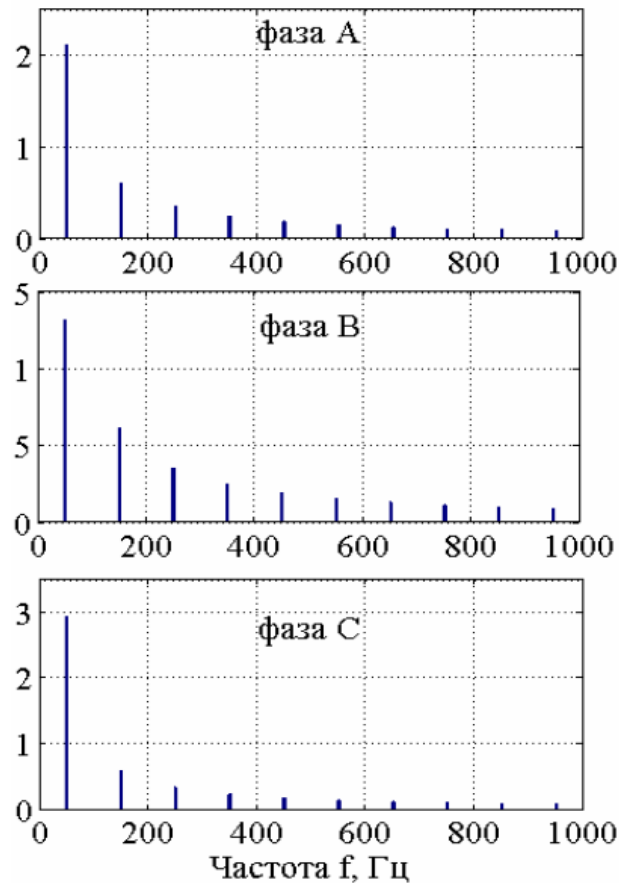


Рисунок 1.7 - Амплітудно-частотний спектр фазної напруги при симетричному ОДЗ

Дещо інша картина спостерігається у випадку несиметричної дуги, коли напруга запалювання для позитивної та негативної півхвиль фазної напруги пошкодженої фази має різні значення.

Особливим, найбільш небезпечним випадком несиметричної дуги є однополярна дуга, яка запалюється та згасає лише один раз за період. Такий режим горіння створює найбільшу загрозу для всіх електромагнітних трансформаторів напруги, що мають гальванічний зв'язок із землею, оскільки він спричиняє значні коливання магнітного потоку та струму в обмотках.

На рис.1.8 надано розрахункові криві фазних струмів у високовольтній обмотці трансформатора напруги за умов однополярного горіння дуги.

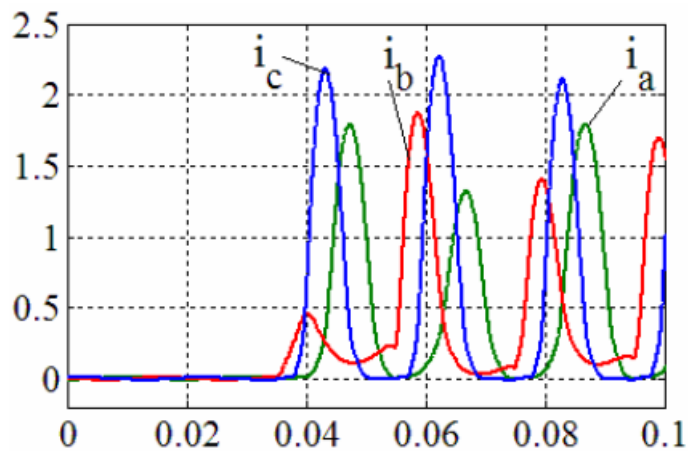


Рисунок 1.8 - Розрахункові криві фазних струмів в обмотці ТН при однополярній дузі

Струм у даному режимі має чітко виражений однополярний характер. Характерною особливістю цього випадку є те, що діючі значення струмів у всіх фазах є приблизно однаковими (0,81 А; 0,77 А; 0,91 А).

У низці робіт [4-8] наявність значних струмів у високовольтній обмотці трансформатора напруги при однополярному горінні дуги пояснюється виникненням ферорезонансних процесів у мережі. Проте таке трактування є помилковим, оскільки спостережувані струми зумовлені безпосередньо особливостями процесу горіння дуги, а не проявами ферорезонансу.

У фазних напругах присутня постійна складова, причому її значення однакове в усіх фазах. Амплітудний спектр фази В (рис.1.9) свідчить, що величина цієї постійної складової становить 650 В. Наслідком наявності постійної складової є підмагнічування осереддя трансформатора напруги постійним струмом; значення цього струму визначається величиною постійної напруги та активним опором кола.

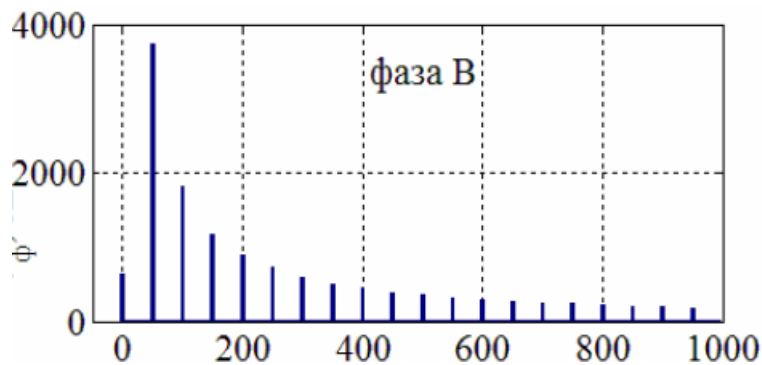


Рисунок 1.9 - Амплітудно-частотний спектр фазної напруги при однополярній дузі

У цьому випадку струм підмагнічування становить $650/1200 = 0,54$ А. За дії постійного струму такої величини робоча точка на кривій намагнічування зміщується в область глибокого насичення, що супроводжується відповідними негативними наслідками. Окрім цього, струм подібного рівня становить потенційну небезпеку для обмотки високої напруги.

Можна сказати, що:

- За наявності несиметричних дуг у спектрі фазної напруги з'являється постійна складова, що призводить до підмагнічування осердя постійним струмом. Найбільш небезпечною є однополярна дуга, за якої величина постійної складової досягає максимального значення. Сучасні антирезонансні трансформатори напруги електромагнітного типу не здатні тривалий час працювати за умов дії несиметричних дуг, тому ушкодження найчастіше виникають саме в високовольтній обмотці таких трансформаторів. Подібні недоліки слід враховувати ще на етапі проєктування трансформаторів напруги шляхом підвищення активного опору обмотки ТНП.

- Застосування антирезонансного трансформатора напруги дає змогу уникнути пошкоджень під час різноманітних нестационарних процесів у мережі. Позитивні результати експлуатації таких трансформаторів свідчать про їх високу надійність і стійкість до впливу перехідних режимів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Проаналізовані причини пошкодження трансформаторів напруги на прикладі трансформатору напруги контролю ізоляції.

Необхідно чітко розмежовувати пошкодження трансформаторів напруги, спричинені ферорезонансними процесами, та пошкодження, зумовлені перенапругою. Хоча обидва явища мають подібний тепловий вплив на трансформатор, їхня фізична природа та методи захисту суттєво відрізняються.

Для захисту трансформаторів напруги від перенапруги основну увагу слід приділяти запобіганню надмірному магнітному насиченню осердя трансформатора. Натомість ефективним заходом протидії ферорезонансним процесам є введення додаткових активних елементів у ферорезонансне коло, які забезпечують збільшення активних втрат і, відповідно, стабілізацію режиму роботи.

Пошкодження ТН напруги пов'язане з режимом заземлення нейтралі мережі. Найменш дієвим способом заземлення нейтралі є ізольована нейтраль, так як для цього режиму нейтралі характерні значні дугові перенапруги, ферорезонансні явища. Зміни режиму нейтралі цих мереж дозволить повністю вирішити цю проблему.

Сучасні антирезонансні трансформатори напруги електромагнітного типу не здатні тривалий час працювати за умов дії несиметричних дуг, тому ушкодження найчастіше виникають саме в високовольтній обмотці таких трансформаторів. Подібні недоліки слід враховувати ще на етапі проєктування трансформаторів напруги шляхом підвищення активного опору обмотки ТНП.

Застосування антирезонансного трансформатора напруги дає змогу уникнути пошкоджень під час різноманітних нестаціонарних процесів у мережі. Позитивні результати експлуатації таких трансформаторів свідчать про їх високу надійність і стійкість до впливу перехідних режимів.

РОЗДІЛ 2. ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Резонансні явища у ланцюгах з вимірювальними трансформаторами

У мережах з ізольованою нейтраллю значна частина пошкоджень електрообладнання зумовлена проявами ферорезонансних процесів. Це явище призводить до виникнення перенапруги або надструмів, на які обладнання не розраховане з точки зору конструкції та не має достатнього захисту. Особливу небезпеку ферорезонанс становить через те, що він може виникати досить часто й існувати протягом необмеженого часу, спричиняючи руйнівний вплив на елементи електричної мережі. У розподільчих електричних мережах з ізольованою нейтраллю класів напруги 6–35 кВ, до яких належать міські, сільські мережі, а також генераторні системи власних потреб електроустановок, у процесі виконання комутаційних операцій або під час виникнення однофазних замикань на землю (ОЗЗ) нерідко проявляються ферорезонансні явища. Такі процеси виникають у колах електромагнітних вимірювальних трансформаторів напруги та можуть призводити до порушення нормального режиму їх роботи.

Як відмічалось раніше, одним із найефективніших заходів підвищення надійності експлуатації трансформаторів напруги (ТН) та запобігання їх виходу з ладу є застосування антирезонансних трансформаторів. Уведення в коло розімкнутого трикутника обмотки ТН резистора з потужністю близько 400 Вт і опором приблизно 25 Ом майже не впливає на перебіг процесів, що відбуваються під час замикання в мережі.

Напруга на непошкоджених фазах не перевищує лінійного значення, яке для мереж напругою 6–35 кВ є максимальним робочим рівнем. Тому така напруга не становить небезпеки для ізоляції електричного обладнання та не перевищує допустимих норм його експлуатації.

Для запобігання пошкодженню трансформаторів напруги у мережах з ізолюваною нейтраллю напругою 6–35 кВ рекомендується застосовувати антирезонансні трансформатори напруги. До таких ТН висуваються такі основні вимоги [9]:

- вони не повинні спричиняти виникнення стійких ферорезонансних процесів;
- мають залишатися працездатними під час тривалих однофазних замикань на землю, що супроводжуються багаторазовими повторними займаннями дуги;
- повинні бути стійкими до впливу сталих ферорезонансних коливань, які можуть виникати внаслідок взаємодії ємності мережі з нелінійною індуктивністю інших трансформаторів (як вимірювальних, так і силових).

Антирезонансні властивості трансформаторів напруги класів 6–10–35 кВ забезпечуються такими технічними заходами:

- уведенням у коло нейтралі активного демпфувального опору;
- підвищенням рівня насичення магнітного потоку шляхом зменшення номінальної індукції в сердечнику;
- зміною схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів напруги та вдосконаленням конструктивних рішень їх магнітної системи.

Розглянемо трифазний стрижневий трансформатор типу НАМИТ-10-2, який являє собою конструктивно об'єднану в єдину систему пару однофазних трансформаторів напруги:

1. ТНКІ — трансформатор напруги контролю ізоляції з трьома обмотками, первинні з яких увімкнені за схемою «зірка». Призначений для живлення ланцюгів вимірювальних приладів обліку електроенергії, а також для ланцюгів захисту та контролю стану ізоляції.

2. ТНП — трансформатор нульової послідовності з двома обмотками. Первинна обмотка підключена до нейтралі ТНКІ та заземлена, а вторинна обмотка замкнена. У разі виникнення ферорезонансу замкнена трикутником обмотка автоматично розмикається.

Антирезонансні властивості забезпечуються шляхом введення в первинне коло, пов'язане з землею, індуктивного опору у вигляді трансформатора нульової послідовності. Це здійснюється шляхом шунтування вторинної обмотки трансформатора за допомогою схеми релейного захисту (РЗ). При цьому сам трансформатор залишається чутливим до виникнення ферорезонансних процесів.

Серед недоліків також слід зазначити ненадійність роботи РЗ та швидке насичення сталевих стрижнів окремих фаз, що може призводити до виникнення так званої «помилкової землі».

Для вивчення впливу ферорезонансних явищ була створена математична модель вимірювального трансформатора при однофазному замиканні на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю. Вимірювальний трансформатор напруги представляє собою трансформаторну групу, що складається з трьох однакових однофазних трансформаторів (рис.2.1)

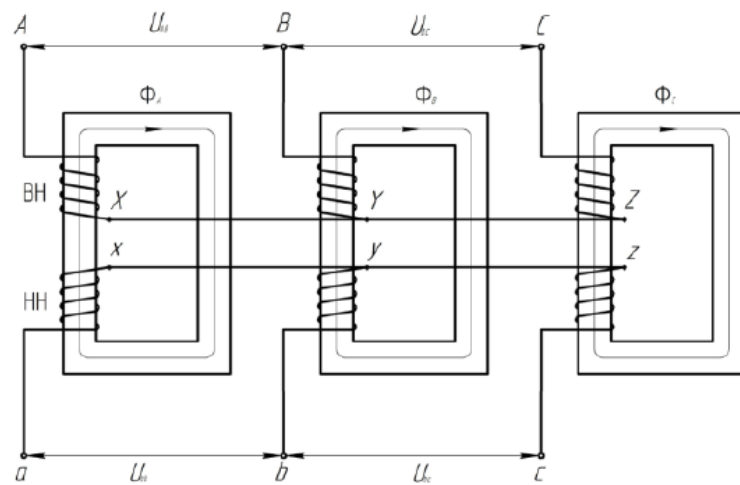


Рисунок 2.1 - Конструкція магнітопровода, що складається з групи з трьох однофазних трансформаторів

При однофазному КЗ на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю, у фазних напругах і струмах з'являються складові нульової послідовності:

$$3U_0 = U_A + U_B + U_C, \quad (2.1)$$

Де: U_A , U_B , U_C – фазна напруга (U_ϕ) фаз А, В та С відповідно; U_0 – напруга нульової послідовності.

Схема, що включає фазні напруги, напругу нульової послідовності, струм первинної обмотки, активний опір первинного кола, індуктивний опір розсіювання первинного кола, число витків первинної обмотки, магнітні потоки, ємність конденсатора та струм у нульовому проводі, за своєю структурою подібна до імітаційної моделі, наведеної на рис. 2.2.

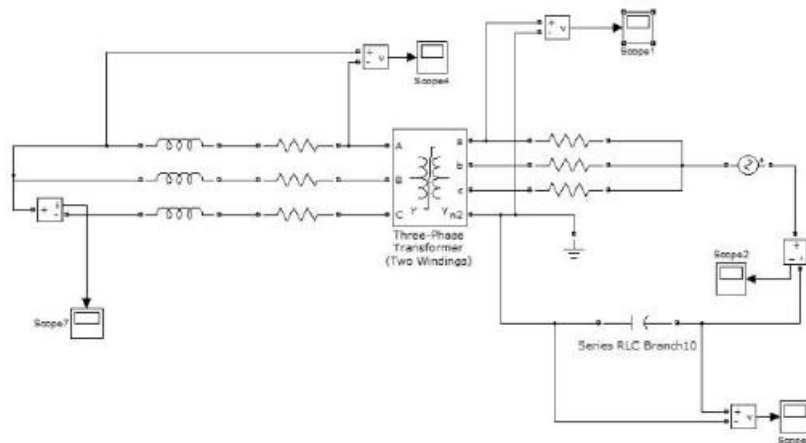


Рисунок 2.2 - Імітаційна модель однофазного КЗ на землю в ланцюгах, що включають вимірювальний трансформатор напруги, розроблена у програмному пакеті MatLab

Рівняння, складені по другому закону Кірхгофа для магнітного ланцюга фаз А, В, С має вид:

$$H_A l_A = w_A i_A;$$

$$H_B l_B = w_B i_B;$$

$$H_C l_C = w_C i_C.$$

На рис. 2.3 наведено осцилограми фазної напруги на затискачах трансформатора, струму в нульовому проводі та напруги на конденсаторі до моменту насичення магнітопроводу трансформатора. Із рисунка видно, що фазна напруга на затискачах трансформатора до насичення магнітопроводу має синусоїдальну форму, а її амплітуда становить 200 В. Струм у нульовому проводі до настання насичення магнітопроводу також має синусоїдальний характер. Амплітуда струму становить 0,4 А. Напруга на конденсаторі до моменту насичення магнітопроводу трансформатора

має синусоїдальну форму, а її амплітудне значення дорівнює 120 В, тобто:

$$U_{\text{конд}} < U_{\text{ф}}$$

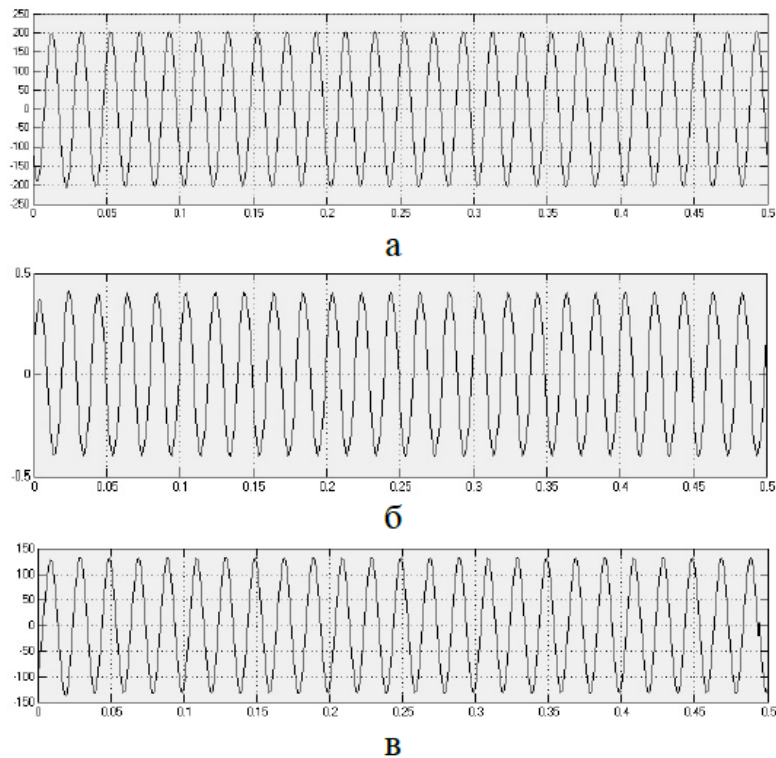


Рисунок 2.3 - Осцилограми фазної напруги на затискачах трансформатора (а), струму в нульовому дроті (б), напруги на конденсаторі (в) до насичення магнітопроводу трансформатора

На рис. 2.4 наведено осцилограми фазної напруги на затискачах трансформатора, струму в нульовому проводі та напруги на конденсаторі після насичення магнітопроводу трансформатора. Із рисунка видно, що після насичення магнітопроводу форма фазної напруги на затискачах трансформатора стає несинусоїдальною, а її амплітудне значення зростає до 400 В.

Після насичення магнітопроводу трансформатора струм у нульовому проводі набуває несинусоїдальної форми, а його амплітуда зростає до 3 А. Напруга на конденсаторі також стає несинусоїдальною, при цьому амплітудне значення напруги підвищується до 500 В, отже: $U_{\text{конд}} > U_{\text{ф}}$.

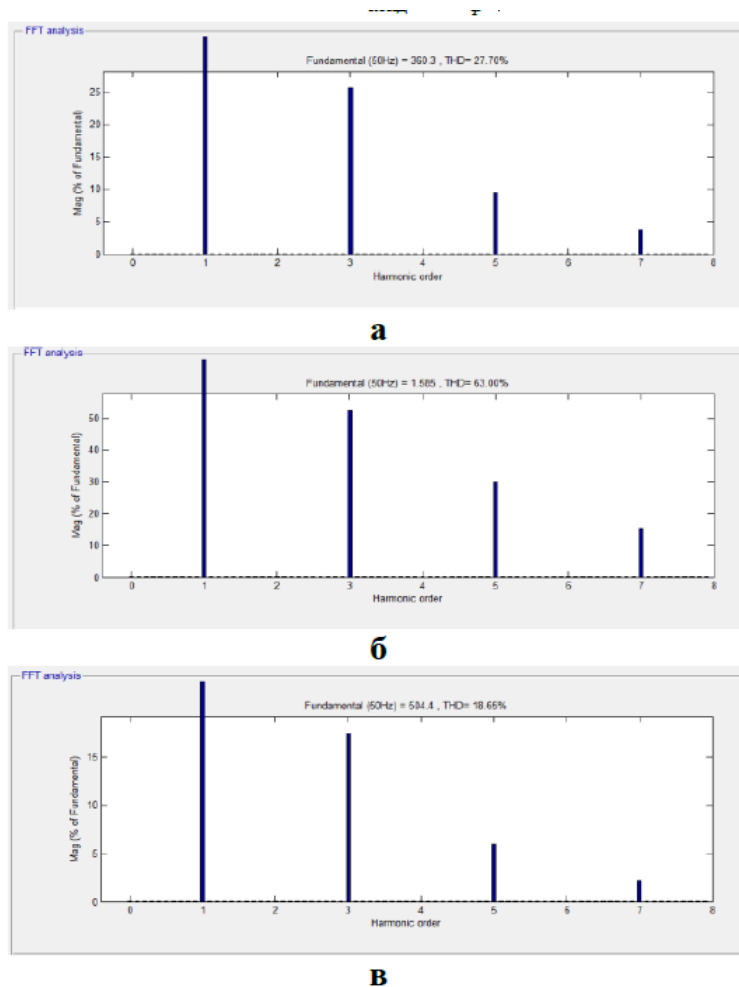


Рисунок 2.4 - Гармонійний склад напруги на затискачах трансформатора (а), струму в нульовому дроті (б), напруги на конденсаторі (в)

На цьому рисунку наведено гармонійний склад напруги на затискачах трансформатора, струму в нульовому проводі та напруги на конденсаторі після насичення магнітопроводу. Із рисунка видно, що значну частку складає третя гармоніка, а також присутні п'ята та сьома гармонічні складові. Це зумовлено наявністю нульової послідовності, що виникає внаслідок ферорезонансного процесу.

У трансформаторах із таким типом магнітопроводу насичення призводить до суттєвого зростання напруги на конденсаторі, збільшення струму в нульовому проводі та підвищення напруги на затискачах трансформатора.

Після насичення трансформатора з таким магнітопроводом напруга на конденсаторі перевищує напругу на затискачах трансформатора. У гармонійному складі при цьому з'являється третя гармонічна складова, а також п'ята та сьома.

Для запобігання ферорезонансним явищам необхідно забезпечити відсутність нульової послідовності у трансформаторі за всіх режимів його роботи. Найбільш ефективним є застосування таких конструкцій, у яких складові нульової послідовності компенсуються, що, у свою чергу, зменшує сумарну індуктивність у стрижнях трансформатора напруги.

2.2. Виникнення ферорезонансу в мережі 24 кВ генераторної напруги енергоблоків

У розгалужених колах, де нелінійні котушки та ємності з'єднані за різними схемами, можуть виникати складні процеси, які неможливо розглядати окремо як ферорезонанс напруги чи струму. У загальному випадку ферорезонансні явища супроводжуються різким переходом від режиму сильного насичення феромагнітного осердя котушки індуктивності до слабо насиченого стану або навпаки. У момент такого переходу спостерігаються стрибки напруги та струму, характерні для режиму сильного насичення. Як наслідок, виникають перенапруги та протікання струмів через обмотку, які перевищують допустимі значення й можуть спричинити теплове пошкодження ізоляції або міжвиткові замикання.

У мережах напругою 6–35 кВ замикання фази на землю в кабельних лініях зазвичай виникають при відносно малій відстані між фазним провідником і заземленими частинами [9]. У таких умовах дуга формується у вузькому проміжку, де присутнє газове дуття, що забезпечує інтенсивну деіонізацію. Після пробою ізоляції (як правило, у момент, близький до максимального значення напруги пошкодженої фази) в мережі

виникає перехідний процес, під час якого через місце пошкодження проходять високочастотні вільні складові струму замикання на землю.

Розрив зв'язку з землею відбувається внаслідок згасання дуги, яка припиняє горіння під час проходження струму через нульове значення. Проте цей процес може статися як під час першого, так і під час наступних переходів високочастотної складової струму через нуль. Крім того, при переході через нуль вимушеної складової струму замикання також відбувається розрив зв'язку фази із землею.

Небезпечні ферорезонансні процеси в мережах середньої напруги можуть виникати тоді, коли з певних причин напруга на трансформаторі напруги електромагнітного типу перевищує номінальне значення більш ніж на 25–30%. Подібні умови часто спостерігаються під час однофазних замикань на землю при першому запаленні дуги. На рис.2.5 надано еквівалентну спрощену схему, яка ілюструє фізичну суть ферорезонансних коливань, що виникають унаслідок насичення сталі магнітопроводу трансформатора.

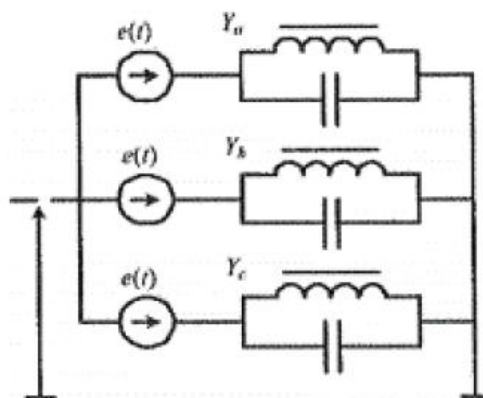


Рисунок 2.5 - Схема для пояснення фізики виникнення ферорезонансних явищ

У нормальному режимі роботи індуктивність намагнічування трансформатора напруги має значне значення, тому загальна провідність фази має ємнісний характер. Проте в перехідних режимах, коли напруга на одній із фаз зростає, її провідність може набувати індуктивного характеру. Оскільки в мережі з ізольованою нейтраллю всі фази взаємопов'язані, за таких умов може виникнути явище, відоме як «нестійкість нейтралі».

У колах, що містять трансформатори напруги, поява та розвиток ферорезонансного процесу можливі лише за виконання трьох основних умов.

Перша умова полягає в тому, що еквівалентна ємність мережі (С_{екв}) повинна знаходитись у межах, які відповідають діапазону зміни індуктивності трансформатора напруги, тобто:

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{xx}} \leq C_{\text{екв}} \leq \frac{1}{\omega^2 \cdot L_s}$$

де: L_{xx} – індуктивність холостого ходу, Гн; L_s – індуктивність насичення, Гн; ω – кутова частота напруги мережі, 1/с.

Друга умова полягає в тому, що для збудження ферорезонансного процесу в контурі, параметри якого відповідають першій умові, необхідна подія, що спричиняє зміну індуктивності трансформатора напруги. У мережі з ізольованою нейтраллю такою подією є відключення дугового або металевого замикання на землю, під час якого напруга на ТН різко змінюється з лінійної (U_L) до фазної (U_F).

Третя умова полягає в тому, що енергія, яка надходить у ферорезонансний контур під час кожної зміни параметра (індуктивності ТН), повинна перевищувати втрати енергії в цьому контурі.

Ферорезонансний процес належить до параметричних, оскільки виникає за наявності умов (першої та другої), що забезпечують зміну одного з параметрів контуру — індуктивності трансформатора напруги. Ця індуктивність змінюється стрибкоподібно: від індуктивності холостого ходу (L_{xx}) до індуктивності насичення (L_s).

Параметричний резонанс досліджено досить ґрунтовно. Відомо, що при раптовому збільшенні індуктивності енергія контуру зростає на величину $0,5(L_{xx} - L_s)$, тоді як зменшення індуктивності не призводить до зміни запасеної електромагнітної енергії, оскільки при цьому не відбувається виконання роботи.

Визначення оптимальних параметрів розрядного пристрою, який забезпечує захист обладнання мережі від негативних впливів, що супроводжують майже всі види пошкоджень із однофазним замиканням на землю, слід здійснювати з урахуванням таких вимог:

1. Розрядний пристрій повинен надійно витримувати робочу напругу мережі та відповідати вимогам ПУЕ.

2. Його підключення має мінімально впливати на режим нейтралі мережі, тобто не призводити до істотного збільшення струму замикання на землю.

3. Розряд ємності мережі через розрядний пристрій повинен бути меншим за половину періоду промислової частоти ($\tau \leq 0,01$ с).

4. Згасання, яке створює еквівалентний опір розрядного пристрою в контурі, утвореному мережею, має бути не меншим за критичне згасання опору для цього контуру.

Як зазначалося раніше, окрім придушення ферорезонансного процесу, такий резистор також запобігає появі дугової перенапруги. Він встигає розрядити мережу навіть у найнебезпечнішому режимі однофазного дугового замикання на землю, коли дуга замикається лише один раз за період і фактично випрямляє струм, що призводить до перезбудження індуктивних елементів мережі постійною складовою.

Додатковою перевагою заземлення нейтралі через активний опір є поліпшення роботи релейного захисту від замикань на землю завдяки виникненню стабільної активної складової струму замикання [7–8]. Цей метод захисту мереж з ізольованою нейтраллю рекомендований для використання, а аналогічні технічні рішення застосовуються для захисту мереж середньої напруги теплових та атомних електростанцій.

У мережах власних потреб електростанцій використовують напругу 6–10 кВ. При виборі режиму заземлення нейтралі таких мереж слід керуватися класифікацією електричних мереж за двома ключовими ознаками: величиною струму замикання на землю та наявністю обертових

машин. У мережах 6 та 10 кВ з комбінованим живленням від енергосистеми, та власних потреб електростанцій, якщо струм замикання на землю перевищує 20 А, при спрацьовуванні релейного захисту для відключення пошкодженої ділянки з однофазним замиканням на землю застосовують резистор у нейтралі мережі з обмеженим часом протікання струму. Значення струму через резистор коливається від десятків до сотень ампер і залежить від типу захисту від однофазного замикання на землю.

Наявність обертових машин є ключовим фактором, оскільки передбачає обов'язкове відключення приєднання з двигуном або генератором, на якому сталося однофазне замикання на землю, і встановлює більш суворі обмеження щодо допустимих величин перенапруги.

2.3. Можливість використання трифазного стрічкового магнітопроводу для антирезонансного трансформатора напруги

Кручений стрічковий магнітопровід трифазних трансформаторів має низку переваг порівняно з пластинчастим: меншу масу, компактніші габарити при тій самій потужності та вищий коефіцієнт корисної дії. Використання витого стрічкового магнітопроводу у конструкції трифазних трансформаторів дозволяє скоротити витрату дроту, зменшити трудомісткість процесів намотування та складання. Водночас такий магнітопровід має специфічні електромагнітні властивості, що є необхідними для його застосування в антирезонансних трансформаторах напруги.

Одним із ефективних способів надання трансформаторам напруги антирезонансних властивостей є використання трифазного тристержневого стрічкового магнітопроводу [9] (рис.2.6).

Як видно, обмотки трансформатора розміщуються на двох стрижнях, при цьому магнітний потік кожного стрижня створюється магніторухливими силами двох первинних обмоток. Потоки нульової

послідовності в насичуваних трансформаторах можна розглядати як треті гармоніки, зсунуті за фазою на 360° . У такому разі потокозчеплення робочих обмоток матимуть синусоїдальну форму, що забезпечує синусоїдальність вихідної напруги. За наявності струмів нульової послідовності у первинних обмотках цього типу трансформатора їх прояв у вихідних напругах практично відсутній.

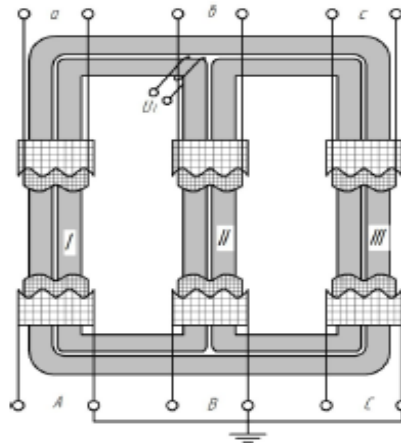


Рисунок 2.6 – Конструкція антирезонансного ТН

Індуктивний опір нульової послідовності в цьому випадку дорівнює нулю, що забезпечує відсутність ферорезонансних явищ. Для визначення співвідношення між нульовими послідовностями напруги у робочих та вимірювальній обмотках було проведено експериментальне дослідження крученого тристрижневого трансформатора з такими параметрами (рис.2.7):

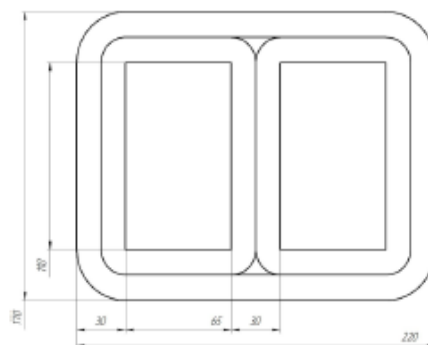


Рисунок 2.7 – Габаритні розміри трансформатора

1) обмотки: первинні - 80 витків, вторинні – 20 витків, на одному стрижні – 10;

2) провід: ПЕВ-2, $S = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2$.

Схеми експерименту наведено на рис.2.8. Для вимірювань параметрів трансформатора використовувався цифровий осцилограф (Fluke 124).

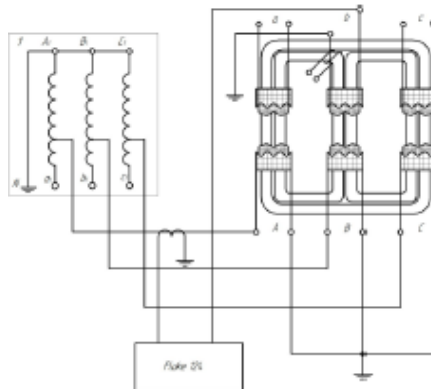


Рисунок 2.8 - Схема експериментального дослідження: вимірювання вхідного струму та вихідної напруги на двох стрижнях

На рис.2.9 наведено залежності первинної напруги (нижній графік) та вихідної напруги (верхній графік) від часу. Як видно з верхнього графіка, вихідні напруги фаз А, В і С мають синусоїдальну форму, що свідчить про відсутність у них складової нульової послідовності — тобто фазна напруга нульової послідовності дорівнює нулю.

В результаті експерименту були визначені наступні значення напруги трансформатора:

$U_A = 31,4 \text{ В}$, $U_a = 7,78 \text{ В}$ - подана напруга та вторинна напруга фази А;

$U_B = 30,9 \text{ В}$, $U_b = 7,67 \text{ В}$ - подана напруга та вторинна напруга фази В;

$U_C = 31,3 \text{ В}$, $U_c = 7,59 \text{ В}$ - подана напруга та вторинна напруга фази С;

$U_{\text{вим}} = 2,47 \text{ В}$, $U_B = 31,5 \text{ В}$ – напруга на вимірювальній обмотці та фазна первинна напруга.

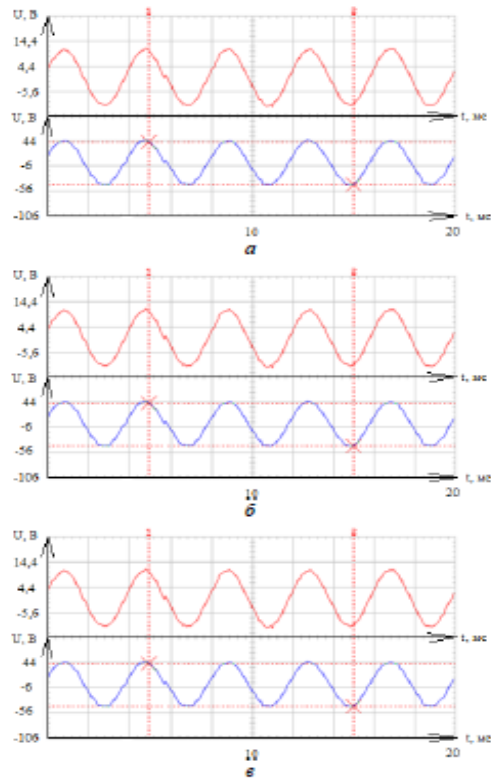


Рисунок 2.9 - Експериментальні залежності первинної напруги та вихідної напруги фазних обмоток: а – фаза А (верхній графік – первинна напруга, нижній графік – вихідна напруга); б - фаза В; в – фаза С

На рис.2.10 наведені осцилограми напруги на вимірювальній обмотці та фазні напруги. Як видно, у першому випадку вихідна напруга має загострену форму, а у другому – практично синусоїдальну.

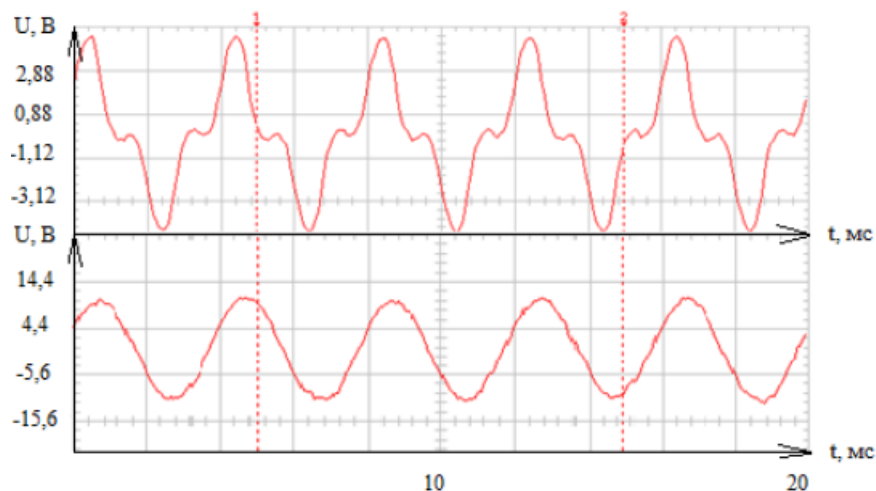


Рисунок 2.10 - Осцилограми напруги на вимірювальній обмотці та фазна напруга

Наприкінці знаходимо вторинну напругу фази b:

$$U_b = 4,44 \times f \times w_2 \times \Phi_\Sigma.$$

В результаті розрахунків визначено, що $U_b = 7,69$ В, що збігається з експериментальними даними.

Аналіз експериментальних досліджень показав, що така конструкція магнітопроводу трансформатора ефективно запобігає виникненню ферорезонансу. Це пояснюється тим, що магнітні потоки нульової послідовності компенсуються внаслідок їх зустрічного напрямку, а індуктивний опір нульової послідовності наближається до нуля, що виключає можливість появи ферорезонансних процесів.

Конструкція має такі переваги: підвищену надійність, зменшені масо-габаритні показники трансформатора, відсутність додаткових опорів і втрат у сталі, а також відсутність конструкційної сталі.

Крім того, зменшується похибка, спричинена проявами ферорезонансу. Форма кривої напруги на вимірювальній та вихідній обмотках відрізняється: у вимірювальній обмотці спостерігається наявність вищих гармонік, тоді як у вихідній вони відсутні. За результатами експерименту встановлено, що вихідна напруга не містить складової нульової послідовності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Виявлено, що після насичення трансформатора з розробленим магнітопроводом напруга на конденсаторі перевищує напругу на затискачах трансформатора. У гармонійному складі при цьому з'являється третя гармонічна складова, а також п'ята та сьома.

Для запобігання ферорезонансним явищам необхідно забезпечити відсутність нульової послідовності у трансформаторі за всіх режимів його роботи. Найбільш ефективним є застосування таких конструкцій, у яких складові нульової послідовності компенсуються, що, у свою чергу, зменшує сумарну індуктивність у стрижнях трансформатора напруги.

У мережах 6 та 10 кВ з комбінованим живленням від енергосистеми, та власних потреб електростанцій, якщо струм замикання на землю перевищує 20 А, при спрацьовуванні релейного захисту для відключення пошкодженої ділянки з однофазним замиканням на землю застосовують резистор у нейтралі мережі з обмеженим часом протікання струму. Значення струму через резистор коливається від десятків до сотень ампер і залежить від типу захисту від однофазного замикання на землю.

Наявність обертових машин є ключовим фактором, оскільки передбачає обов'язкове відключення приєднання з двигуном або генератором, на якому сталося однофазне замикання на землю, і встановлює більш суворі обмеження щодо допустимих величин перенапруги.

Аналіз експериментальних досліджень показав, що конструкція зі стрічковим магнітопроводом трансформатора ефективно запобігає виникненню ферорезонансу. Це пояснюється тим, що магнітні потоки нульової послідовності компенсуються внаслідок їх зустрічного напрямку, а індуктивний опір нульової послідовності наближається до нуля, що виключає можливість появи ферорезонансних процесів.

Конструкція має такі переваги: підвищену надійність, зменшені масо-габаритні показники трансформатора, відсутність додаткових опорів і втрат у сталі, а також відсутність конструкційної сталі.

Крім того, зменшується похибка, спричинена проявами ферорезонансу. Форма кривої напруги на вимірювальній та вихідній обмотках відрізняється: у вимірювальній обмотці спостерігається наявність вищих гармонік, тоді як у вихідній вони відсутні. За результатами експерименту встановлено, що вихідна напруга не містить складової нульової послідовності.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АНТИРЕЗОНАНСНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

3.1. Розробка антирезонансного індуктивного трансформатора напруги

З метою зниження ферорезонансних явищ у проєктні схеми підстанцій вносять зміни, що використовують певний порядок комутацій, застосовують обмежувачі перенапруги [10].

Заходи по боротьбі з ферорезонансними явищами викладені в посібнику із захисту електричних мереж 6–1150 кВ від грозових і внутрішніх перенапруг, де як один з основних заходів боротьби з ферорезонансними явищами пропонується використання антирезонансних трансформаторів напруги.

Ємнісні трансформатори за своєю природою не схильні до виникнення резонансних явищ. Проте, незважаючи на цю перевагу, вони не можуть повністю замінити індуктивні трансформатори напруги.

Під час розроблення індуктивних трансформаторів напруги виробники прагнуть компенсувати зниження робочої індукції магнітопроводу.

Крім того, для поглинання енергії ферорезонансних коливань застосовується комбінація товстолистової конструкційної сталі з електротехнічною сталлю. Унаслідок цього зменшується добротність коливального контуру, а втрати енергії зі зростанням струму під час резонансу збільшуються, що, у свою чергу, сприяє зниженню амплітуди ферорезонансних коливань [11].

Проте можливий і інший підхід до проєктування трансформаторів напруги — використання розімкнутих магнітних сердечників зі стрижневими магнітопроводами. У такій конструкції крива намагнічування магнітної системи стає більш пологою, а сам

трансформатор відзначається компактністю та зручністю в організації внутрішньої високовольтної ізоляції.

Основна складність у розробленні таких трансформаторів полягає у відсутності відповідної методики розрахунку, оскільки визначення конструктивних параметрів і режимів роботи неможливо виконати стандартними методами, які застосовуються для трансформаторів із замкнутими магнітопроводами. У розробленій конструкції магнітне поле має розгалужений характер розсіювання, а головний магнітний потік лише частково проходить через осердя. Застосування наявних інженерних методів розрахунку вимірювальних трансформаторів, які базуються на припущенні, що весь магнітний потік проходить і замикається у феромагнітному сердечнику, призводить до значних похибок у результатах.

Розрахунок трансформатора напруги з розімкненим магнітопроводом має ітераційний характер і передбачає виконання таких основних етапів:

- розрахунок електромагнітного поля, за результатами якого визначаються основні параметри трансформатора — індуктивності, опори та розподіл напруги вздовж обмоток;
- розрахунок електростатичного поля на основі отриманого на попередньому етапі розподілу потенціалів у обмотках трансформатора.

Для виконання таких розрахунків можна використовувати комп'ютерні програми, що ґрунтуються на методі кінцевих елементів, зокрема ANSYS, ELCUT, Comsol Multiphysics. Зазначені програмні пакети дають змогу моделювати електромагнітні, теплові, механічні та інші поля.

Під час побудови комп'ютерної польової моделі як вихідні дані застосовуються геометричні параметри трансформатора, отримані, зокрема, за допомогою програм AutoCAD, а також електричні властивості матеріалів — електропровідність і магнітна проникність.

Забезпечення високовольтної ізоляції здійснюється шляхом секціонування, при цьому кожна секція являє собою стрижневий

трансформатор. Відсутність замкнутого магнітопроводу дає змогу зручно розмістити секції всередині фарфорового ізолятора стандартного трансформатора струму (рис.3.1).

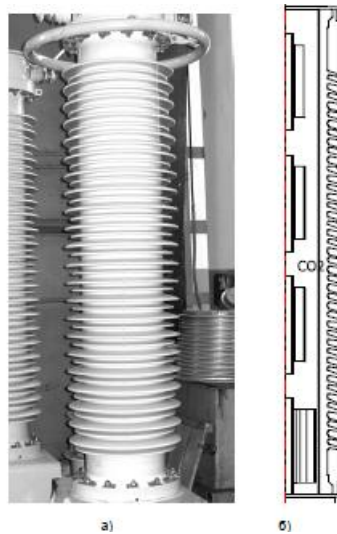


Рисунок 3.1 - Трансформатор напруги (а) і схема розташування секцій усередині трансформатора (б)

Одним із перших етапів створення польової моделі є визначення її геометричних розмірів. Найбільш точне відображення реальної конструкції трансформатора з урахуванням усіх геометричних особливостей забезпечує тривимірна (3D) польова модель. Сучасні програмні засоби дозволяють ефективно виконувати такі розрахунки. Крім того, на етапі попередніх розрахунків застосовується також двовимірне (2D) моделювання, яке є простішим з точки зору геометричного опису моделі та, за однакової кількості кінцевих елементів, потребує менше обчислювальних ресурсів (оперативної пам'яті та продуктивності ЕОМ). Водночас, за інших рівних умов, 2D-моделювання забезпечує вищу точність результатів.

Секції трансформатора розділені ізоляційними проміжками, що, в першому наближенні, дозволяє моделювати кожну секцію окремо. Приклади геометричних моделей секцій у форматах 2D і 3D наведені на рис. 3.2 та 3.3.

Секції трансформатора розділені ізоляційними проміжками, що в першому наближенні дає змогу моделювати кожну секцію окремо. Приклади геометричних моделей секцій у форматах 2D та 3D наведені на рис. 3.2 і 3.3.

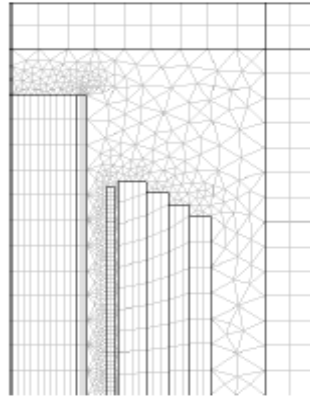


Рисунок 3.2 - 2D-геометрія з мережею кінцевих елементів

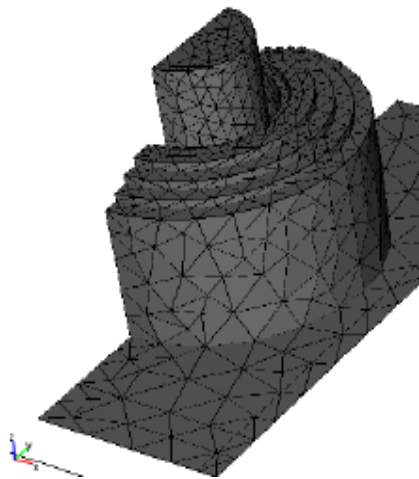


Рисунок 3.3 - 3D-геометрія з мережею кінцевих елементів

Електромагнітне поле теоретично згасає на нескінченності, тому для коректного розв'язання крайової задачі необхідно враховувати максимально можливу просторову область. Проте розширення розрахункової зони неминуче призводить до значного збільшення кількості кінцевих елементів і, відповідно, обчислювальних витрат.

Застосування так званих «нескінченних блоків» на межах розрахункової області (рис.3.2) дає змогу істотно скоротити обсяг простору, що моделюється, без втрати необхідної точності результатів.

У двовимірних моделях використання чотирикутних кінцевих елементів забезпечує підвищену точність обчислень, тоді як у тривимірному моделюванні допустимим є застосування лише елементів із трикутними гранями.

Під час дослідження полів застосовано комплексний підхід, що поєднує обидва методи моделювання. Двовимірне (2D) моделювання забезпечує розв'язання задачі для ідеалізованої вісі-симетричної конструкції, тоді як тривимірне (3D) моделювання дає змогу уточнити результати з урахуванням наявності несиметричних елементів.

На основі отриманих картин магнітних полів (рис.3.4) чисельно визначено власні та взаємні індуктивності котушок трансформатора. Проведене моделювання також дало змогу більш точно оптимізувати розподіл витків котушок по шарах, виходячи з величини ЕРС електромагнітної індукції, що припадає на один виток. Розподіл ЕРС зображено на рис. 3.5.

Найбільш доцільним є розміщення витків у центральній частині котушки, оскільки саме тут спостерігаються найсприятливіші умови для формування ЕРС. Тому крайні витки доцільно змістити до центру, збільшуючи радіальний розмір котушки до максимально можливого — аж до меж ізолятора.

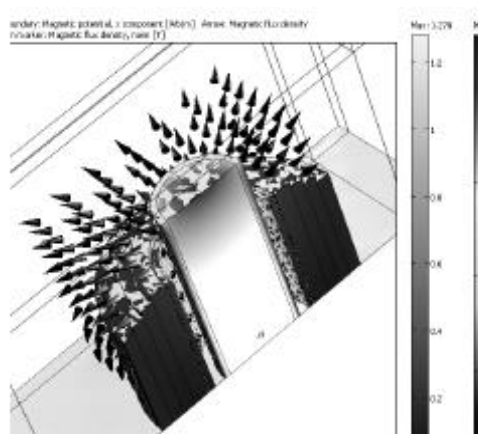


Рисунок 3.4 - Розподіл індукції магнітного поля в 3D-геометрії

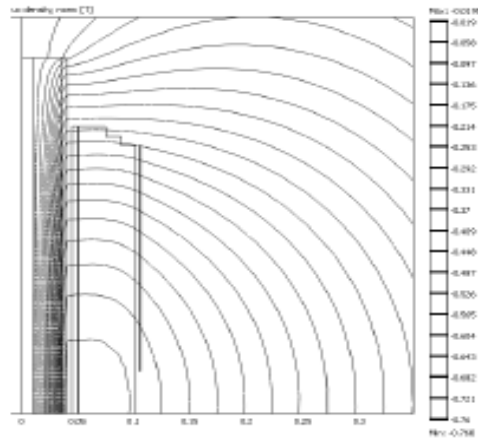


Рисунок 3.5 - Розподіл ЕРС електромагнітної індукції на один виток трансформатора

Проте більш ефективним виявилось схемне технічне моделювання із використанням програм Simulink та SimPowerSystem, оскільки такий підхід дає змогу зручно змінювати як параметри котушок, так і конфігурацію їх з'єднань (рис.3.6).

Одним із ключових етапів під час розроблення трансформатора є оптимізація конструкції за допустимою напруженістю електричного поля. З цією метою в програмному середовищі Comsol було виконано розрахунок електричного поля на основі попереднього моделювання напруги в обмотках, отриманої під час аналізу магнітного та квазістатичного електромагнітного поля.

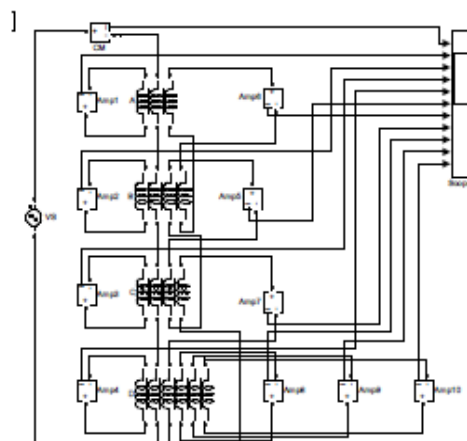


Рисунок 3.6 - Моделювання трансформатора у програмах Simulink та SimPowerSystem

Окрім зазначених аспектів, необхідно також виконати моделювання роботи трансформатора в перехідних режимах із урахуванням дії імпульсної перенапруги та розробити заходи, спрямовані на запобігання можливому пошкодженню обмоток трансформатора під впливом таких імпульсів.

3.2. Ефективність використання антирезонансних трансформаторів напруги в мережі 6 – 35 кВ

Електроустановки напругою 6–35 кВ в Україні, як правило, працюють з ізольованою нейтраллю, при цьому нейтраль трансформатора напруги підлягає заземленню. Ферорезонансні явища в таких мережах можуть виникати лише в нульовій послідовності, коли в резонанс входить уся система в цілому.

У разі пошкодження ізоляції однієї з фаз мережі виникає повне або часткове замикання фази на землю, унаслідок чого на відповідних виводах трансформатора напруги з'являється контрольна напруга. Вона формується під дією напруги нульової послідовності (U_0), що виникає у фазах трансформатора напруги. Ця напруга зумовлює появу струму нульової послідовності, який замикається через заземлювальний провід трансформатора напруги, ємності лінійних проводів відносно землі та далі проходить через обмотки самого трансформатора.

За певних співвідношень між параметрами нелінійної індуктивності трансформатора напруги та ємності лінійних проводів у цьому контурі може виникнути ферорезонанс. Унаслідок цього струм у контурі та фазні напруги мережі багаторазово зростають, тоді як міжфазні напруги залишаються незмінними. Такий процес може спричинити вихід трансформатора з ладу, пошкодження ізоляції мережі та розвиток аварійної ситуації.

Висока частота пошкоджень заземлених трансформаторів напруги стала основною причиною переходу до використання антирезонансних

трансформаторів напруги. Такі пристрої покликані не лише повністю зберегти функціональні можливості традиційних трансформаторів, але й відповідати сучасним вимогам експлуатаційної надійності та електромагнітної стійкості.

Антирезонансні трансформатори напруги, призначені для роботи в електричних мережах напругою 6–35 кВ, мають відповідати таким вимогам:

- забезпечувати відсутність умов для виникнення ферорезонансних процесів у нормальних та аварійних режимах роботи;

- зберігати працездатність у разі тривалих дугових замикань фази на землю, у тому числі при багаторазовому перериванні дуги;

- витримувати вплив стійкого ферорезонансу, який може виникати внаслідок взаємодії ємнісних елементів мережі з нелінійними індуктивностями інших трансформаторів напруги, без пошкодження ізоляції чи зниження метрологічних характеристик.

Таким чином, антирезонансні трансформатори є більш надійним і стійким рішенням для сучасних розподільних мереж, що підвищує рівень їх експлуатаційної безпеки та довговічності.

Необхідні характеристики всіх зазначених трансформаторів напруги забезпечуються шляхом підключення між нейтральною точкою обмотки та землею додаткового трансформатора нульової послідовності (ТНП) або великого активного опору.

Розглянемо приклад конструкції антирезонансних трансформаторів типів НАМІ та НТМІ. Кожен із цих трансформаторів поєднує у своєму корпусі два пристрої — трифазний і однофазний трансформатори. На рис.3.7 показано схему з'єднання їхніх обмоток.

На відміну від звичайних трансформаторів напруги, у цих моделях застосовується тристрижневий магнітопровід, що підвищує електромагнітну стабільність. Для вимірювання напруги нульової послідовності ($3U_0$) використовується додатковий трансформатор,

підключений у нейтраль обмоток високої напруги, який виконує функцію баластного опору. Крім того, у конструкції передбачена окрема компенсаційна обмотка, замкнена накоротко, яка забезпечує стабільну роботу трансформатора та запобігає виникненню ферорезонансних процесів.

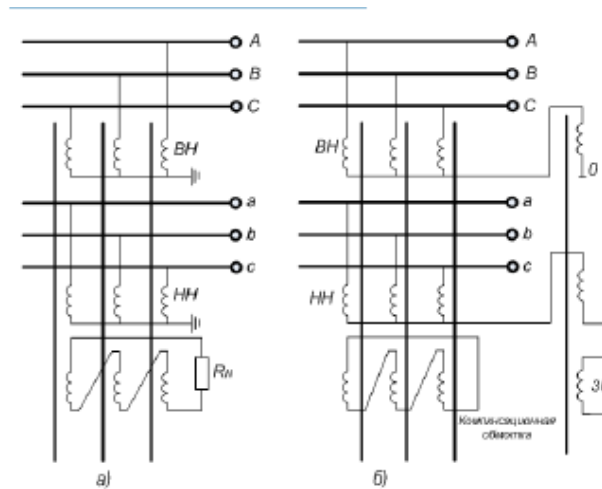


Рисунок 3.7 - Схеми з'єднання обмоток трансформатора напруги типу НТМІ (а) та НАМІ (б)

Оскільки в контурі нульової послідовності відсутні нелінійні елементи, виникнення в ньому стійких коливальних процесів, зокрема ферорезонансу, є неможливим [11].

На практиці трансформатори напруги типу НАМІ відзначаються високою стійкістю до дугових замикань, що перериваються. Така властивість зумовлена наявністю в їхній конструкції додаткового трансформатора нульової послідовності, який характеризується значним реактивним опором (у межах 300...600 кОм) і майже лінійною характеристикою намагнічування.

Крім того, важливою перевагою трансформаторів цього типу є їхня повна «пасивність» — конструкція не містить релейних елементів або пристроїв, необхідних для роботи антирезонансних трансформаторів струму.

Показовим прикладом можуть слугувати дослідження процесів, що супроводжують однофазне замикання на землю в одній із секцій мережі власних потреб 6 кВ ТЕЦ.

Секції трансформатора розділені ізоляційними проміжками, що, в першому наближенні, дозволяє моделювати кожну секцію окремо. У трансформаторі напруги типу НАМІ умови для виникнення ферорезонансу відсутні, оскільки компенсаційна обмотка ефективно шунтує нелінійну індуктивність трансформатора в контурі нульової послідовності.

Під час появи напруги нульової послідовності на ємностях мережі (у разі однофазного замикання на землю) відбувається їх розряд через компенсаційну обмотку. Унаслідок цього у фазах трансформатора формується характерний загасаючий коливальний процес (рис. 3., б).

Струми у всіх фазах практично однакові, оскільки намагнічувальні струми трансформатора накладаються на значний струм нульової послідовності.

Зі збільшенням кількості трансформаторів напруги типу НАМІ підвищується потужність шунта нульової послідовності, проте одночасно зменшується еквівалентний опір компенсаційної обмотки.

Таким чином, можливість виникнення ферорезонансних процесів у трансформаторах типу НАМІ повністю виключається навіть за умов їх паралельної роботи.

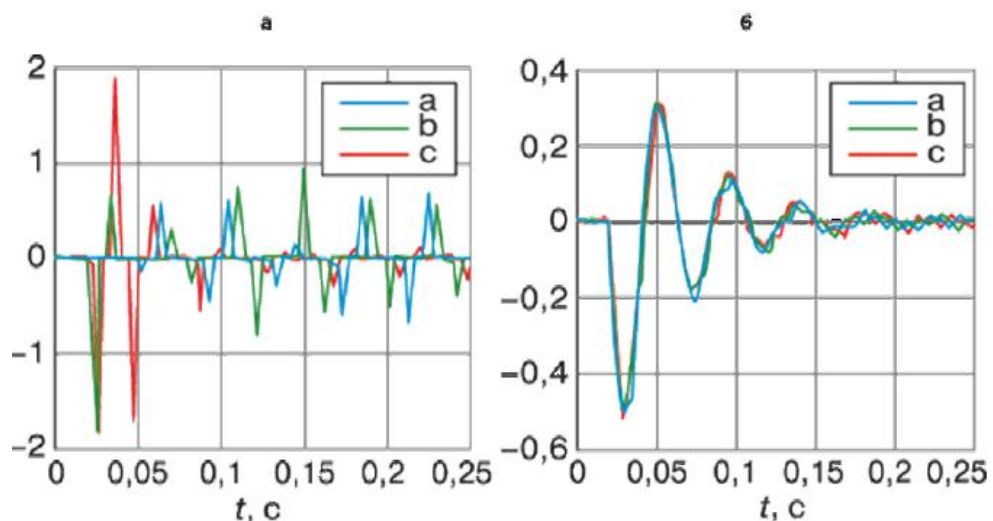


Рисунок 3.8 - Струми у фазах обмотки високої напруги трансформатора напруги при ОДЗ на секції СВП 6 кВ ТЕЦ (3 Сф = 3 мкФ) типу НТМІ (а) та НАМІ (б)

Окрім масляних трансформаторів напруги, вітчизняна промисловість випускає також литі трифазні групи трансформаторів типу ЗНОЛ, розраховані на напругу 6–10 кВ.

Антирезонансні властивості таких трансформаторів забезпечуються встановленням додаткового резистора опором 800–1000 Ом у нейтралі первинної обмотки.

Використання литої ізоляції суттєво покращує експлуатаційні характеристики пристрою, підвищуючи його механічну міцність і стійкість до впливу навколишнього середовища. Однак через недосконалість схеми з'єднання обмоток ці трансформатори не відзначаються достатньою надійністю в роботі.

Проте в процесі експлуатації було виявлено низку недоліків зазначених трансформаторів напруги.

Зокрема, вони можуть проявляти схильність до явища «хибної землі» в мережах із дуже малою ємністю відносно землі.

Суттєвим недоліком трансформатора типу НАМІ є також розташування компенсаційної обмотки всередині корпусу, що унеможливорює перевірку стану її ізоляції під час обслуговування.

Крім того, використання масляної ізоляції обмежує сферу застосування таких трансформаторів, особливо в установках, де висуваються підвищені вимоги до пожежної безпеки та екологічності.

Застосування антирезонансних трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю дає змогу істотно підвищити енергоефективність системи та скоротити витрати, що виникають через пошкодження звичайних трансформаторів напруги під дією ферорезонансних процесів.

Однак повністю усунути проблеми, пов'язані з роботою електромагнітних трансформаторів струму в таких мережах, наразі ще не вдається.

Необхідно об'єднати найкращі технічні рішення та експлуатаційні переваги всіх існуючих типів антирезонансних трансформаторів струму в єдину, удосконалену конструкцію.

Метою такого підходу є створення нових, пожежобезпечних, цілком литих антирезонансних трансформаторів напруги, розрахованих на діапазон напруги від 3 до 35 кВ.

Під час проектування нових моделей особливу увагу слід приділити підвищенню їхньої довговічності, механічної надійності та термостійкості, а також забезпеченню стабільної роботи в умовах дії різних типів ферорезонансних процесів.

Такі трансформатори мають зберігати працездатність за всіх можливих режимів експлуатації, включно з аварійними, і бути повністю захищеними від ферорезонансних явищ, які зазвичай призводять до пошкодження звичайних електромагнітних трансформаторів.

Розробка подібних пристроїв сприятиме підвищенню надійності енергосистем, зменшенню експлуатаційних витрат і підвищенню рівня електробезпеки в мережах середньої напруги.

3.3. Дослідження резонансних перенапруг у вимірювальному трансформаторі та в електроустановках

Будь-яка система електропостачання (СЕР) містить елементи індуктивності з феромагнітними сердечниками та ємнісні компоненти. Взаємодія цих елементів створює умови для утворення коливальних (резонансних) контурів, у яких за певних режимів може розвиватися ферорезонанс. Ферорезонансний процес виникає тоді, коли індуктивний і ємнісний опори взаємно компенсуються в коливальному контурі на фоні магнітного насичення сердечника індуктивності. Насичення змінює

індуктивність елементу і може призвести до різких нелінійних змін напруги та струму, нестійких режимів роботи та підвищеного ризику пошкоджень апаратури. Виявлення і запобігання ферорезонансу вимагає аналізу параметрів контуру, режимів навантаження та характеристик магнітної сталі, а також застосування конструкторських і експлуатаційних заходів для зменшення ймовірності його виникнення.

Під час виникнення ферорезонансних процесів (ФП) у елементах системи електропостачання спостерігаються перенапруги, що можуть спричиняти їх пошкодження або повний вихід з ладу. У науковій літературі наведено значну кількість досліджень, присвячених аналізу умов формування ферорезонансних контурів у системах електропостачання, механізм розвитку цих процесів та їх наслідкам. На основі отриманих результатів запропоновано широкий спектр технічних і організаційних заходів, спрямованих на запобігання виникненню ферорезонансних явищ і мінімізацію їх негативного впливу на роботу електроенергетичного обладнання.

Нині одним із перспективних напрямів розвитку систем електропостачання є інтеграція об'єктів розподіленої генерації (РГ) у розподільні мережі та мережі внутрішнього електропостачання підприємств [12]. У подібних системах джерела розподіленої генерації розміщуються безпосередньо поблизу вузлів навантаження, що забезпечує підвищення ефективності енергопостачання та зниження втрат електроенергії. Потужність таких об'єктів, як правило, не перевищує 25 МВт.

Основними перевагами СЕП з розподіленою генерацією є зниження втрат електроенергії під час передавання, можливість формування локальних (автономних) енергосистем, а також гнучкість у використанні різних доступних видів енергоресурсів для виробництва електроенергії. Такі системи забезпечують умови для переходу до острівного (автономного) режиму роботи, підвищуючи надійність та стійкість

електропостачання при виникненні аварійного режиму роботи мережі, що прилягає, компенсації дефіциту потужності у вузлах навантаження, тощо.

Пристрої та мережі з розподіленою генерацією схильні до суттєвих відхилень напруги й частоти від номінальних значень під впливом великих збурень режиму роботи. Причинами таких відхилень можуть бути різкі зміни генерації або навантаження (наприклад, відключення генератора чи пуск потужного споживача), асиметрія і гармонійні складові струмів, локальні явища «острівного» режиму (islanding), а також недостатня регульовальна здатність джерел РГ при компенсуванні короточасних коливань.

Наслідки перевищення допустимих відхилень включають погіршення якості електроенергії, підвищений ризик синхронних збоїв і пошкоджень устаткування, зростання втрат і потенційні проблеми з живленням критичних споживачів.

Заходи для зниження цих ризиків охоплюють як апаратні, так і алгоритмічні рішення: впровадження систем автоматичного регулювання напруги (АРВ) та частоти, використання режимів розподіленого регулювання (droop-керування), інтеграцію систем накопичення енергії для згладжування короточасних флуктуацій, застосування активних фільтрів та компенсаторів для зменшення гармонік і асиметричних режимів, а також розвиток засобів координації й керування між локальними джерелами і центральною системою.

У випадку застосування установок генерації, що працюють на базі двигунів внутрішнього згоряння або турбогенераторних установок (ТГУ) з вільною силовою турбіною, спостерігається знижена режимна стійкість. Це зумовлено порівняно малими значеннями постійних інерції зазначених установок [13], які обмежують їх здатність ефективно протидіяти швидким змінам навантаження та підтримувати стабільність частоти й напруги в електричній мережі. Під час використання альтернативних джерел енергії на режимну стійкість систем електропостачання істотно впливають

стохастичний характер генерації та технічні параметри систем накопичення енергії. Змінність погодних умов, рівня сонячного випромінювання чи швидкості вітру призводить до непередбачуваних коливань виробітку потужності, що ускладнює підтримання стабільності режиму.

Крім того, у системах електропостачання з розподіленою генерацією через безпосередню близькість джерел генерації до споживачів істотно зростає вплив струмів короткого замикання на роботу установок генерації, що може призводити до порушення їх нормального режиму, появи перенавантажень та підвищення ризику аварійних ситуацій.

Таким чином, у системах електропостачання з розподіленою генерацією існує підвищена ймовірність виникнення ферорезонансних процесів, що зумовлено значними збуреннями в режимах роботи як установок генерації, так і самої електричної мережі. Такі збурення можуть призводити до нелінійних коливань напруги, появи перенапруги та втрати стійкості окремих елементів системи.

Проблема виникнення ферорезонансних процесів у системах електропостачання з розподіленою генерацією досі залишається недостатньо вивченою. Разом із тим, узагальнення та систематизація наявних даних про ФП у системах централізованого електропостачання дозволяє сформулювати певне уявлення про особливості розвитку ферорезонансних явищ і потенційні ризики їх виникнення в СЕП з РГ.

В якості об'єкта дослідження вибрано електроустановки з номінальною напругою 6–220 кВ. Такий вибір пояснюється специфікою систем розподіленої генерації, які не включають системоутворювальні мережі, а потужність окремих електростанцій у цих системах, як правило, не перевищує 25 МВт. Це дозволяє зосередити дослідження на локальних генераторних установках і їх взаємодії з розподільними мережами без врахування великих централізованих джерел.

У зв'язку з викладеним, метою даного розділу роботи є систематизація та узагальнення існуючих теоретичних та експериментальних досліджень ферорезонансної перенапруги у електроустановках напругою 6–220 кВ. Це дозволяє комплексно оцінити природу явищ, умови їх виникнення та наслідки для експлуатації електроенергетичного обладнання.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати фізичну природу ферорезонансних процесів;
- дослідити схематично-режимні умови виникнення ФП та розглянути заходи з їх запобігання в мережах середньої та високої напруги систем централізованого електропостачання;
- систематизувати основні випадки розвитку ФП у системах централізованого електропостачання на основі результатів експериментальних досліджень.

Розглянемо коливальний контур і процес виникнення резонансу в ньому з позицій радіотехніки. Найбільш простий коливальний контур складається з послідовного або паралельного з'єднання двох реактивних елементів протилежного типу: індуктивного опору X_L та ємнісного опору X_C .

Реактивний опір індуктивності X_L зростає прямо пропорційно до її індуктивності та частоти коливань. Натомість реактивний опір конденсатора X_C змінюється обернено пропорційно до його ємності та частоти сигналу.

Резонансна частота коливального контуру f_0 (як для паралельного, так і для послідовного з'єднання реактивних елементів) настає у момент, коли реактивні опори індуктивності X_L та конденсатора X_C стають рівними. Визначається вона за формулою Томсона.

Якщо індуктивний опір у коливальному контурі є лінійним, то за незмінного значення ємнісного опору $X_C = \text{const}$ резонансна частота f_0

приймає єдине визначене значення. На рисунку 3.9 наведено графічне представлення умов виникнення резонансу.

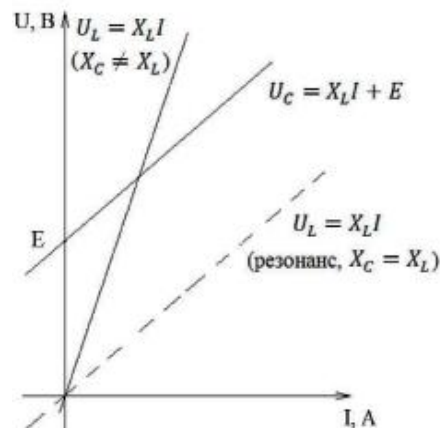


Рисунок 3.9 – Умови виникнення резонансу

де: U_L — напруга на котушці індуктивності; X_L — індуктивний опір; I — струм у контурі; X_C — ємнісний опір; U_C — напруга на конденсаторі; E — напруга джерела живлення.

Резонансу відповідає ситуація, коли прямі напруги на конденсаторі U_C та на котушці індуктивності U_L є паралельними, тобто їхні кутові коефіцієнти (відповідно X_L та X_C) рівні між собою.

Ферорезонанс проявляється у випадку нелінійної індуктивності, у якій індуктивний опір X_L залежить не лише від частоти, але й від магнітної індукції в сердечнику. Нелінійні властивості індуктивності обумовлені характеристиками феромагнітного матеріалу сердечника. Крива насичення такої індуктивності включає як лінійні, так і криволінійні ділянки, що ілюструється на рисунку 3.10.

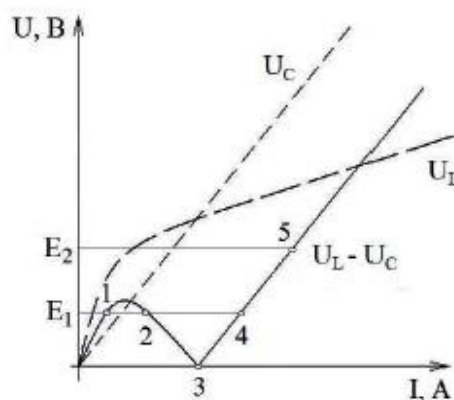


Рисунок 3.10 - Графічне рішення умов виникнення резонансу в послідовному коливальному контурі з нелінійною індуктивністю

де: U_C — напруга на конденсаторі; U_L — напруга на котушці індуктивності; E_1 і E_2 — напруги джерела живлення.

Графік вольт-амперних характеристик реактивних елементів, представлений на рисунку 3.10, умовно поділяється на дві області: індуктивну, де напруга на індуктивності перевищує напругу на конденсаторі, та ємнісну, де навпаки напруга на конденсаторі більша за напругу на індуктивності. Межа розділу зазначених областей (позначена як 3) відповідає точці резонансу напруг при частоті f_0 . Для певного значення напруги джерела живлення E_1 можливі три робочі точки контуру — 1, 2 та 4. У точці 1 ферорезонанс у коливальному контурі не виникає, оскільки робоча точка знаходиться в індуктивній області, де напруга на індуктивності перевищує напругу на конденсаторі. Точка 2 відповідає нестійкому стану контуру. Режим ферорезонансу виникає при переході з індуктивної області в ємнісну, що спостерігається в точці 4, і значною мірою залежить від початкових умов: залишкового магнітного потоку в магнітопроводі індуктивного елемента, величини заряду конденсатора, напруги джерела живлення та моменту включення системи. Режим ферорезонансу характеризується високою стійкістю за умови, що джерело живлення має достатню потужність для підтримання режиму насичення магнітопроводу індуктивного елемента.

Існує декілька типів режимів ферорезонансу [14], кожен із яких має свої характерні особливості та прояви в коливальному контурі:

1. Основний режим ферорезонансу.

При цьому режимі спостерігається значне спотворення форм кривих струму та напруги в контурі. Період коливань збігається з періодом джерела живлення, тобто коливання синхронізовані з мережею. Спектр сигналу містить як основну складову (гармоніку першого порядку), так і

додаткові гармоніки високих порядків, що зумовлено нелінійністю індуктивного елемента.

Фазовий портрет системи є замкненим, що вказує на стійкий характер коливань у межах певного режиму. Перетин Пуанкаре містить лише одну точку, демонструючи періодичність та відсутність складних хаотичних коливань у цьому режимі.

2. Субгармонічний режим ферорезонансу.

У цьому режимі період коливань T_s є кратним основному періоду джерела живлення, тобто $T_s = nT$, де (n) — ціле число, що визначає порядок субгармоніки. Внаслідок цього спектр сигналу містить основну моду f/n та додаткові гармоніки, що формуються внаслідок нелінійності індуктивного елемента та взаємодії з ємнісними компонентами контуру.¹

Фазовий портрет системи залишається замкненим, проте складається з n окремих траєкторій, що відображає мультиперіодичний характер коливань. Відповідно, перетин Пуанкаре включає n точок, що дозволяє візуально оцінити кратність циклів і складність субгармонічного режиму.

Субгармонічний режим ферорезонансу є більш складним і потенційно небезпечним порівняно з основним, оскільки призводить до більш інтенсивних коливань напруги та струму, здатних перевищувати допустимі значення і підвищувати ризик пошкодження елементів електроустановки.

3. Квазіперіодичний режим ферорезонансу.

У цьому режимі коливання є неперіодичними, тобто вони не повторюються точно через фіксовані проміжки часу. Водночас спектр сигналу не є суцільним — він містить окремі дискретні частотні складові, що відображає наявність взаємодії декількох гармонік із різними коефіцієнтами амплітуди.

На карті Пуанкаре спостерігається кілька точок, які утворюють замкнуті витки, що свідчить про певну впорядкованість у неперіодичних коливаннях. Фазовий портрет системи характеризується змінними траєкторіями, що відображають складну динаміку контуру і наявність

мультигармонічних взаємодій між індуктивними та ємнісними елементами.

Квазіперіодичний режим ферорезонансу є проміжним між періодичним і хаотичним, і його наявність може ускладнювати прогнозування та контроль напруги й струму в електроустановках, підвищуючи ризик локальних перенавантажень та пошкоджень обладнання.

4. Хаотичний режим ферорезонансу.

У хаотичному режимі коливання набувають непередбачуваного, нерегулярного характеру, що ускладнює їх прогнозування та аналіз. Спектр сигналу стає безперервним, відображаючи широкий діапазон частот, що виникають у результаті нелінійної взаємодії індуктивних та ємнісних елементів коливального контуру.

Фазовий портрет системи формує так званий дивний атрактор, що демонструє складну, нестійку динаміку коливань. На карті Пуанкаре точки розташовані хаотично, без повторюваних закономірностей, що свідчить про мультифакторну та непередбачувану природу процесу.

Хаотичний режим ферорезонансу є найнебезпечнішим серед усіх режимів, оскільки може призводити до різких стрибків напруги і струму, перевищення допустимих значень електричних параметрів і, як наслідок, до пошкодження обладнання та порушення нормальної роботи електроустановки. Контроль і запобігання цьому режиму вимагають застосування комплексних заходів захисту, включаючи системи активного управління, фільтри та адаптивні компенсатори.

Варто виділити основні умови виникнення ферорезонансу. У коливальному контурі з нелінійною індуктивністю, коли напруга джерела живлення досягає високого значення E_2 (рис.3. 10), можливий лише режим ферорезонансу (точка 5). Це пояснюється тим, що сердечник дроселя або трансформатора перебуває у стані насичення, що призводить до різкої нелінійності індуктивності та створює умови для підтримки

ферорезонансних коливань. Для заданих значень частоти та індуктивності ферорезонанс у коливальному контурі може виникати при досить широкому діапазоні ємностей. У випадку, коли магнітний ланцюг дроселя або трансформатора характеризується низькими втратами, ймовірність переходу системи в режим ферорезонансу значно зростає.

Схемно-режимні умови виникнення ферорезонансу та заходи щодо їх запобігання.

Розглянемо умовно-схемні та режимні фактори, що визначають виникнення ферорезонансних процесів. Для формування ФП у системі електропостачання необхідна наявність коливального контуру, який включає ємнісний елемент та нелінійну індуктивність. Крім того, для переходу контуру в режим ферорезонансу потрібні збурення режиму роботи мережі, достатні для насичення магнітопроводу індуктивного елемента.

До таких збурень можуть належати: раптове підключення або відключення великих навантажень, пуск або зупинка генераторних установок, короткі замикання, а також коливання напруги джерела живлення. Наявність цих факторів створює умови для переходу системи в нелінійний режим, у якому індуктивний опір змінюється внаслідок насичення сердечника, а компенсаторні ефекти ємності сприяють розвитку коливань з високою амплітудою.

Заходи щодо запобігання виникненню ФП включають:

- ✓ оптимальний вибір параметрів індуктивності та ємності для запобігання утворенню резонансних контурів;
- ✓ введення додаткових демпфуючих елементів, таких як резистори або активні фільтри;
- ✓ застосування систем автоматичного регулювання напруги і частоти;
- ✓ контроль та обмеження рівнів короточасних збурень мережі;
- ✓ координацію роботи розподілених джерел генерації для зменшення локальних коливань і перенапруги.

Такі заходи дозволяють знизити ймовірність виникнення ферорезонансних режимів і забезпечити стабільну та безпечну роботу електроустановок.

У системах електропостачання до нелінійних індуктивних елементів, здатних брати участь у формуванні коливального контуру, належать трансформатори напруги, силові трансформатори та шунтуючі реактори. У якості ємнісних складових контуру можуть виступати лінії електропередачі, системи шин, батареї конденсаторів (установки поздовжньої та поперечної компенсації), а також шунтуючі конденсатори вимикачів. Таке поєднання індуктивних та ємнісних елементів створює умови для розвитку коливальних процесів і, за певних режимів роботи, може призвести до виникнення ферорезонансу.

До нормативних або аварійних збурень режиму роботи СЕП, які можуть призвести до збурень, здатних ініціювати ферорезонанс у коливальному контурі з нелінійною індуктивністю та насиченим сердечником, належать:

- грозові перенапруги;
- оперативні перемикання на підстанціях;
- короткі замикання на лініях електропередачі;
- виникнення неповнофазних включень ділянок мережі;
- коливання величини навантаження споживачів.

Ці фактори створюють додаткові збурення режиму, що можуть призводити до значних коливань напруги та струму в контурі.

Розглянемо заходи щодо запобігання ферорезонансним процесам. ФП є аварійним режимом роботи електроустановки, який потребує своєчасного виявлення та усунення. На практиці для виявлення ФП у системі електропостачання можна орієнтуватися на такі ознаки:

- виникнення перенапруги або надструму у прилеглий мережі;
- стійке спотворення синусоїдальної форми кривої напруги;

- акустичний шум, що зумовлений магнітострикційними деформаціями магнітопроводу трансформатора або дроселя;
- підвищення температури трансформатора або дроселя;
- мерехтіння освітлення (флікер), що свідчить про коливання напруги;
- пробої ізоляції обмоток трансформатора або дроселя;
- помилкові спрацювання релейного захисту та автоматичних систем управління.

Виявлення цих ознак дозволяє оперативно реагувати на розвиток ферорезонансного режиму та застосовувати відповідні заходи для його придушення і захисту обладнання.

Заходи щодо запобігання ФП поділяють на апаратні та оперативні. Заходи щодо запобігання ФП в електроустановках 6–220 кВ детально описані в ДСТУ 56947007-29.240.10.191-2018. На підставі даного документу у вигляді таблиць зіставлені ферорезонансні коливальні контури, причини виникнення ФП та заходи щодо захисту від ФП (таблиці 3.1, 3.2).

З таблиці 3.1 видно, що незмінним індуктивним елементом ферорезонансного коливального контуру в електроустановках 6–35 кВ є ТН та основним методом боротьби з ФП є використання ТН з антирезонансною конструкцією. Виняток становить випадок формування несиметричної схеми мережі, коли у ФП бере участь силовий трансформатор. При цьому для захисту від виникнення ФП забороняються пофазні оперативні перемикання на ПЛ та КЛ, а для виключення ймовірності обриву фази силові ТР не повинні підключатися через плавкі вставки.

Таблиця 3.1 - Ферорезонансні перенапруги в електроустановках 6–35 кВ

Вид ФП	Ферорезонансни	Причина ФП	Заходи з захисту від
--------	----------------	------------	----------------------

	й коливальний контур		ФП
Мимовільне усунення нейтралі («хибна земля»)	Індуктивність ТН, ємність мережі (елементи мережі не пошкоджуються)	Різночасність включення фаз вимикача під час комутації мережі	1. Антирезонансні ТН. 2. Встановлення резистора у вторинну обмотку ТН. 3. Встановлення резистора у разімкнутий трикутник додаткової обмотки ТН.
Субгармонічний	Індуктивність ТН, ємність короткої лінії (ушкодження ТН)	Відповідність субгармоніки резонансній частоті контуру	Антирезонансні ТН.
ОДЗ через дугу	Індуктивність ТН, ємність мережі	Переміжна дуга призводить до насичення магнітопроводу у ТН	1. Антирезонансні ТН. 2. Встановлення резистора у разомкнутий трикутник додаткової обмотки ТН
Несиметрична схема мережі	Індуктивність T_r , ємність мережі (ушкоджено: ТН)	Неповнофазний режим (обрив проводів ПЛ, неповнофазні комутації вимикачів, перегорання запобіжників)	1. Антирезонансні ТН. 2. Забороняються пофазні включення/відключення ПЛ та КЛ. 3. Небажані підключення T_r через плавкі вставки.

Таблиця 3.2 - Ферорезонансні перенапруги в електроустановках 110-220 кВ

Ферорезонансний коливальний контур	Причина ФП	Заходи із захисту від ФП
ВЛ, слабо навантажений-ний T_r із розземленою нейтраллю та замкненою	Неповнофазна комутація ПЛ або обрив проводів (обриваний провід не торкається землі)	1. Якщо T_r підключені без вимикачів, заземлювати нейтраль хоча б одного з них. 2. Якщо T_r підключений до магістральної ПЛ через вимикач з уставкою по

В трикутник обмоткою		струму, то його нейтраль може бути заземлена 3. На ПС з Тр із вимикачем та розземленою нейтраллю використовувати РЗА, що діє на відключення вимикача.
ВЛ, ШЛ	ОАПВ ВЛ після погасання струму підживлення та компенсації реактивної потужності біля 100%	1.Встановлення КР у нейтралях ШР (компенсація міжфазних ємностей). 2. Відключення групи ШР або однієї фази ШР на час безструмової паузи ОАПВ. 3. Використання адаптивного ОАПВ
ВЛ, ШЛ	Відключення ПЛ та її взаємоіндукція із сусідніми підключеними ПЛ	Установка КР у нейтралях ШР
ТН РП 220 кВ, шини, ВЛ	Оперативні перемикання на шинах підстанції	1. Антирезонансний ТН. 2. Тр, що приєднується до шин, що відключаються, повинен мати заземлену нейтраль. 3. Заборона відключення Тр або АТ, у якого відключена напруга з боку обмоток суміжної напруги. 4. Заборона на відключення ПЛ, що відходить від шин РП або КРПЕ та відключеної з протилежної сторони. 5.Використання конденсаторів зв'язку для зміни ємності системи шин.

У ферорезонансному коливальному контурі електроустановок напругою 6–35 кВ ємнісним елементом виступає ємність прилеглої мережі. Основними причинами виникнення ферорезонансних процесів у таких установках є робота мережі в неповнофазному режимі, несинхронне ввімкнення фаз вимикачів під час комутацій, а також збіг субгармонічної складової з резонансною частотою контуру.

До апаратних заходів, що дають змогу запобігти виникненню будь-яких видів ферорезонансних процесів в електроустановках напругою 6–35 кВ, належать:

- заземлення нейтралі мережі через високоомний резистор, опір якого перевищує ємнісний опір мережі;
- заземлення нейтралі через дугогасний реактор (ДГР) у разі, якщо ємнісний струм замикання на землю становить 10 А і більше.

З таблиці 3.2 видно, що в електроустановках 110–220 кВ індуктивним елементом ферорезонансного контуру є шунтуючий реактор, вимірювальний або силовий трансформатор, у якості ємнісного елемента ферорезонансного коливального контуру виступає ПЛ, система шин, шунтуючі конденсатори багаторозривних вимикачів.

Причинами виникнення ферорезонансних процесів в електроустановках напругою 110–220 кВ є робота мережі в неповнофазному режимі, взаємодія між відключеними та підключеними повітряними лініями, а також оперативні перемикання на шинах підстанцій. Апаратні заходи захисту від ферорезонансу в таких установках спрямовані на зміну ємності або індуктивності елементів мережі, які можуть брати участь у формуванні ферорезонансного коливального контуру.

Для зміни ємнісних характеристик шинної системи застосовують конденсатори зв'язку, що дозволяють коригувати загальну ємність мережі й тим самим порушувати умови формування ферорезонансного контуру. Щоб уникнути залучення силового трансформатора до ферорезонансних процесів, його нейтраль повинна бути надійно заземлена; крім того, доцільно передбачити автоматичне відключення трансформатора засобами РЗА у разі виникнення небезпечних режимів.

В електричних мережах напругою 6–35 кВ з ізолюваною нейтраллю роль нелінійного індуктивного елемента ферорезонансного коливального контуру виконують силові трансформатори 6(10)/0,4 кВ. Ємнісним

елементом цього контуру є розгалужена розподільча мережа зовнішньої електросистеми, ємність якої зазвичай становить 0,5–5 мкФ.

Експериментальні дослідження показали, що при обриві однієї з фаз на стороні зовнішньої електросистеми та за умови малого навантаження споживача можливе виникнення стійкого ферорезонансного процесу з прямим або зворотним чергуванням фаз у силовому трансформаторі. Також зазначено, що за ФП величина напруги на пошкодженій фазі може перевищувати номінальне значення в 2,2 рази або в 3,8 рази.

Ферорезонансний коливальний контур утворений трансформатором напруги ТН1 та еквівалентною ємністю повітряної лінії представлений на рис. 3.10.

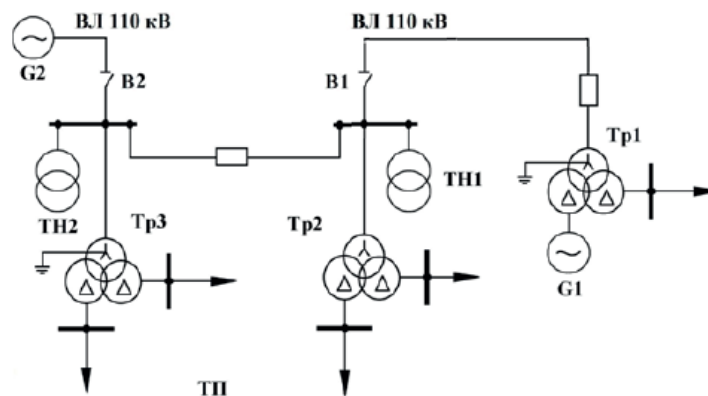


Рисунок 3.10 - Схема ділянки мережі з ферорезонансним коливальним контуром

Причиною виникнення ферорезонансного процесу стало неповнофазне ввімкнення ділянки повітряної лінії 110 кВ між силовими трансформаторами Тр1 і Тр2 за допомогою вимикача В1. Крім того, у дослідженні теоретично та експериментально підтверджено можливість виникнення ферорезонансу за участю силового трансформатора Тр2 трансформаторної підстанції (ТП).

Умовою виникнення такого ферорезонансного процесу є переважання ємнісного опору прилеглої мережі над індуктивним опором обмотки високої напруги трансформатора Тр2, що стає можливим у разі насичення його магнітної системи. У мережах із заземленою нейтраллю

ферорезонансні явища також можуть виникати внаслідок оперативних переключень на шинах розподільних пристроїв. Нижче наведено детальний опис випадку ферорезонансу, у якому брав участь трансформатор напруги, — проаналізовано умови його виникнення, механізми розвитку та наслідки для апаратури.

Ферорезонансний процес було ініційовано виведенням однієї з шин у ремонт шляхом відключення повітряних вимикачів В1–В3. Коливальний контур, що зумовив ферорезонанс, утворювався шунтуючими конденсаторами С1–С3 вимикачів у поєднанні з первинною обмоткою трансформатора напруги ТН (рис.3.11).

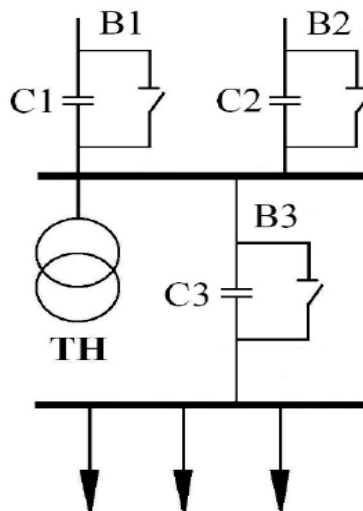


Рисунок 3.11 - Схема розподільного пристрою 220 кВ підстанції
у разі виникнення ФП

де: В1–В3 – високовольтні вимикачі; ТН - трансформатор напруги; С1–С3 — конденсатори, що шунтують.

У роботі також зазначено, що перед виникненням стійкого ферорезонансного процесу на основній гармоніці спостерігався субгармонічний резонанс.

Ферорезонансний процес виникає внаслідок компенсації індуктивного та ємнісного опорів у коливальному контурі за наявності насиченого магнітного осердя індуктивності. Існує кілька типів ферорезонансних режимів, що визначаються початковими умовами системи: основний, субгармонічний, аперіодичний та хаотичний.

Обов'язковою передумовою виникнення ФП є наявність достатньої потужності джерела живлення для насичення магнітного осердя індуктивного елемента.

У системах електропостачання нелінійними індуктивностями, здатними брати участь у формуванні коливального контуру, можуть бути вимірювальні та силові трансформатори, а також шунтуючі реактори. Ємнісними елементами такого контуру виступають повітряні та кабельні лінії електропередачі, системи шин, батареї конденсаторів і шунтуючі конденсатори вимикачів.

Захисні апаратні та оперативні заходи у СЕП спрямовані на зміну ємності або індуктивності елементів мережі, які потенційно можуть формувати ферорезонансний контур, а також на запобігання його утворенню чи зниження добротності такого контуру.

Результати експериментальних досліджень ферорезонансних процесів підтверджують положення та методичні рекомендації, що регламентують захист електричних мереж від резонансних підвищень напруги, не суперечачи їм.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

На основі отриманих картин магнітних полів чисельно визначені власні та взаємні індуктивності котушок трансформатора. Проведене моделювання також дало змогу більш точно оптимізувати розподіл витків котушок по шарах, виходячи з величини ЕРС електромагнітної індукції, що припадає на один виток.

Зі збільшенням кількості трансформаторів напруги типу НАМІ підвищується потужність шунта нульової послідовності, проте одночасно зменшується еквівалентний опір компенсаційної обмотки.

Таким чином, можливість виникнення ферорезонансних процесів у трансформаторах типу НАМІ повністю виключається навіть за умов їх паралельної роботи.

У системах електропостачання нелінійними індуктивностями, здатними брати участь у формуванні коливального контуру, можуть бути вимірювальні та силові трансформатори, а також шунтуючі реактори. Ємнісними елементами такого контуру виступають повітряні та кабельні лінії електропередачі, системи шин, батареї конденсаторів і шунтуючі конденсатори вимикачів.

Захисні апаратні та оперативні заходи у СЕП спрямовані на зміну ємності або індуктивності елементів мережі, які потенційно можуть формувати ферорезонансний контур, а також на запобігання його утворенню чи зниження добротності такого контуру.

Результати експериментальних досліджень ферорезонансних процесів підтверджують положення та методичні рекомендації, що регламентують захист електричних мереж від резонансних підвищень напруги, не суперечачи їм.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ:

У роботі детально проаналізовані причини пошкодження трансформаторів напруги на прикладі трансформатору напруги контролю ізоляції.

Необхідно чітко розмежовувати пошкодження трансформаторів напруги, спричинені ферорезонансними процесами, та пошкодження, зумовлені перенапругою. Хоча обидва явища мають подібний тепловий вплив на трансформатор, їхня фізична природа та методи захисту суттєво відрізняються.

Пошкодженість ТН напруги пов'язана з режимом заземлення нейтралі мережі. Найменш дієвим способом заземлення нейтралі є ізольована нейтраль, так як для цього режиму нейтралі характерні значні дугові перенапруги, ферорезонансні явища. Зміни режиму нейтралі цих мереж дозволить повністю вирішити цю проблему.

Сучасні антирезонансні трансформатори напруги електромагнітного типу не здатні тривалий час працювати за умов дії несиметричних дуг, тому ушкодження найчастіше виникають саме в високовольтній обмотці таких трансформаторів. Подібні недоліки слід враховувати ще на етапі проєктування трансформаторів напруги шляхом підвищення активного опору обмотки ТНП.

Застосування антирезонансного трансформатора напруги дає змогу уникнути пошкоджень під час різноманітних нестаціонарних процесів у мережі. Позитивні результати експлуатації таких трансформаторів свідчать про їх високу надійність і стійкість до впливу перехідних режимів

Для запобігання ферорезонансним явищам необхідно забезпечити відсутність нульової послідовності у трансформаторі за всіх режимів його роботи. Найбільш ефективним є застосування таких конструкцій, у яких складові нульової послідовності компенсуються, що, у свою чергу, зменшує сумарну індуктивність у стрижнях трансформатора напруги.

Аналіз експериментальних досліджень показав, що конструкція зі

стрічковим магнітопроводом трансформатора ефективно запобігає виникненню ферорезонансу. Це пояснюється тим, що магнітні потоки нульової послідовності компенсуються внаслідок їх зустрічного напрямку, а індуктивний опір нульової послідовності наближається до нуля, що виключає можливість появи ферорезонансних процесів. Конструкція має такі переваги: підвищену надійність, зменшені масо-габаритні показники трансформатора, відсутність додаткових опорів і втрат у сталі, а також відсутність конструкційної сталі.

У системах електропостачання нелінійними індуктивностями, здатними брати участь у формуванні коливального контуру, можуть бути вимірювальні та силові трансформатори, а також шунтуючі реактори. Ємнісними елементами такого контуру виступають повітряні та кабельні лінії електропередачі, системи шин, батареї конденсаторів і шунтуючі конденсатори вимикачів.

Захисні апаратні та оперативні заходи у СЕП спрямовані на зміну ємності або індуктивності елементів мережі, які потенційно можуть формувати ферорезонансний контур, а також на запобігання його утворенню чи зниження добротності такого контуру.

Результати експериментальних досліджень ферорезонансних процесів підтверджують положення та методичні рекомендації, що регламентують захист електричних мереж від резонансних підвищень напруги, не суперечачи їм.

Антирезонансні трансформатори напруги є одним із найефективніших засобів підвищення надійності та безпеки роботи електричних мереж. Їх застосування дозволяє значно зменшити ймовірність виникнення ферорезонансних процесів, які можуть призводити до небезпечних перенапруг, пошкодження ізоляції та виходу з ладу вимірювальної апаратури. Завдяки спеціальній конструкції антирезонансні трансформатори забезпечують стабільність передавання напруги, зменшують похибки вимірювань і сприяють підвищенню точності

контролю параметрів мережі.

Крім того, їх використання позитивно впливає на електромагнітну стійкість системи, підвищує загальну експлуатаційну надійність і подовжує термін служби електротехнічного обладнання.

Таким чином, упровадження антирезонансних трансформаторів напруги є доцільним і ефективним рішенням для сучасних електричних мереж, особливо в умовах підвищених вимог до якості електроенергії та безпеки експлуатації.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

- 1.Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
- 2.Масляк Р.Я. Ферорезонансні процеси та захист трансформаторів напруги в електричних мережах 6-35 кВ. Дисертація на здобуття наукового ступеню канд. техн. наук. 2018, 188 с.
- 3.Бесараб О.Б., Тугай Ю.І. Моделювання ферорезонансного процесу в трансформаторі напруги прямим методом. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2017, вип. 30. С. 87-90.
- 4.Stosur M., Piasecki W., Florkowski M. ATP/EMTP Study of Ferroresonance Involving HV Inductive UT and Circuit Breaker Capacitance. Power Quality and Utilization, Journal, 2018, Vol. 14, No 2. P. 49-52.
- 5.Грін Б.Р. Ферорезонансні процеси в магістральних електричних мережах. Наука і техніка: світогляд, 2018, №6 (74). С. 56-61.
- 6.Бахор З., Яцейко А., Ференсович Р. Оцінка ферорезонансних процесів в схемах електричних мереж 6-35 кВ на основі аналізу надійності. Energy Engineering and Control Systems. Vol.6, Number 2, 2021. P. 137-144
- 7.Z. Emin, B. Zahavi, D. Auckland, Y. Tong. Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers: a study based on nonlinear dynamics, IEEE Proc. on Generation, Transmission, Distribution, Vol.144, 2017, pp. 383-387.
- 8.Arroyo A., Martinez R., Manana M., Pigazo A. Detection of Ferroresonance Occurrence in Inductive Voltage Transformers through Vibration Analysis. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 106. 2019, pp. 294-300.
- 9.Enrique R., Pineda P., Rodrigues R. Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink. IEEE Latin America Transactions, 16(2), 2018, pp. 460-466.
- 10.Abdelazim T., Dionise T.J., Yanniello R. A case Study of Voltage Transformer Failures in a Modern Data Center: Analysis, Mitigation, and

Solution Implementation. IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2016.

11. Журахівський А.В., Кенс Ю.Ф., Яцейко Ф.Я. Ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги. Технічна електродинаміка. 2017, №2. С. 73-77.

12. Саєнко Ю.Л. Дослідження перенапруг в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю за наявності ферорезонансних явищ. Приазовський ДТУ, 2018.

13. Valverde V., Mazon A.J., Zamora I., Buigues G. Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. Renewable Energy and Power Quality Journal. 2018. Vol. 1. P. 465–471.

14. Drapela J., Toman P., Orsagova J., Kratky M. Simulation of Ferroresonance Phenomena in Power Systems. Proc. of the 5th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, December 16–18, 2015. Tenerife, Spain, 2015. P. 373–377.