

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Обґрунтування параметрів роботи силових трансформаторів при виникненні перехідних процесів

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛКЗ-20
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Андрій КОРШИКОВ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **ст.викл. Е. НЕМЦЕВ**

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

_____ (підпис)

Рецензент _____

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

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

_____ (підпис)

_____ (дата)

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

Студент _____

_____ (підпис)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2024

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Андрію КОРШИКОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Обґрунтування параметрів роботи силових трансформаторів при виникненні перехідних процесів

керівник роботи Едуард НЄМЦЕВ, ст.викл.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Схема електричної системи.

Характеристики генераторів: номінальна потужність – 100 МВт, номінальна напруга – 10,5 кВ, номінальний струм – 3,25 кА, коефіцієнт навантаження – 0,85, значення опорів – 0,25 Ом, 2,2 Ом, 0,81 Ом, 0,27 Ом. Питомий опір лінії електропередач – 0,35 Ом/км. Типи застосованих трансформаторів: ТРДН-140000/110, ТРДЦН-125000/1100, АТДЦТН-63000/220/110. Довжини ліній електропередач: 30 км, 30 км, 20 км, 100 км. Потужність енергосистеми – 230 кВ. Потужність трифазного КЗ системи – 18000 МВА. Базисна потужність – 1000 МВА, базисна напруга – 230 кВ.

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

1. Огляд загальних відомостей про роботу силових трансформаторів під час перехідних станів.

2. Огляд типів перехідних процесів у енергосистемах.

3. Розрахунок перехідних режимів у електричній системі.

4. Моделювання перехідних процесів у мережі та їх впливу на роботу силових трансформаторів.

5. Огляд питань експлуатації силових трансформаторів.

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

Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 5	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 6 травня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	06.05.24 – 12.05.24	
2.	Розділ 2	13.05.24 – 19.05.24	
3.	Розділ 3	20.05.24 – 26.05.24	
4.	Розділ 4	27.05.24 – 09.06.24	
5.	Розділ 5	10.06.24 – 15.06.24	

Студент _____
(підпис)

Андрій КОРШИКОВ _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Андрій КОРШИКОВ. Обґрунтування параметрів роботи силових трансформаторів при виникненні перехідних процесів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд загальних відомостей про роботу силових трансформаторів під час перехідних станів.

У другому розділі було здійснено огляд типів перехідних процесів у енергосистемах.

У третьому розділі здійснено розрахунок перехідних режимів у електричній системі.

У четвертому розділі було здійснено моделювання перехідних процесів у мережі та їх впливу на роботу силових трансформаторів.

Ключові слова: силовий трансформатор, перехідний процес, перехідний стан, проектування, енергосистема, коротке замикання, перенапруга, надійність, фільтр, моделювання

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ СТАНІВ	9
1.1 Огляд принципів функціонування силових трансформаторів в електричній мережі	9
1.2 Специфічні проблемні питання функціонування силових трансформаторів під час перехідних процесів	13
1.3 Конструктивні та експлуатаційні характеристики трансформаторів, що лежать в основні принципів їх проектування	15
1.4 Цілі та завдання дослідження. Обмеження на шляху здійснення досліджень	18
2 ОГЛЯД ТИПІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕНЕРГОСИСТЕМАХ	22
2.1 Визначення та типи перехідних процесів	22
2.2 Вплив перехідних процесів на силові трансформатори	23
2.3 Методи, що використовуються для аналізу перехідних процесів	26
2.4 Огляд інструментів моделювання та програмного забезпечення для аналізування перехідних станів	27
2.5 Огляд наукових статей по темі дослідження	30
3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ У ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ	35
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕРЕЖІ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	45
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54

	6
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	57
ДОДАТОК Б. ВИТЯГ З ГАЛУЗЕВОГО КЕРІВНОГО ДОКУМЕНТА «ТРАНСФОРМАТОРИ СИЛОВІ. ТИПОВА ІНСТРУКЦІЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ»	63
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	73

ВСТУП

Електрична енергія є фундаментальною складовою сучасного суспільства, забезпечуючи життєдіяльність як промислових, так і побутових споживачів.

У контексті енергетичних систем, силові трансформатори відіграють ключову роль, забезпечуючи передачу та розподіл електроенергії за умови мінімальних втрат. Їх функціональна надійність та ефективність безпосередньо впливають на якість, стабільність та безперервність електропостачання. Тому, дослідження роботи силових трансформаторів під час перехідних станів є критично важливим для забезпечення надійності електричних мереж.

Перехідні стани в електричних системах, такі як пускові струми, короткі замикання, перемикання навантаження та інші, призводять до значних змін параметрів роботи електричних систем. Ці зміни можуть викликати електромагнітні, механічні та термічні навантаження на трансформатори, що може призвести до їх пошкодження або виходу з ладу. Розуміння поведінки силових трансформаторів під час перехідних процесів та розробка ефективних методів захисту і управління є невід'ємною частиною забезпечення надійної роботи енергетичних систем.

Дослідження у цій галузі спрямовані на розробку та вдосконалення методів моделювання перехідних процесів, виявлення критичних параметрів, що впливають на роботу трансформаторів, та розробку захисних пристроїв і стратегій управління, які забезпечують мінімізацію негативного впливу перехідних станів. Використання сучасних інструментів моделювання та програмного забезпечення дозволяє детально аналізувати поведінку трансформаторів та прогнозувати їх реакцію на різноманітні перехідні процеси.

Мета роботи – покращення розуміння та управління поведінкою силових трансформаторів під час перехідних процесів і визначення динамічних реакцій трансформаторів у різних перехідних умовах із застосуванням імітаційних моделей.

Завдання роботи:

- аналіз поточних захисних заходів і стратегій впливу, порівняння їх ефективності та пропозиції щодо вдосконалення,
- вивчення методів моделювання перехідних станів за допомогою сучасних засобів моделювання та оцінка їх ефективності,
- аналіз стійкості трансформаторів до перехідних явищ,
- аналіз впливу перехідних процесів на електричні, термічні та механічні параметри роботи трансформаторів,
- моделювання процесів для забезпечення надійної та ефективної роботи трансформаторів під час перехідних процесів.

Об’єкт досліджень – силові трансформатори, що використовуються в електричних мережах для передачі та розподілу електроенергії.

Предмет досліджень – поведінка та динамічні характеристики силових трансформаторів під час перехідних процесів.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ СТАНІВ

1.1 Огляд принципів функціонування силових трансформаторів в електричній мережі

Силові трансформатори є невід’ємними компонентами електричних мереж і є критично важливими пристроями, які забезпечують ефективну передачу та розподіл електроенергії. Силові трансформатори класифікуються залежно від їх застосування та приєднаної величини потужності.

Конструкція силових трансформаторів включає складні інженерні принципи, включаючи такі матеріали, як високоякісна кремнієва сталь для осердя та мідні або алюмінієві провідники для обмоток. Зазначені матеріали дозволяють оптимізувати продуктивність та досягти ефективності за умов мінімізації втрат енергії через гістерезис, вихрові струми та нагрівання. Осердя, як правило, складається з ламінованих пластин для зменшення втрат на вихрові струми, а конфігурація обмоток, яка часто має кілька відводів для регулювання напруги, розроблені відповідно до конкретних експлуатаційних вимог [1].

При роботі у складі електричних мереж силові трансформатори піддаються різноманітним експлуатаційним навантаженням – електричні, термічні, механічні впливи та фактори навколишнього середовища. Ці чинники можуть вплинути на довговічність і функціональні параметри трансформаторів, що вимагає надійної конструкції та належного технічного обслуговування. Надійність силових трансформаторів має першочергове значення, оскільки вихід їх з ладу може призвести до значних збоїв у електропостачанні, економічних втрат і до загрози безпеці обслуговуючого персоналу [1].

Розуміння ролі та засад функціонування силових трансформаторів в електричній мережі має фундаментальне значення для оцінки їх роботи в сучасних енергосистемах. Ці знання дозволять визначити основу для вивчення проблем, пов'язаних із забезпеченням їх стабільної роботи під час різноманітних перехідних процесів.

Стабільна робота силових трансформаторів під час перехідних процесів має вирішальне значення для збереження надійності та цілісності електричної мережі. Перехідні процеси, такі як перемикання, виникнення несправностей та зміни в навантаженні, можуть викликати швидкі зміни рівнів напруги та струму, створюючи суттєві проблеми для стабільності роботи трансформаторів. Ці тимчасові події можуть призвести до різноманітних електричних і механічних навантажень, які, якщо їх не врегулювати належним чином, можуть призвести до пошкодження обладнання, непродуктивних перерв на обслуговування та ремонт й збільшення витрат на це обслуговування і цей ремонт [2].

Однією з головних проблем під час перехідних процесів є генерація пускових струмів. Пускові струми виникають тоді, коли на трансформатор різко подається напруга, що призводить до раптового стрибка струму, який може в кілька разів перевищувати нормальний робочий струм. Цей стрибок може викликати надмірне нагрівання провідних елементів, незбалансові механічні рухи та генерацію електромагнітних перешкод – кожне з цих явищ потенційно може пошкодити обмотки та осердя трансформатора. Для пом'якшення впливу пускових струмів останнім часом використовуються вдосконалені захисні пристрої та стратегії керування, використання послідовно ввімкнених опорів, контрольоване перемикання та застосування обмежувачів пускового струму [3].

Іншим важливим аспектом перехідної стабільності трансформаторів є здатність витримувати стани, викликані короткими замиканнями. Ці короткі замикання, що можуть бути спричинені зовнішніми несправностями мережі чи внутрішніми несправностями трансформатора,

створюють величезні електричні та механічні навантаження. Конструкція трансформатора повинна враховувати ці навантаження, що позначається на міцнішій структурі обмоток, використанні відповідного типу ізоляції та ефективності систем охолодження. На додаток до цього обов'язковим є використання обмежувачів струму та захисних реле, які допомагають ізолювати ушкоджені ділянки та обладнання, пом'якшити наслідки коротких замикань, зберегти, таким чином, цілісність та функціональність силових трансформаторів [3].

Стрибки напруги та перехідні перенапруги, можуть бути викликані ударами блискавки або перемиканнями, що також становлять серйозну загрозу для стабільної роботи трансформаторів. Ці перенапруги можуть призвести до діелектричного пробою ізоляції, що в свою чергу призведе до часткових розрядів, електричних дуг та цілковитому виходу трансформатора з ладу. Обмежувачі перенапруг та застосування належних методів заземлення є важливими способами захисту трансформаторів від цих перехідних перенапруг. Крім того, регулярне технічне обслуговування, діагностичне тестування і моніторинг станів можуть відігравати важливу роль у виявленні та усуненні потенційних вад ізоляції до того, як вони призведуть до катастрофічних збоїв та аварій [3].

Взаємних перехід і перетворення між тепловими та електричними явищами під час виникнення перехідних процесів ще більше ускладнює стабільність роботи силових трансформаторів. Швидкі зміни навантаження можуть спричинити локальне нагрівання, що призведе до теплового «розширення» або «звуження» компонентів трансформатора. Ці термічні цикли можуть з часом погіршити стан ізоляційних матеріалів та механічних складових у конструкції трансформаторів. Рішенням цих проблем можуть бути методи ефективного управління температурою, впровадження передових методів охолодження та використання систем теплового моніторингу.

Розуміння важливості стабільної роботи під час перехідних процесів підкреслює необхідність ретельного проектування, вживання захисних заходів і технічного обслуговування. Забезпечення стійкості силових трансформаторів перед цими викликами має важливе значення для надійної роботи електричної мережі, що зрештою гарантує безперервне постачання електроенергії кінцевим споживачам.

Необхідністю вивчення робочих параметрів силових трансформаторів під час перехідних процесів є критична потреба підвищення надійності, ефективності та терміну служби трансформаторів. Робочими параметрами можуть бути напруга, номінальний струм, температура та характеристики ізоляції, які безпосередньо впливають на функціонування та довговічність роботи силових трансформаторів. Розуміння того, як ці параметри змінюються під час перехідних процесів, має важливе значення для оптимізації конструкції та роботи трансформатора. Вихід зазначених параметрів за встановлені межі може призвести до виходу з ладу трансформаторів, що має далекосяжні наслідки – тривалі відключення електроенергії, значні економічні втрати та загроза порушенню вимог безпеки. Досягнення робочими параметрами граничних значень та їх перевищення може призвести до катастрофічних збоїв і їх знання дозволить впровадити превентивні заходи, щоб зменшити ризик виникнення збоїв. Перехідні процеси часто супроводжуються значними втратами енергії через пускові струми, короткі замикання та стрибки напруги. Вивчаючи робочі параметри, можна розробити стратегії мінімізації цих втрат. Підвищення ефективності не тільки знижує експлуатаційні витрати, але й сприяє стійкості електричної мережі за рахунок зниження споживання енергії. Нормативні стандарти та стандарти безпеки вимагають дотримання суворих критеріїв ефективності функціонування силових трансформаторів. Відповідність цим стандартам вимагає глибокого розуміння робочих параметрів та їх поведінки під час перехідних процесів [4].

Силові трансформатори становлять значні капіталовкладення, і їх передчасний вихід з ладу може призвести до значних фінансових втрат. Розуміння впливу перехідних процесів на робочі параметри дозволяє розробити протоколи технічного обслуговування та діагностики, які можуть виявити ранні ознаки їх деградації. Такі методи, як аналіз розчинених газів, тепловізійне обстеження та періодичні випробування можуть бути використані для моніторингу стану трансформатора та планування своєчасного технічного обслуговування, таким чином подовжуючи термін його експлуатації та максимізуючи повернення вкладень в електрообладнання.

Таким чином, мотивацією для вивчення робочих параметрів силових трансформаторів під час перехідних процесів є різностороннім завданням, охоплюючи запобігання відмовам, оптимізацію ефективності, подовження терміну служби, адаптацію до зміни мереж та дотримання нормативних стандартів. Ці мотиви спонукають до здійснення постійних досліджень і розробок, спрямованих на підвищення стійкості та продуктивності силових трансформаторів перед тимчасовими проблемами.

1.2 Специфічні проблемні питання функціонування силових трансформаторів під час перехідних процесів

Силові трансформатори, які є критичними компонентами електричних мереж, стикаються з численними проблемами під час виникнення перехідних процесів, до яких відносять комутаційні режими, аварії, раптові несправності та різкі зміни навантаження. При цьому виникають значні електричні та механічні напруги, які можуть поставити під загрозу робочу цілісність і довговічність трансформаторів. Однією з головних проблем є виникнення пускових струмів при знаходженні трансформатора

під напругою. Ці струми можуть у кілька разів перевищувати номінальний робочий струм, що призводить до екстремальних термічних і механічних навантажень на обмотки та осердя. У результаті нагрівання може погіршитися стан ізоляційні, механічні сили можуть спричинити фізичні пошкодження, скорочується термін служби трансформаторів [5].

При дослідженні необхідно вирішувати різноманітні, конкретні питання, пов'язані з роботою силових трансформаторів під час перехідних процесів. По-перше, необхідно зосередити більшу увагу на характеристиці та пом'якшенні пускових струмів. Пускові струми, що характеризуються значними величинами та короткотривалістю, становлять значний ризик для цілісності трансформатора. У рамках дослідження необхідно вивчити методи точного моделювання пускових струмів за допомогою передових засобів моделювання та оцінити ефективність різних методів зменшення впливу. Серед цих методів можна відзначити використання резистивних елементів, контролю режиму живлення та встановлення обмежувачів пускового струму. Мета полягає в тому, щоб розвинути всебічне розуміння явищ пускових імпульсів і надати рекомендації щодо мінімізації їх впливу на працездатність трансформатора. Іншим важливим питанням може бути визначення стійкості трансформаторів до подій короткого замикання. Це може включати аналіз структурної цілісності обмоток, відповідності застосованих систем ізоляції та продуктивність засобів охолодження. Сюди також можна віднести дослідження ролі захисних пристроїв (обмежувачів струму та захисних реле), які можуть зменшити наслідки виникнення короткого замикання. Шляхом визначення ключових факторів, які впливають на стійкість трансформатора, результатом можуть бути рекомендації по вдосконаленню конструкції та експлуатаційних вимог, що здатні підвищити параметри відмовостійкості [6].

Для врахування явищ стрибкоподібної зміни напруги та виникнення перехідних перенапруг необхідно вивчати ефективність пристроїв захисту від перенапруг (розрядники, пристрої заземлення та інші) та передових

діагностичних інструментів (моніторинг стану, аналіз середовищ та інші) та розробка системи попереджувального технічного обслуговування, що дозволить запобігти катастрофічним аваріям і також продовжити термін служби трансформаторів.

Управління температурним режимом під час перехідних процесів є ще одним важливим питанням, яке потребує ретельного огляду. Швидкі зміни навантаження можуть спричинити значні у термічній картині трансформатора, що може призвести до прискореного старіння його ізоляційних матеріалів і механічних компонентів. Здійснення відповідних досліджень термічної поведінки трансформаторів за різних умов навантаження дозволить оцінити ефективність різних стратегій охолодження. Шляхом оптимізації методів терморегуляції можна встановити такі режими, щоб трансформатори мали змогу працювати в безпечних температурних межах, тим самим підвищуючи їх надійність і термін служби.

1.3 Конструктивні та експлуатаційні характеристики трансформаторів, що лежать в основні принципів їх проектування

Силові трансформатори є критично важливими компонентами систем електроенергії і призначеними для передачі електричної енергії між ланцюгами. Конструкція силового трансформатора базується на двох компонентах – осердя та обмоток. Осердя, як правило, виготовляють з ламінованої магнітної сталі, що має низьку величину опору для магнітного потоку та мінімізує втрати на перемагнічування та вихрові струми. Конструкцію осердя оптимізують для ефективного розподілу магнітного потоку, що визначає різноманітність їх конфігурацій, кожна з яких має свої переваги та вибирається на основі конкретного застосування

трансформатора та вимог до надійності. Обмотки, зазвичай виготовлені з міді або алюмінію, намотуються навколо осердя та поділяються на первинну та вторинну обмотки. Ці обмотки ізолювані для запобігання електричним коротким замиканням і ретельно скомпоновані для ефективності забезпечення магнітного зв'язку. Кількість витків у первинній і вторинній обмотках визначає значення коефіцієнта трансформації [7].

Одним із фундаментальних принципів проектування є використання ізоляційних матеріалів, які здатні витримувати високий потенціал напруги та запобігають пробою. Для забезпечення ізоляції обмоток і осердя використовують такі ізоляційні матеріали, як папір, масло та тверді ізолятори. Вибір ізоляційного матеріалу впливає на діелектричну міцність трансформатора, його теплові характеристики та загальну надійність. Трансформаторне масло відіграє подвійну роль – забезпечуючи ізоляцію та діючи як теплоносій для розсіювання тепла, що виділяється під час роботи [7].

Силові трансформатори виділяють значну кількість тепла через втрати в обмотках і втрати в осерді. Для підтримки оптимальних робочих температур і запобігання термічній деградації системи ізоляції використовуються ефективні механізми охолодження, такі як масляне охолодження, повітряне охолодження або примусова циркуляція ізоляційної оливи. Системи охолодження розроблені таким чином, щоб підвищення температури всередині трансформатора залишалось в безпечних межах за будь-яких умов експлуатації [7].

Силові трансформатори також оснащують захисними пристроями та аксесуарами для підвищення їх надійності та безпеки. Ці пристрої виявляють склад газів, що виділяються, і характеризують наявність внутрішніх несправностей, захищають трансформатор від виникнення надмірного тиску та інші.

Перемикачі навантаження використовуються для регулювання співвідношення напруги трансформатора, щоб мати змогу компенсувати коливання напруги навантаження та живлення, забезпечуючи їх стабільну роботу.

Отже, конструкція силових трансформаторів передбачає ретельний баланс між використаними матеріалами, просторової геометрії та допоміжних систем для досягнення ефективної передачі енергії, ефективного охолодження та забезпечення надійної ізоляції.

Використання принципів закону електромагнітної індукції, належне управління температурним режимом та забезпечення діелектричної цілісності повинні лягти в основу проектування трансформаторів, забезпечуючи безпечну та ефективну їх роботу за різних умов, у тому числі і при перехідних процесах.

Силові трансформатори визначаються рядом робочих характеристик і параметрів, які є критичними для їх працездатності та ефективної роботи в системах електропостачання. Ці характеристики є важливими для забезпечення відповідності трансформаторів вимогам їх конкретних застосувань і можуть бути покладені в основу їх проектування.

При проектуванні, параметр ефективності є однією з ключових експлуатаційних характеристик. Силові трансформатори повинні бути розроблені для роботи з високим ККД, як правило, понад 95%, що викликає необхідність мінімізації втрат енергії. На це впливають втрати в осерді (перемагнічування і втрати на вихрові струми) і теплові втрати в обмотках. Ці втрати змінюються залежно від навантаження та умов експлуатації та можуть бути мінімізовані завдяки відповідній конструкції трансформаторів. Сюди також можна віднести параметр загального опору трансформатора, який впливає на можливості регулювання напруги та стійкість до короткого замикання. У цьому питанні необхідно досягти балансу між активною та реактивною складовою загального опору – занадто високе значення опору може призвести до нездатності

регулювання напруги, тоді як занадто низький опір може призвести до надмірних величин струмів короткого замикання.

Трансформатори розраховані на роботу при певних значеннях робочих температур і перевищення цих температур може призвести до погіршення ізоляції та скорочення терміну служби. Ефективність роботи систем охолодження безпосередньо впливає на теплові характеристики, причому вирішальними є такі параметри, як режим охолодження і витривалість ізоляційних матеріалів.

Надійність роботи та витрати на обслуговування також є важливими аспектами при проектуванні трансформаторів. Силові трансформатори повинні бути розраховані на тривалий термін служби, тому регулярне технічне обслуговування, аналіз стану мастила, тепловізійний контроль і електричні випробування, мають важливе значення для забезпечення постійних параметрів надійності та виявлення потенційних проблем, перш ніж вони призведуть до виникнення збоїв [8].

Отже, робочі характеристики та параметри силових трансформаторів, такі як коефіцієнт трансформації, ККД, загальний опір, теплові характеристики, частота напруги живлення та надійність є критичними для їх ефективної роботи в системах електропостачання. Розуміння та оптимізація цих характеристик повинні бути покладені в основу проектування трансформаторів.

1.4 Цілі та завдання дослідження. Обмеження на шляху здійснення досліджень

Основною метою дослідження можна вважати покращенні розуміння та управління поведінкою силового трансформатора під час перехідних процесів та визначення динамічних реакцій силових трансформаторів у

різних перехідних умовах (пускові струми, короткі замикання та стрибки напруги). Це передбачає розробку та застосування детальних імітаційних моделей, які точно представляють фізичні явища, що відбуваються в трансформаторах під час цих подій. Досягнувши глибшого розуміння цих перехідних процесів, можна буде виявити критичні фактори, які впливають на продуктивність і надійність роботи силових трансформаторів.

На шляху досягнення даної мети важливо:

- оцінити ефективність існуючих захисних заходів і стратегій впливу, порівняти відносну ефективність цих пристроїв і запропонувати способи вдосконалення або альтернативної заміни за необхідності. Це можна зробити завдяки теоретичному аналізу та практичному моделюванню.

- оцінити теплові та механічні навантаження, що викликані перехідними процесами, та визначити їх вплив на окремі компоненти трансформатора,

- запропонувати передові методи діагностики та моніторингу з інтеграцією сучасних технологій,

- сформулювати набір найкращих рекомендацій і вказівок щодо проектування, експлуатації та обслуговування силових трансформаторів,

- визначення критичних робочих параметрів, які суттєво впливають на поведінку трансформатора під час перехідних процесів,

- аналіз впливу робочих параметрів на продуктивність та працездатність трансформатора під час перехідних процесів, що передбачає проведення моделювання та експериментальних досліджень,

- визначення оптимальних налаштувань робочих параметрів для підвищення стійкості трансформатора до перехідних явищ,

- розробка та перевірка нових діагностичних методів для раннього виявлення проблем, пов'язаних із перехідними станами.

Дослідження має охоплювати та здійснювати всебічний аналіз робочих параметрів силових трансформаторів під час перехідних процесів. При цьому варто зосередитись на виявленні, моделюванні та оптимізації

ключових параметрів, які впливають на роботу трансформатора в перехідних умовах. Зокрема, необхідно дослідити електричні, термічні та механічні навантаження на трансформатори під час цих подій, з метою розробки стратегій підвищення їх стабільної, надійної та довговічної роботи. Для цього можуть бути проведені як теоретичні, так і експериментальні підходи.

Теоретичний аналіз включає розробку детальних математичних моделей для імітації поведінки трансформатора під час перехідних процесів. Ці моделі враховують різні фізичні явища – електромагнітні взаємодії, теплові ефекти та механічні напруги. Експериментальна перевірка полягає у перевірці створених моделей з використанням лабораторних установок і дослідів у реальних умовах. Для здійснення перевірки без проведення натурних випробувань та аналізу найкраще підходять передові інструменти моделювання, такі як Matlab, PSCAD та програмне забезпечення для методу кінцевих елементів.

Під час проведення досліджень необхідно розглянути різні робочі сценарії: номінальний режим, падіння напруги, виникнення несправностей, операції перемикавання та інше. Серед основних параметрів, які необхідно визначити та дослідити, можна відзначити: рівні напруги та струму, властивості ізоляції, температурні показники та механічну міцність. Під час дослідження необхідно дати кількісну оцінку впливу цих параметрів на продуктивність трансформатора та визначити оптимальні налаштування для зменшення негативних наслідків під час перехідних процесів.

Загалом, необхідно отримати цілісне розуміння поведінки силового трансформатора під час перехідних процесів і розробити практичні рекомендації щодо вдосконалення його конструкції, правил експлуатації та обслуговування.

Для розуміння поведінки силових трансформаторів під час перехідних процесів необхідно визначити ряд обмежень:

– при використанні імітаційних моделей для представлення поведінки трансформатора можуть бути не враховані складні сценарії поведінки реальних об'єктів,

– такі фактори, як зміна властивостей матеріалів, їх старіння та вплив навколишнього середовища, можуть вносити невизначеності, які складно врахувати,

– обмежена доступність експериментальних даних.

– вимушена зосередженість лише на конкретних типах та типорозмірах трансформаторів і обмежених перехідних процесах,

– можливість користування лише наявними, поточними технологіями і спиратись на властивості існуючих матеріалів,

– обмеженість обчислювальних ресурсів, що позначається на часі знаходження оптимального рішення,

– необхідність застосування широкого кола знань з різних галузей – електротехніки, матеріалознавства та термодинаміки.

Зазначені обмеження підкреслюють потребу в постійних дослідженнях і безперервному вдосконаленні принципів і підходів у проектуванні енергосистем.

2 ОГЛЯД ТИПІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

2.1 Визначення та типи перехідних процесів

Перехідні процеси в енергосистемах – це короткочасні, але потужні події, які призводять до тимчасових відхилень від нормальних умов експлуатації. Ці процеси можна розділити за різними ознаками залежно від їх природи та причини, що їх викликали [9].

За своїм змістом, перехідні процеси – це події в нестационарному стані, які викликають раптові зміни напруг, струмів або частоти системи. Зазвичай їх ділять на дві основні категорії: електричні перехідні процеси та механічні перехідні процеси [9].

Електричні перехідні процеси поділяють на перехідні процеси, що виникають при перемиканні, та перехідні процеси, що спричинені несправностями. Перехідні процеси під час перемикання виникають через такі операції, як приєднання або від'єднання ліній, силових трансформаторів та іншого електричного обладнання. Ці події викликають раптові зміни умов функціонування електричного ланцюга, що призводить до стрибків та коливань напруги. Електричні перехідні процеси, що викликані несправністю, виникають тоді, коли в системі є «ненормований» стан, наприклад коротке замикання або замикання «на землю». Ці несправності можуть викликати перевищення значень струму та перепади напруги, що призведе до значних збоїв у системі живлення. Раптове зростання та зниження струмів короткого замикання призводить до виникнення перехідних хвиль напруги та струму, які можуть поширюватися системою, що може потенційно спричинити пошкодження обладнання та впливати на стабільність функціонування електричної мережі. Механічні перехідні процеси, хоч і є менш поширеними, також відіграють не останню роль у належному функціонуванні енергосистем. Ці перехідні процеси зазвичай викликаються механічними подіями, такими як

відключення турбіни, поломка вала генератора або різкі зміни механічного навантаження. Раптова зміна механічних умов може вплинути на електричну потужність генераторів та інших механізмів, що обертаються, що призведе до перехідних електричних реакцій у системі [9].

Перехідні процеси характеризуються короткотривалістю, як правило, від кількох мікросекунд до кількох секунд. Незважаючи на їх короткочасний характер, вони можуть мати сильний вплив на енергосистему, вимагаючи здійснення ретельного аналізу та розробки стратегій зменшення впливу. Передові методи моделювання та імітаційного моделювання є важливими для розуміння динаміки перехідних процесів і розробки відповідних заходів протидії.

Таким чином, перехідні процеси в енергосистемах охоплюють широкий діапазон подій, включаючи операції перемикання, події несправностей та механічні збурення. Ці процеси спричиняють раптові та тимчасові відхилення від нормальних робочих умов, створюючи значні проблеми для стабільності та надійності роботи енергосистем. Розуміння природи та поведінки цих перехідних процесів має вирішальне значення для забезпечення безпечної та ефективної роботи енергосистем.

2.2 Вплив перехідних процесів на силові трансформатори

Вплив перехідних процесів на силові трансформатори є досить суттєвим, як на їх експлуатаційні характеристики, так і на довгострокову надійність. Перехідні процеси, такі як пускові струми, короткі замикання та стрибки напруги, піддають трансформатори екстремальним електричним і механічним навантаженням. Розуміння цих впливів має вирішальне значення для проектування надійних трансформаторів і розробки ефективних стратегій зменшення впливу [10].

Пускові струми, які виникають під час подачі напруги на трансформатори при їх приєднанні, є одним з найпоширеніших перехідних явищ. Ці струми можуть у кілька разів перевищувати номінальні або робочі струми і є результатом надлишкової намагніченості осердя трансформатора. Значні за величиною пускові струми можуть викликати надлишкові механічні навантаження на обмотки та осердя, потенційно призводячи до їх деформації або зміщення. Крім того, теплове навантаження, викликане пусковими струмами, може прискорити старіння ізоляційних матеріалів, зменшуючи термін їх служби зокрема і трансформатора в цілому. У деяких випадках пускові струми можуть викликати хибне спрацювання захисних пристроїв, що призведе до збоїв у роботі всієї енергосистеми [10].

Іншим критичним перехідним станом, який повинні витримувати силові трансформатори, є події короткого замикання. Під час короткого замикання трансформатор «відчуває» раптовий стрибок струму, що створює значні електромагнітні сили. Ці сили можуть викликати «фізичне» пошкодження обмоток, наприклад згинання або розрив, а також впливають на цілісність структури осердя. Термічний вплив струмів короткого замикання може ще більше погіршити стан ізоляції та інших важливих компонентів трансформатора [10].

Інші перехідні стани можуть бути причиною стрибків напруги, які в свою чергу можуть бути спричинені ударів блискавки або перемиканнями під навантаженням. Раптове підвищення напруги може перевищити значення діелектричної міцності ізоляції, що призведе до локальних міжвиткових замикань або до повного пробою. Повторний вплив стрибків напруги може призвести до накопичення пошкоджень, що призведе до руйнування всього шару ізоляції з часом. Для зменшення впливу стрибків напруги на трансформатори необхідно додатково встановлювати пристрої захисту, що викликає додаткові витрати коштів [10].

Під час виникнення механічних перехідних процесів, що виникають під час раптових змін механічного навантаження або виникненні несправностей будь-яких залучених у процес механізмів, можуть викликати коливання електричної потужності, що призводить до генерації перехідних струмів і напруг. Крім того, механічні перехідні процеси можуть створювати додаткові навантаження на компоненти трансформатора, посилюючи ефекти електричних перехідних процесів.

Крім миттєвого впливу, перехідні процеси можуть мати довгостроковий, накопичуючий вплив на надійність трансформатора. Повторний вплив перехідних умов прискорює старіння ізоляції та інших складових компонентів, скорочуючи загальний термін служби трансформатора. Ці сукупні пошкодження потребують регулярного моніторингу та додаткового технічного обслуговування для забезпечення належної надійності.

Отже, перехідні процеси мають глибокий вплив на силові трансформатори, порушуючи як їх експлуатаційні характеристики, так і параметри надійності. Краще розуміння цих впливів має вирішальне значення для проектування надійних трансформаторів і розробки ефективних стратегій експлуатації. Ефективні стратегії зменшення впливу перехідних процесів на силові трансформатори повинні містити різні чинники: використання найновітніших захисних пристроїв, запровадження вдосконалених методів проектування, використання точних та стійких до зовнішніх впливів діагностичних засобів та інше. Вирішуючи проблеми, пов'язані з перехідними явищами, можна значно підвищити надійність і ефективність силових трансформаторів в електричних мережах.

2.3 Методи, що використовуються для аналізу перехідних процесів

Аналіз перехідних процесів в енергосистемах має вирішальне значення для розуміння їх впливу на обладнання та для розробки стратегій зменшення впливів від негативних наслідків. Для аналізу цих процесів використовується кілька методів, основні з яких включають аналіз у часовій області, аналіз у частотній області та комбіновані підходи [11].

Аналіз у часовій області є найбільш розповсюдженим методом дослідження перехідних процесів. Він передбачає розв'язання диференціальних рівнянь системи за параметром часу, для спостереження того, як змінюються значення напруг та струмів під час протікання перехідних процесів. Даний підхід забезпечує детальне уявлення про перехідну реакцію системи, визначаючи точну поведінку електричних параметрів. Для розв'язання диференціальних рівнянь у часовій області часто використовуються чисельні методи. Основною перевагою аналізу в часовій області є його точність і здатність моделювати складні взаємодії в енергосистемі. Однак цей метод вимагає значної обчислювальної потужності, особливо для великих систем з нелінійними компонентами [11].

Аналіз у частотній області базується на тому, як різні частотні компоненти впливають на перехідну характеристику. Перетворюючи сигнали часової області в частотну область за допомогою таких методів, як перетворення Фур'є або перетворення Лапласа, можна аналізувати поведінку системи з точки зору її частотної характеристики. Цей метод може бути особливо корисним для розуміння резонансних явищ, гармонійних взаємодій та визначення ефектів від впровадження фільтрів і компенсаторів. Аналіз у частотній області потребує менше обчислень, ніж аналіз у часовій області для певних досліджень, але він не може описати всі можливі перехідні процеси [11].

Комбіновані методи поєднують методи обчислень у часовій та частотній областях для використання сильних сторін обох підходів. Методи вейвлет-перетворення можуть забезпечити частотно-часове представлення перехідних сигналів, дозволяючи детально проаналізувати, як перехідні явища розвиваються з часом, і визначити їх спектральний вміст. Цей підхід корисний для виявлення та охарактеризування перехідних збурень, які мають як часові, так і частотні особливості [11].

Ще одним ефективним прийомом аналізу перехідних процесів є коливальний аналіз. Коливальний аналіз передбачає розкладання сигналів у системі на набір характерних коливань, кожен з яких пов'язаний із певною частотою. Цей метод допомагає визначити домінуючі режими, які сприяють перехідній реакції, і дає уявлення про стабільність і резонансні характеристики системи.

Аналітичні методи передбачають отримання конкретних рішень для спрощених моделей. Хоча вони можуть не відобразити всю складність реальних систем, вони можуть надати цінну інформацію та можуть бути використані для початкової оцінки або як початкові форми для більш детального чисельного моделювання. Розширити можливості наведених методів можна шляхом інтеграції даних вимірювань із пристроїв моніторингу та створення відповідних моделей аналізу перехідних процесів..

2.4 Огляд інструментів моделювання та програмного забезпечення для аналізування перехідних станів

Аналіз перехідних процесів в енергетичних системах може бути значно спрощений завдяки використанню складних засобів моделювання та програмного забезпечення. Ці інструменти надають потужні можливості

для моделювання, симуляції та аналізу перехідних явищ, дозволяючи прогнозувати їх виникнення та зменшувати вплив цих подій на компоненти енергосистеми [11].

Одним із найбільш широко використовуваних інструментів моделювання для аналізу перехідних процесів є програма електромагнітних перехідних процесів (EMTP). EMTP – це комплексний пакет програмного забезпечення, призначений для детального моделювання електромагнітних перехідних процесів в енергетичних системах у часовій області. Він дозволяє точно моделювати складні компоненти енергетичної системи, включаючи трансформатори, лінії електропередачі та захисні пристрої. EMTP особливо ефективний у моделюванні ефектів перемикань, умов виникнення несправності та ударів блискавки. Його здатність обробляти великі та складні моделі робить його цінним інструментом для досліджень промислових енергетичних систем [12].

Іншим популярним інструментом є середовище PSCAD (комп'ютерне проектування енергетичних систем), який пропонує зручний графічний інтерфейс для будови моделей енергетичних систем. PSCAD забезпечує детальний аналіз у часовій області для вивчення перехідних процесів. Його можливості моделювання в режимі реального часу дозволяє здійснювати тестування та перевіряти стратегії керування в різних перехідних умовах. [13].

PSS®E (Power System Simulator for Engineering) від Siemens – ще одне програмне забезпечення, яке використовується для аналізу роботи енергосистем. Хоча PSS®E в основному відоме своїми можливостями аналізу стабільного стану, воно також містить модулі для аналізу динамічної та перехідної стабільності. Це особливо корисно для вивчення перехідної стабільності великих взаємопов'язаних електромереж та оцінки впливу збоїв на стабільність і продуктивність системи. Велика бібліотека моделей програмного забезпечення та його інтеграція з іншими

інструментами моделювання роблять його універсальним вибором для аналізу енергосистем [14].

Matlab і його спеціалізований інструментарій Simulink широко використовується для моделювання перехідних процесів в енергетичних системах. Обчислювальне середовище Matlab у поєднанні з можливостями графічного моделювання Simulink дозволяє створювати детальні моделі компонентів енергосистеми та симулювати перехідні процеси. Simulink надає ряд наборів інструментів, спеціально розроблених для енергетичних систем, таких як Simscape Power Systems, який пропонує готові моделі для трансформаторів, ліній електропередач та інших ключових компонентів енергосистем. Matlab і Simulink легко налаштовуються, що дозволяє користувачам розробляти індивідуальні моделі та виконувати розширений аналіз [15].

DIgSILENT PowerFactory – комплексний інструмент для аналізу енергосистеми, який включає надійні можливості для аналізу перехідних процесів. PowerFactory здатне моделювати широкий діапазон перехідних процесів, від перехідних процесів до перешкод, викликаних несправністю, що робить його цінним інструментом для забезпечення надійності та стабільності систем живлення. Його інтеграція з системами GIS (географічні інформаційні системи) і SCADA (системи диспетчерського контролю та збору даних) покращує його користь для програм моніторингу та керування в реальному часі [16].

RTDS (цифровий симулятор реального часу) – це спеціалізований інструмент, який використовується для моделювання енергосистем у реальному часі. RTDS дозволяє тестувати апаратне забезпечення в циклах, коли фізичні пристрої підключаються до симулятора для перевірки їх продуктивності в реальних перехідних умовах. Ця можливість має вирішальне значення для перевірки поведінки захисних реле, систем керування та інших критичних компонентів у контрольованому середовищі перед розгортанням у польових умовах [17].

Наведені інструменти моделювання та програмні пакети мають змогу аналізувати перехідні процеси в енергосистемах, надавати детальну інформацію про поведінку компонентів енергосистеми під час перехідних явищ, дозволяючи проектувати більш стійкі системи та розробляти ефективні стратегії зменшення впливу негативних явищ. Використання цих інструментів має вирішальне значення для забезпечення стабільності, надійності та ефективності сучасних енергосистем.

2.5 Огляд наукових статей по темі дослідження

У [18] розглядаються існуючі методики діагностики несправностей силових трансформаторів за допомогою електричних вимірювань. Основною метою дослідження є надання всебічного огляду як традиційних, так і інноваційних методів моніторингу стану силових трансформаторів. Це є критично важливим, оскільки раннє виявлення несправностей може запобігти серйозному пошкодженню, скоротити час простою та подовжити термін служби трансформаторів. У дослідженні обговорюються традиційні методи – вимірювання опору ізоляції, індекс зволоження, аналіз розчинених газів. Ці методи, хоч і є надійними, часто вимагають виведення трансформатора з експлуатації, що не завжди можливо чи економічно доцільно. Автори підкреслюють важливість переходу на методів онлайн-діагностики, які дозволяють здійснювати постійний моніторинг без переривання роботи трансформатора. Онлайн-методи, такі як газова хроматографія та вимірювання частот, дозволяють у реальному часі визначати працездатність трансформатора. Дослідження підкреслює використання методів штучного інтелекту, штучних нейронних мереж та нечіткої логіки, що дозволило підвищення чутливості та точності виявлення несправностей. Ці методи дозволять виявити початкові збої, які

традиційні методи можуть пропустити, і таким чином забезпечити додатковий рівень захисту. У дослідженні також розглядаються стратегії діагностики на основі моделі, які включають створення базової моделі нормальної роботи трансформатора, а потім порівняння даних у реальному часі з цією моделлю для виявлення аномалій. Цей підхід корисний для виявлення несправностей, які викликають незначні зміни в поведінці трансформатора. Нові методи забезпечують безперервний моніторинг, зниження витрат на технічне обслуговування та підвищення надійності.

У [19] досліджується величина втрат на гістерезис у силовому трансформаторі під час електромагнітних перехідних процесів. Створена модель може точно пояснювати ефект гістерезису, який дозволить передбачити поведінку трансформатора при різних перехідних станах. Запропонована методологія передбачає створення лінійної залежності між зміною щільності магнітного потоку після «точки насичення» та результуючою інтенсивністю магнітного поля. Цей підхід визнає, що залізні осердя сучасних трансформаторів мають вузькі петлі гістерезису, що робить детальне моделювання менш критичним для розуміння загальних втрат і ефектів загасання. Модель передбачає, що втрати на гістерезис пропорційні квадрату щільності потоку, що узгоджується з емпіричними даними вимірювань. Основні завдання включали оцінку впливу гістерезису на такі явища, як пускові струми, переривання струму намагнічування та ферорезонанс. Дослідження протиставляє традиційні комплексні моделі гістерезису запропонованій простішій моделі з метою зменшення обчислювального навантаження, зберігаючи при цьому точність. Зосереджуючись на динамічному представленні гістерезису, модель розроблена для безперебійної роботи з існуючими моделями трансформаторів, незалежно від того, чи враховують вони залежні від частоти вихрові струми. Результати моделювання показали, що гістерезис суттєво не впливає на демпфування пускових струмів, але має вирішальне значення для встановлення початкових умов, з яких створюється потік. У

випадку відсікання струму намагнічування дослідження показує, що модель динамічного гістерезису точніше прогнозує перехідні перенапруги порівняно з використанням моделі постійного опору. Це підкреслює частотно-залежну природу втрат на гістерезис, які неможливо адекватно вловити простим паралельним опором.

У [20] представлено теоретичну, аналітичну та комп'ютерну модель для імітації електромагнітних перехідних процесів у силових трансформаторах. Основна мета дослідження полягає в аналізі та розумінні перехідних процесів трансформаторів під час різних умов роботи. Дослідження спрямоване на підвищення діагностичної та експлуатаційної ефективності трансформаторів шляхом використання комп'ютерного моделювання для прогнозування та пом'якшення потенційних несправностей або дефектів. Запропонована методологія передбачає розробку математичної моделі силового трансформатора з використанням зосереджених параметрів і врахуванні законів взаємної індуктивності. Моделювання проводилося за допомогою програмного середовища Matlab-Simulink. Складена попередньо математична модель враховувала електромагнітні процеси в трансформаторах, насичення магнітного осердя, індуктивний зв'язок і протікання струмів через обмотки. Результати моделювання показали, що модель точно передбачає перехідні процеси, здатна аналізувати стан короткого замикання, контролювати вторинні струми та інше. Моделювання дає змогу зрозуміти поведінку трансформатора в умовах несправності, висвітлюючи динамічні зміни струму та напруги.

У [21] представлено інноваційний підхід до оцінки технічного стану силових трансформаторів шляхом розробки неруйнівного методу діагностики для оцінки механічної цілісності осердь і обмоток трансформаторів шляхом використання модифікованого віброакустичного методу. Запропонована методологія передбачає вимірювання механічних коливань трансформаторів під час перехідних станів. Такий підхід

мінімізує час простою, необхідний для тестування, що робить його більш практичним для реального обладнання. Результати показали, що завдяки цьому методу можна ефективно розрізняти різні ступені механічних дефектів у осерді та обмотках трансформатора. Отримані спектрограми виявили суттєві відмінності в амплітуді та частоті вібраційних складових, які корелювали з наявністю механічних дефектів, і дозволяли виявляти ранні ознаки несправностей.

У [22] представлено дослідження, спрямоване на розробку нової методології для швидкого розрахунку частотно-залежної матриці опорів силових трансформаторів. Це має вирішальне значення для точного моделювання та аналізу перехідних процесів трансформаторів під впливом високочастотних збурень, таких як атмосферні розряди та перемикання у мережі. Запропонований метод значно скорочує час обчислення, зберігаючи при цьому точність матриці імпедансу, необхідної для моделювання високочастотних перехідних процесів. Дослідники пропонують модель, яка використовує поверхневі струми та величину проникності для представлення провідників і осердя трансформатора. При цьому передбачається розрахунок геометричних факторів, які визначають магнітні взаємодії між елементами, і складання матриць, які описують ці взаємодії. Складена системна матриця інвертується один раз для кожної частоти, що дозволяє безпосередньо обчислювати поверхневий і об'ємний струми для різних станів. Нова методологія забезпечує практичне рішення для швидкого та точного розрахунку матриць опору, сприяючи кращому моделюванню перехідних процесів трансформатора та покращенню надійності роботи енергосистеми.

У [23] представлено дослідження, спрямоване на вдосконалення ідентифікації та класифікації перехідних струмів у трансформаторах. Розроблений метод дозволяє розрізняти перевантаження по струму, що викликаються як нормальним станом так і такі, що спричинені такими несправностями, як короткі замикання. Ця відмінність є надзвичайно

важливою, оскільки традиційні системи захисту можуть невірно сприймати пускові струми під час подачі напруги на трансформатор як несправності, що призводить до непродуктивних перебоїв електроживлення та до неефективності роботи. Запропонований метод дозволяє проводити детальний частотно-часовий аналіз сигналу, забезпечуючи кращу часову та частотну роздільну здатність, ніж традиційні методи. До застосування запропоновано специфічний параметр, який називається «відхиленням формфактора», який дає змогу ідентифікувати джерело надструму – коротке замикання чи комутація трансформатора – протягом нетривалого часу після його виявлення.

3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ У ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

Для даної електричної системи (рис. 3.1) здійснюємо розрахунок та аналіз перехідного процесу для трьох режимів.

- режим трифазного короткого замикання (КЗ) у заданій точці К (діюче значення періодичної складової струму короткого замикання, ударний струм і потужність КЗ, залишкову напругу на шинах генератора, діючі значення періодичної складової струму генератора для визначеного моменту часу),

- діючі значення струму двофазного короткого замикання,

- режим несиметричного КЗ (чинне значення періодичної складової струму КЗ пошкоджених фаз, симетричні складові напруги та залишкова напруга непошкодженої фази).

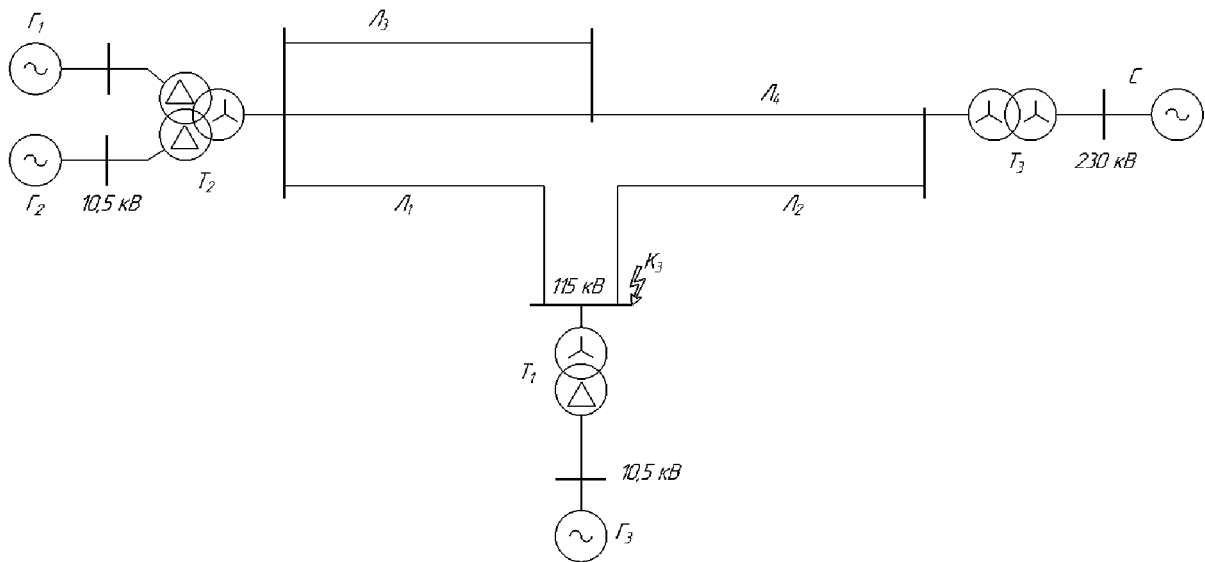


Рисунок 3.1 – Схема електричної системи

Технічні характеристики застосованого електричного обладнання наведено у табл. 3.1–3.3.

Таблиця 3.1 – Характеристики генераторів Г1–Г3 [24]

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Повна потужність	S_H^T , МВА	100
Номинальна напруга	$U_{ном}$, кВ	10,5
Номинальний струм	$I_{ном}$, кА	3,25
Коефіцієнт навантаження	$\cos \varphi_{\Gamma}$	0,85
Значення опорів, в.о.	x_d''	0,25
	x_d'	2,2

Таблиця 3.2 – Характеристики трансформаторів [24]

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Т1		
Тип	–	ТРДН-140000/110
Номинальна потужність	S_H^T , МВА	140
Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	115
	U_{HH} , кВ	10,5
Напруга КЗ	U_{K3}^{BH} , %	10,5
Коефіцієнт розщеплення	–	3
Т2		
Тип	–	ТРДЦН-125000/1100
Номинальна потужність	S_H^T , МВА	125
Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	115
	U_{HH} , кВ	10,5
Напруга КЗ	U_{K3}^{BH} , %	10,5
Т3		
Тип	–	АТДЦТН-63000/220/110
Номинальна потужність	S_H^T , МВА	63

Таблиця 3.3 – Характеристики ліній електропередач

Дільниця	Позначення	Значення, км	Погонний опір ліній, Ом·км
«1»	L_1	30	0,35
«2»	L_2	30	
«3»	L_3	20	
«4»	L_4	100	

Потужність енергосистеми – $E_c = 230$ кВ,

Потужність трифазного КЗ системи – $S_{K3}^{(3)} = 18000$ МВА.

Для подальших розрахунків складемо схему заміщення (рис. 3.2) і визначимо її параметри.

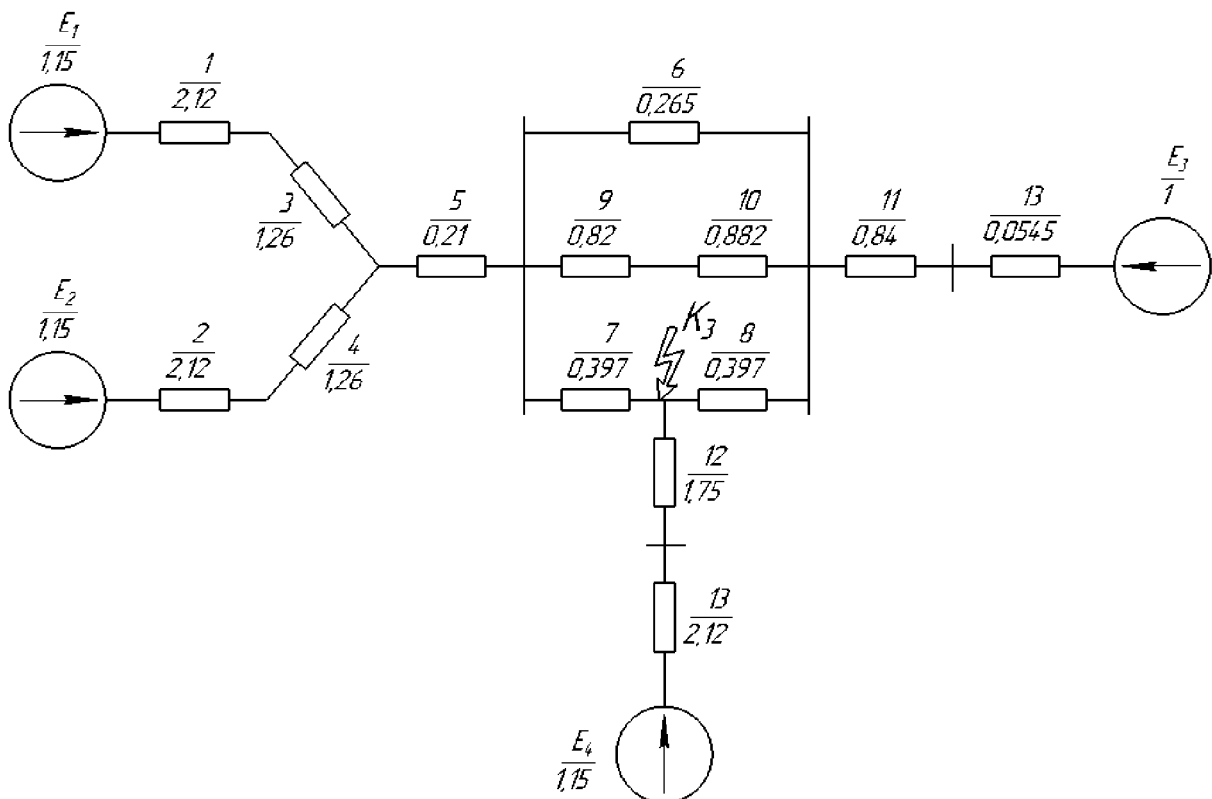


Рисунок 3.2 – Схема заміщення електричної системи

У відповідності до схеми, маємо наступні ступені напруги:

«I» – 10,5 кВ, «II» – 230 кВ, «III» – 500 кВ.

За значення базисної потужності приймаємо: $S_{\theta} = 1000$ МВА.

За значення базисних напруг приймаємо:

$$U_{\delta I} = 10,5 \text{ кВ}, U_{\delta II} = 230 \text{ кВ}, U_{\delta III} = 515 \text{ кВ}.$$

У відповідності до значення базисних напруг розрахуємо значення базисних струмів [25]:

$$I_{\delta I} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta I}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,99 \text{ кА}, \quad (3.1)$$

$$I_{\delta II} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА},$$

$$I_{\delta III} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 515} = 1,12 \text{ кА}.$$

Відносні значення ЕРС генераторів [25]:

$$\begin{aligned} E_{*1}'' = E_{*2}'' = E_{*3}'' &= \sqrt{(\cos \varphi_{\Gamma})^2 + (\sin \varphi_{\Gamma} + x_d'')^2} \cdot \frac{U_H}{U_{\delta I}} = \\ &= \sqrt{(0,85)^2 + \left(\sqrt{1-0,85^2} + 0,25\right)^2} \cdot \frac{10,5}{10,5} = 1,15, \end{aligned} \quad (3.2)$$

Відносні значення опорів генераторів [25]:

$$x_{*1} = x_{*2} = x_{*14} = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma}} = 0,25 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{100} = 2,12. \quad (3.3)$$

Відносні опори трансформаторів [25]:

$$x_{*3} = x_{*4} = \frac{U_{K(B-H)}}{100} \cdot \frac{k_p}{2} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H^T} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1000}{125} = 1,26, \quad (3.4)$$

$$x_{*5} = \frac{U_{K(B-H)}}{100} \cdot \left(1 - \frac{k_p}{4}\right) \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_h^T} = \frac{10,5}{100} \cdot \left(1 - \frac{3}{4}\right) \cdot \frac{1000}{125} = 0,21, \quad (3.5)$$

$$x_{*11} = x_{*T8} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,84,$$

$$x_{*12} = x_{*T4} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 1,75.$$

Відносні опори повітряних ліній [25]:

$$x_{*6} = x_{*L3} = x_{L3(0)} \cdot \frac{L}{n} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}II}^2} = 0,35 \cdot \frac{20}{2} \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,265, \quad (3.6)$$

$$x_{*7} = x_{*8} = x_{*L1} = x_{*L2} = x_{L1(0)} \cdot \frac{L}{n} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}II}^2} = 0,35 \cdot \frac{30}{2} \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,397, \quad (3.7)$$

$$x_{*9} = 0,35 \cdot \frac{62}{2} \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,820,$$

$$x_{*10} = 0,35 \cdot \frac{100}{3} \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,882.$$

Відносна ЕРС електроенергетичної системи С3: $E_{*3} = 1$,

Відносний опір електроенергетичної системи [25]:

$$x_{*13} = \frac{E_c^2}{S_{K3}^{(3)}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}III}^2} = \frac{510^2}{18000} \cdot \frac{1000}{515^2} = 0,0545. \quad (3.8)$$

Для визначення параметрів перехідного процесу – режиму трифазного КЗ здійснюємо перетворення попередньої схеми заміщення (рис. 3.2) – рис. 3.3.

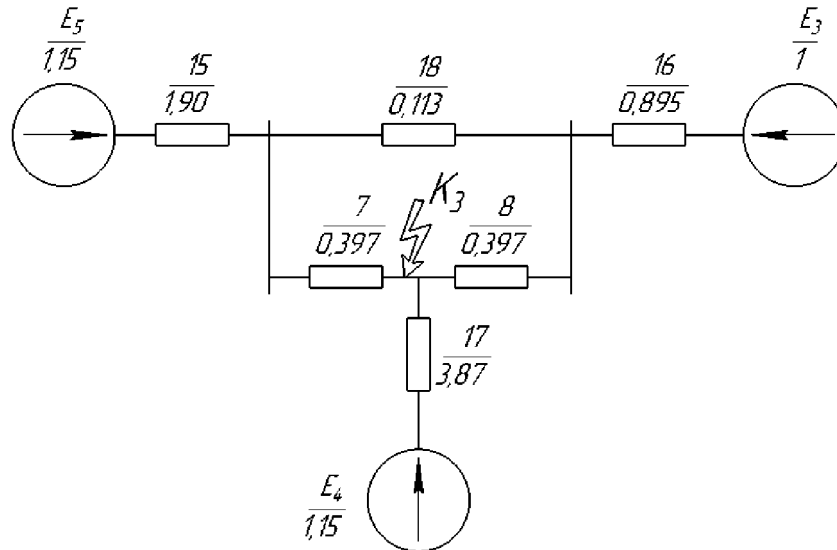


Рисунок 3.3 – Перше перетворення схеми заміщення електричної системи

Значення опорів на схемі:

$$x_{*15} = (x_{*1} + x_{*3}) \parallel (x_{*2} + x_{*4}) + x_{*5} = \frac{(2,12 + 1,26)}{2} + 0,21 = 1,90, \quad (3.9)$$

$$x_{*16} = x_{*11} + x_{*13} = 0,84 + 0,0545 = 0,895, \quad (3.10)$$

$$x_{*17} = x_{*12} + x_{*14} = 1,75 + 2,12 = 3,87, \quad (3.11)$$

$$x_{*18} = x_{*6} \parallel (x_{*9} + x_{*10}) = \frac{0,265}{2} = 0,133. \quad (3.12)$$

Відносне значення ЕРС:

$$E_{*5} = E_{*1} \parallel E_{*2} = E_{*1} = E_{*2} = 1,15. \quad (3.13)$$

Здійснюємо друге перетворення – з «трикутника» опорів «зірку» опорів (рис. 3.4).

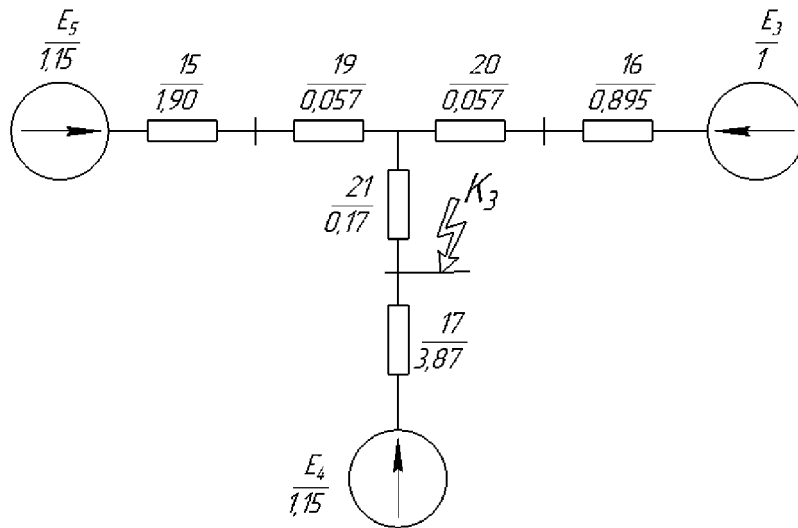


Рисунок 3.4 – Друге перетворення схеми заміщення електричної системи

Значення опорів на схемі:

$$x_{*19} = x_{*20} = \frac{x_{*7} \cdot x_{*18}}{x_{*7} + x_{*18} + x_{*8}} = \frac{0,397 \cdot 0,133}{0,397 + 0,133 + 0,397} = 0,0570, \quad (3.14)$$

$$x_{*21} = \frac{x_{*7} \cdot x_{*8}}{x_{*7} + x_{*18} + x_{*8}} = \frac{0,397 \cdot 0,397}{0,397 + 0,133 + 0,397} = 0,170. \quad (3.15)$$

Здійснюємо третє перетворення у гілках «зірки» опорів (рис. 3.5).

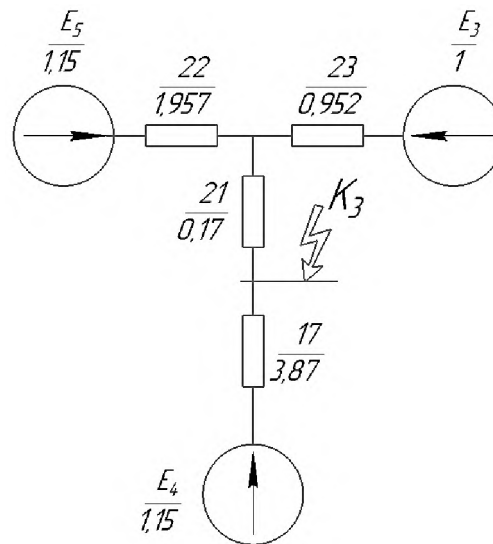


Рисунок 3.5 – Третє перетворення схеми заміщення електричної системи

$$x_{*22} = x_{*15} + x_{*19} = 1,90 + 0,057 = 1,957, \quad (3.16)$$

$$x_{*23} = x_{*16} + x_{*20} = 0,895 + 0,057 = 0,952. \quad (3.17)$$

Здійснюємо четверте перетворення із «зірки» опорів на двопроменеву схему (рис. 3.6).

Відносні значення опорів:

$$x_{*24} = (x_{*22} \parallel x_{*23}) + x_{*21} = \frac{1,975 \cdot 0,952}{1,975 + 0,952} + 0,17 = 0,810. \quad (3.18)$$

ЕРС в системі:

$$E_{*6} = E_{*3} \parallel E_{*5} = \frac{E_{*3} \cdot x_{*22} + E_{*5} \cdot x_{*23}}{x_{*22} + x_{*23}} = \frac{1 \cdot 1,957 + 1,15 \cdot 0,952}{1,957 + 0,952} = 1,05. \quad (3.19)$$

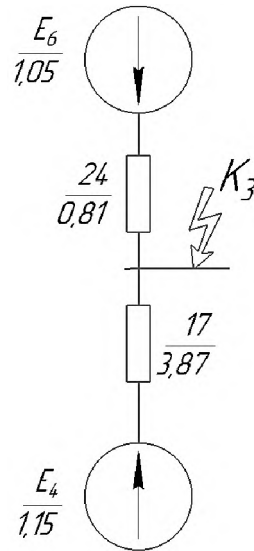


Рисунок 3.6 – Четверте перетворення схеми заміщення електричної системи

Значення струмів у гілках на схемі рис. 3.6:

$$I_{*24} = \frac{E_{*6}}{x_{*24}} = \frac{1,05}{0,81} = 1,30 \text{ кА}, \quad (3.20)$$

$$I_{*17} = \frac{E_{*4}}{x_{*17}} = \frac{1,15}{3,87} = 0,30 \text{ кА}. \quad (3.21)$$

Діюче значення періодичної складової струму КЗ [25]:

$$I_{K3}^{(3)} = (I_{*24} + I_{*17}) \cdot I_{\text{III}} = (1,30 + 0,30) \cdot 2,51 = 4,02 \text{ кА}. \quad (3.22)$$

Ударний струм короткого замикання [25]:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{K3}^{(3)}, \quad (3.23)$$

де $k_{\text{уд}}$ – ударний коефіцієнт, $k_{\text{уд}} = 1,85$ [25].

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 1,85 \cdot 4,02 = 10,52 \text{ кА}.$$

Значення потужності короткого замикання [25]:

$$S_K = \sqrt{3} \cdot I_{K3}^{(3)} \cdot U_{cpII} = \sqrt{3} \cdot 4,02 \cdot 230 = 1601,45 \text{ МВА.} \quad (3.24)$$

Значення залишкової напруги на шинах генератора [25]:

$$U_{зал.} = U_{6IV} \cdot I_{*17} \cdot x_{*12} = 10,5 \cdot 0,3 \cdot 1,75 = 5,51 \text{ кВ.} \quad (3.25)$$

Струм КЗ генератора в момент часу $t = 0$:

$$I_{\Gamma(0)} = \frac{E_{*4}}{x_{*14}} \cdot I_{6IV} = \frac{1,15}{2,12} \cdot 54,99 = 29,83 \text{ кА.} \quad (3.26)$$

Діюче значення періодичної складової струму генератора [25]:

$$I_{nt} = 0,7 \cdot I_{\Gamma(0)} = 0,7 \cdot 29,83 = 20,88 \text{ кА.} \quad (3.27)$$

$$I_{*\Gamma(0)H} = \frac{I_{\Gamma(0)}}{I_{ном}} = \frac{29,83}{3,25} = 9,18. \quad (3.28)$$

Струм двофазного КЗ розрахуємо за наближеною залежністю [25]:

$$I_{K3}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{K3}^{(3)} = 0,87 \cdot 4,02 = 3,50 \text{ кА.} \quad (3.29)$$

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕРЕЖІ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Під час роботи вимикачів у мережах виникають високочастотні перехідні процесів, що мають вплив на розподільні трансформатори. Зазначені перехідні процеси пояснюються виникненням електричної дуги під час замикання контактів та повторні запалювання під час їх розмикання. Трансформатори, що містяться в електричній мережі, піддаються впливу високочастотних перехідних процесів і високих швидкостей наростання напруги, становить загрозу для обладнання та може викликати локальні перенапруги в ізоляції.

Складна структура трансформаторів сприяє виникненню множинних внутрішніх резонансів, що може викликати нерівномірний розподіл напруги на високих частотах та локальні резонансні посилення напруг. При цьому генеруються перенапруги, що «перевантажують» ізоляцію в трансформаторах, викликаючи її порушення та призводячи до коротких замикань.

Здійснення моделювання перехідних процесів за допомогою Matlab забезпечує високу ефективність завдяки потужним інструментам і засобам аналізу. Matlab/Simulink надає можливість точної симуляції складних електричних систем, враховуючи різноманітні сценарії і випадки експлуатації. Використання передових методів, таких як чисельні алгоритми та функції обробки сигналів, дозволяє отримувати детальні дані про поведінку системи під час перехідних процесів. Це сприяє оптимізації систем і підвищенню їх надійності та ефективності. Завдяки цьому, Matlab є незамінним інструментом для інженерів, що займаються аналізом електричних мереж і устаткування [26].

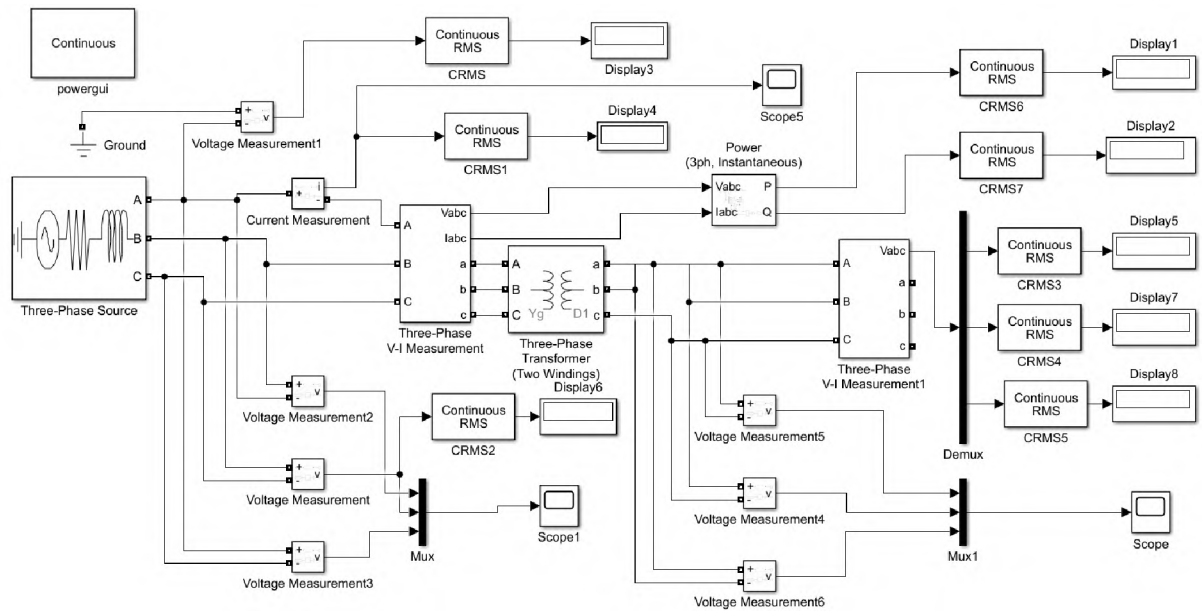


Рисунок 4.1 – Модель для дослідження перехідних процесів у електричній мережі з визначенням впливу на роботу трансформатора

Результати моделювання зміни напруг і струмів наведено на рис. 4.2 – 4.3, 4.5–4.11.

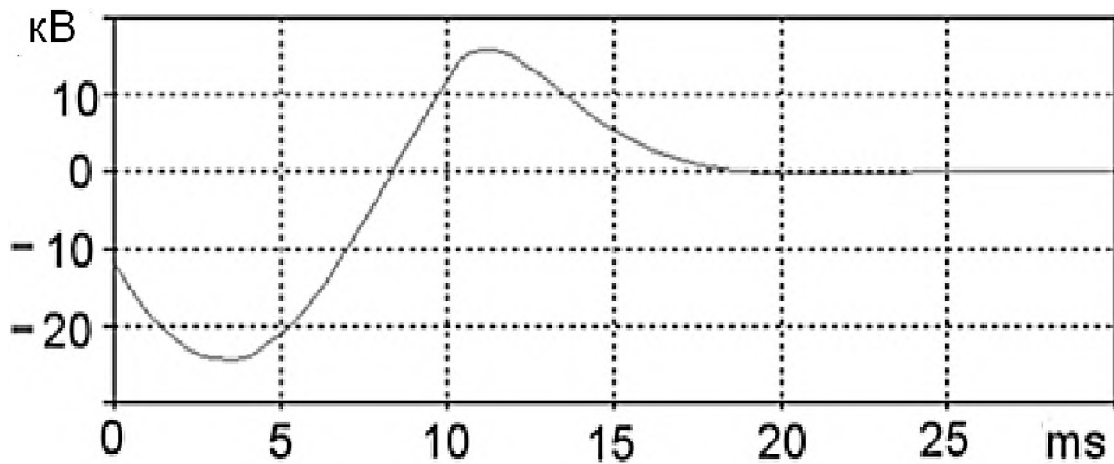


Рисунок 4.2 – Коливання напруги на клеммах трансформатора при перемиканнях вимикача (при низькій індуктивності електричного ланцюга)

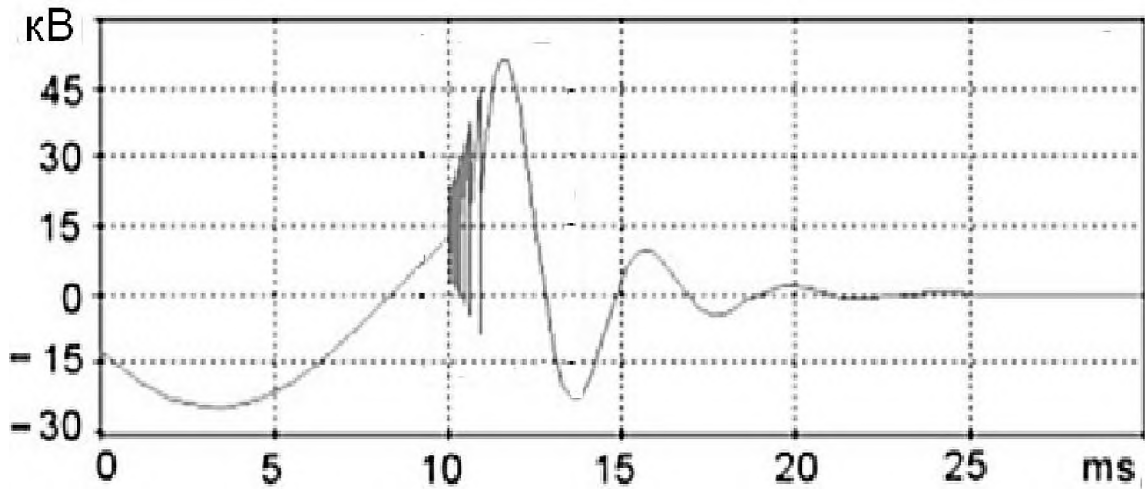


Рисунок 4.3 – Коливання напруги на клемі трансформатора при перемиканнях вимикача (при високій індуктивності електричного ланцюга)

Цей графік пояснює, що при великих значеннях індуктивності мережі можуть генеруватися повторні запалювання: під час фізичного розмикання контактів дуга проводить струм до тих пір, поки він не зменшиться нижче значення струму відсікання. При відсіканні струму енергія «замикається» в коливальному контурі і напруга на трансформаторі починає коливатися. При перевищенні напруги відновлення діелектричної провідності дуга може запалитися повторно, знову заряджаючи індуктивність мережі, що знову призводить до придушення струму. Цей процес буде тривати до тих пір, поки контакти достатньо не розійдуться.

Під час замикання контактів вимикача також можуть генеруватися високі значення перехідних струмів, особливо при розташуванні вимикача у безпосередній близькості до трансформатора. Це можна пояснити низьким значенням загального опору, що викликає високі значення перенапруг та розвиток високочастотних перехідних процесів. При зменшенні відстані контактами запалюється електрична дуга і внутрішня ємність трансформатора заряджається. Наявна індуктивності та ємності призводять до виникнення коливань та перенапруг. Напруга на клемі трансформатора коливається через те, що напруга перевищує діелектричну

провідність, що призводить до повторного запалювання дуги. Процес продовжується до тих пір, доки контакти повністю не з'єднуються. Високочастотні гармоніки, що виникають у кабельних приєднаннях, можуть бути додатковим джерелом високочастотних перенапруг.

Для запобігання виникненню високочастотних перехідних процесів часто використовуються обмежувачі перенапруг та фільтри, підключених безпосередньо до трансформаторів. Ефективним методом захисту і додатковим рішенням усунення високих значень струмів і перенапруг, що генеруються під час перемикачів, вважається застосування синхронізоване перемикачів. Це вимагає кардинальної зміни конструкції силового вимикача. Прогресивними рішеннями для придушення перехідних процесів є використання R-L-дроселів, що компенсує низьке значення еквівалентного опору джерела і приєднань. R-L-дросель з відповідною частотною характеристикою дозволяє значно зменшити час наростання фронту напруги і при цьому мінімізувати його вплив на трансформатор при нормальних умовах експлуатації. Загальний опір дроселя на частоті мережі 50 Гц повинен бути близьким до нуля та доповнений невеликим захисним конденсатором, підключеним між фазою і «землею» (рис. 4.4).

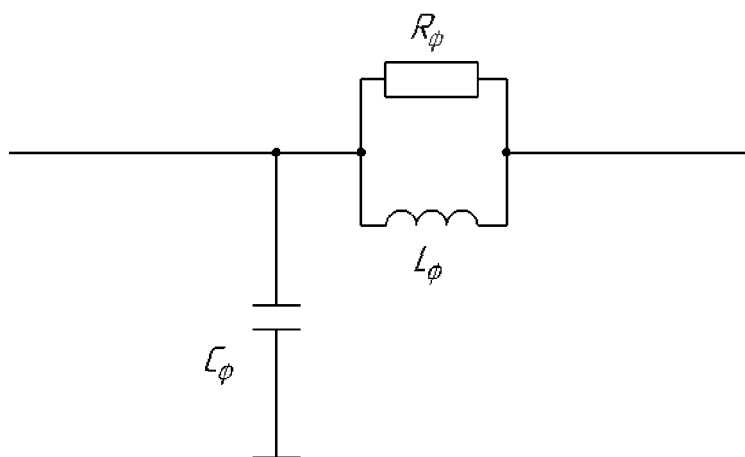


Рисунок 4.4 – Встановлення R-L-дроселя на фазу для захисту трансформатора з додатковим заземленням через конденсатор

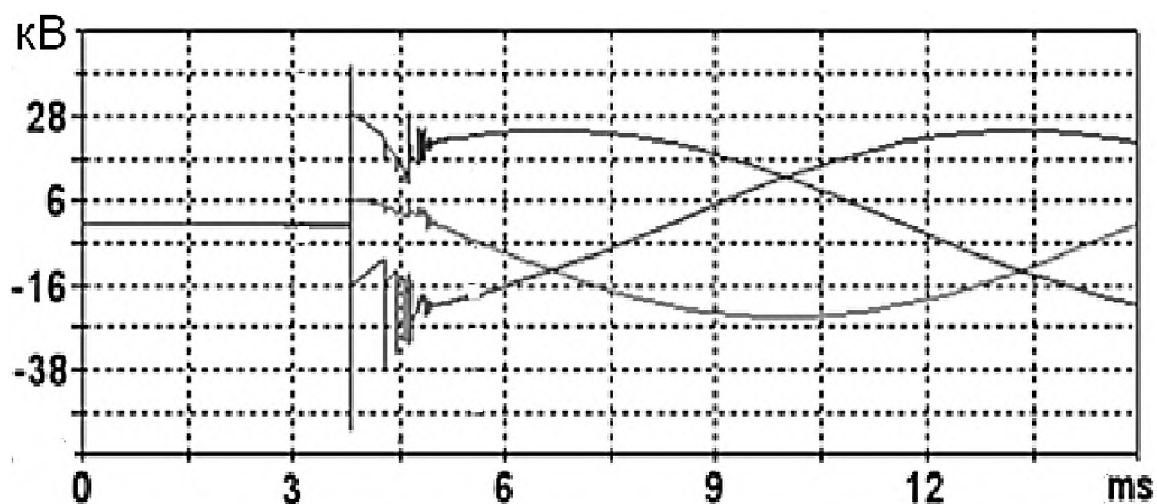


Рисунок 4.5 – Форми хвиль напруги на клеммах «незахищеного» трансформатора під час його приєднання до навантаження

Аналіз графічних залежностей показує, що під час замикання контактів вимикача на клеммах трансформатора спостерігаються значні перенапруги та додаткові високочастотні коливання.

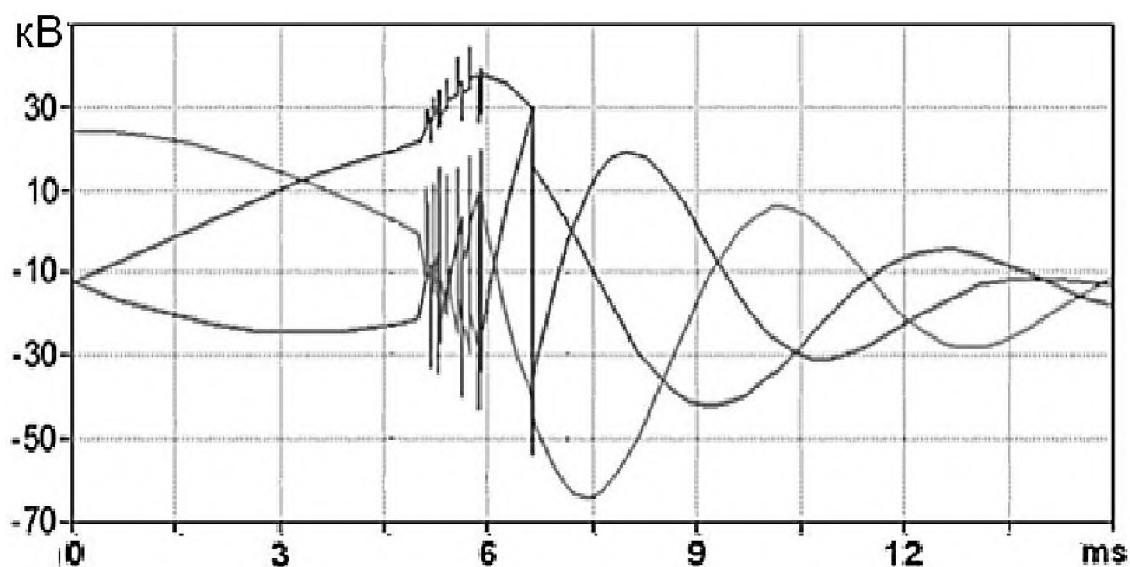


Рисунок 4.6 – Форми хвиль напруги на клеммах «незахищеного» трансформатора під час його від'єднання від мережі без навантаження

Аналіз графічних залежностей показує, що під час розмикання контактів високовольного вимикача спостерігаються множинні повторні запалювання електричної дуги і високочастотні перенапруги.

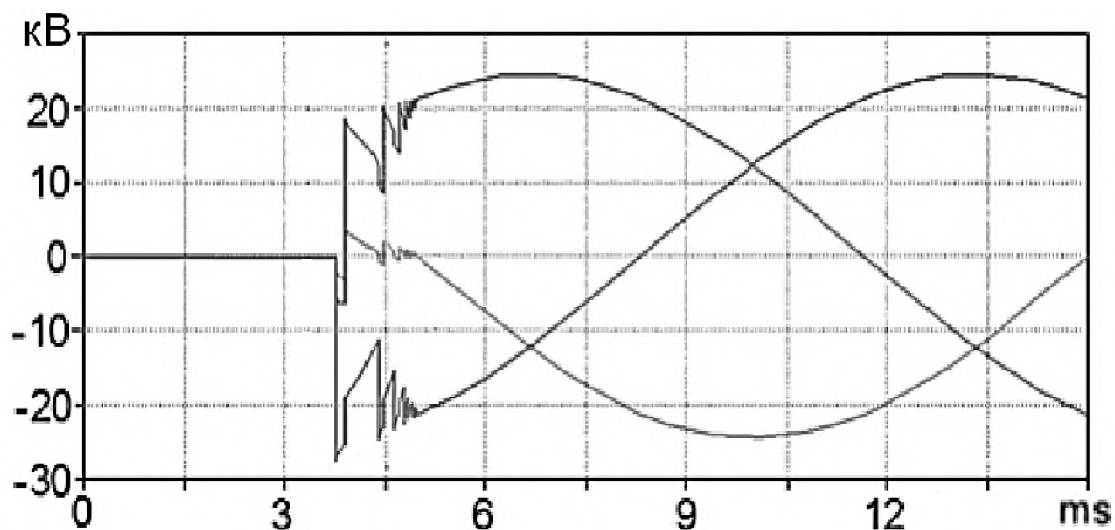


Рисунок 4.7 – Форми хвиль напруги на клеммах «захищеного» трансформатора під час його приєднання до мережі без навантаження

Аналіз графічних залежностей показує, що під час приєднання трансформатора до мережі без навантаження за умови його захисту за допомогою дроселів, спостерігається зменшення кількості запалювань електричної дуги, а високочастотні коливання відсутні.

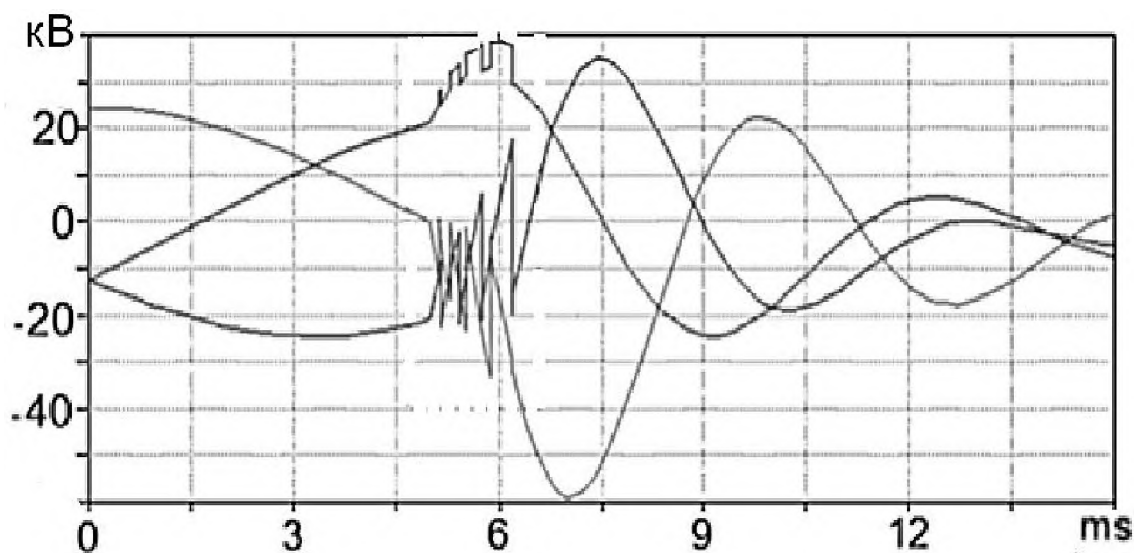


Рисунок 4.9 – Форми хвиль напруги на клеммах «захищеного» трансформатора під час його від'єднання від мережі без навантаження

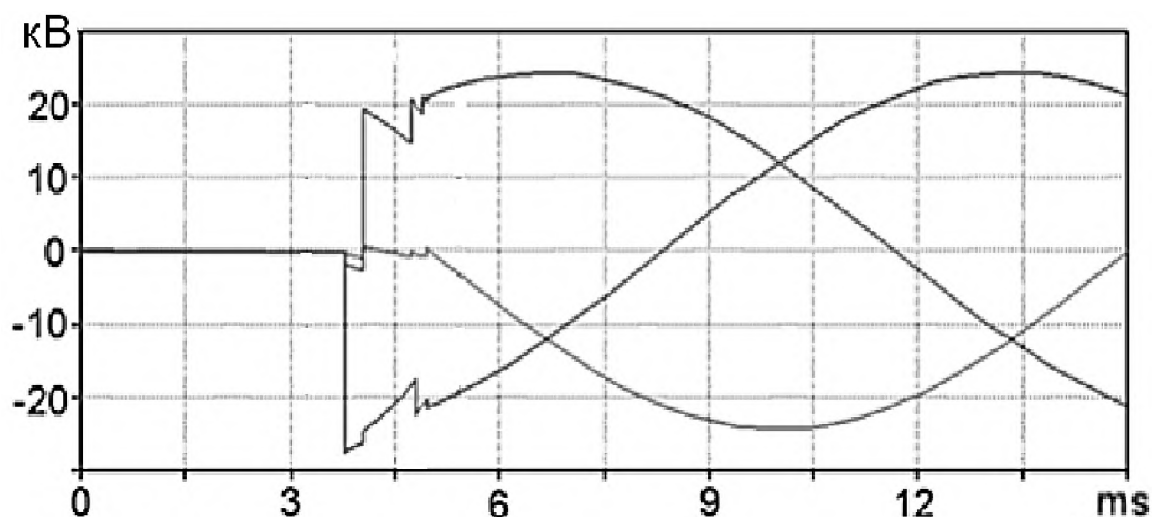


Рисунок 4.10 – Форми хвиль напруги на клеммах «захищеного» трансформатора з використанням ємності у колі заземлення під час його приєднання до мережі без навантаження

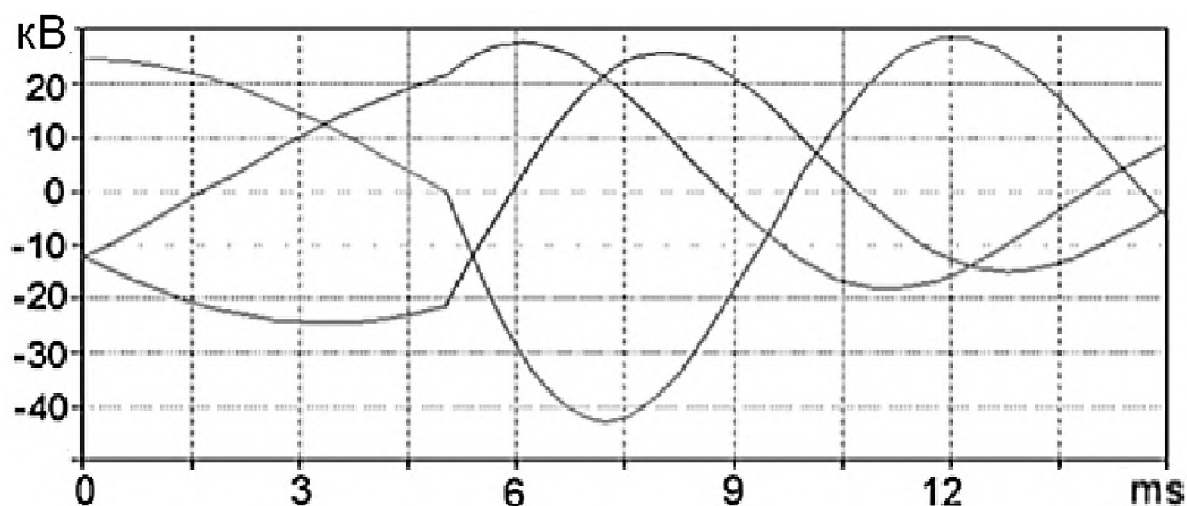


Рисунок 4.11 – Форми хвиль напруги на клеммах «захищеного» трансформатора з використанням ємності у колі заземлення під час його від'єднання від мережі без навантаження

Аналіз графічних залежностей показує, що оптимальний захист трансформатора можна забезпечити шляхом поєднання дросельного пристрою з додатковим конденсатором у колі заземлення. При цьому також значно знижується амплітуда низькочастотного колювання перенапруги.

ВИСНОВКИ

Дослідження роботи силових трансформаторів під час перехідних станів є важливою складовою для забезпечення надійності та стабільності функціонування електричних мереж. Перехідні процеси, зокрема, пускові струми, короткі замикання та стрибки напруги, створюють значні електричні, термічні та механічні навантаження на трансформатори, що можуть призвести до їх пошкодження або виходу з ладу. Вивчення цих явищ дозволяє розробити ефективні методи захисту і управління, що мінімізують негативний вплив перехідних процесів на силові трансформатори.

Результати дослідження підтвердили важливість моделювання перехідних процесів для розуміння поведінки трансформаторів під різними експлуатаційними умовами. Використання сучасних інструментів моделювання, таких як Matlab, дозволило створити детальну імітаційну модель, яка відображає явища, що відбуваються в трансформаторах під час перехідних станів. Це, в свою чергу, сприяло виявленню критичних факторів, що впливають на продуктивність і надійність роботи трансформаторів.

Особлива увага була приділена аналізу пускових струмів, коротких замикань та стрибків напруги. Дослідження показали, що пускові струми можуть викликати надмірне нагрівання та механічні деформації обмоток, що вимагає використання резистивних елементів та обмежувачів пускового струму для зменшення впливу перших. Короткі замикання створюють великі електромагнітні сили, що можуть призвести до механічних пошкоджень обмоток та осердя трансформатора. Використання обмежувачів струму та захисних реле допомагає ізолювати ушкоджені ділянки та зберегти цілісність трансформаторів. Стрибки напруги, викликані, наприклад, ударами блискавки, можуть призвести до

пробою ізоляції та виходу з ладу трансформатора. Обмежувачі перенапруг та належні методи заземлення є важливими способами захисту трансформаторів від цих перехідних перенапруг.

У роботі було підкреслено важливість впровадження передових методів діагностики та моніторингу стану трансформаторів. Використання методів штучного інтелекту та аналізу віброакустичних сигналів дозволяє здійснити раннє виявлення потенційних несправностей, що сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування та підвищенню надійності трансформаторів.

Використання дроселя значно зменшує величину напруги та кількість повторних запалювань електричної дуги на контактах вимикача, що виникають під час приєднання та від'єднання трансформатора за допомогою високовольного вимикача. При цьому спостерігається помітне зниження перенапруг, зменшення кількості переходів під час замикання контактів вимикача, а високочастотні коливання можуть бути практично усунені.

Моделювання електричних систем живлення, що обов'язково містять трансформатори, вимагає ретельного визначення параметрів та початкових умов, а також створення комплексних сценаріїв і випадків моделювання. Такий метод дозволяє детально оцінити продуктивність системи в різних експлуатаційних умовах, надаючи важливі дані про її ефективність, стійкість і надійність. Застосування сучасних інструментів моделювання, таких як Matlab/Simulink, забезпечує високоточний і ефективний аналіз, сприяючи оптимізації систем електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Осташевський М.О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора. В.І. Мілих. – Київ: Каравела, 2018. – 452 с.
2. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 219 с.
3. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.І. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 600 с.
5. Експлуатація та діагностування електричних машин і трансформаторів: Навч. посіб. для студ. електромех. спец. вищ. навч. закл. / М.А. Яцун; Нац. ун-т «Львів, політехніка». – Л., 2003. – 179 с.
6. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: ВП «ГРАНМНА», 2001. – 117 с.
7. Електричні машини: підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків: ХУПС, 2015. – 493 с.
8. Трансформатори. Монтаж, обслуговування та ремонт: навч. посіб. / М.В. Принц, В.М. Цимбалістий. – Л.: Оріяна-Нова, 2007. – 184 с.
9. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.

10. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах: [Навчальний посібник] / О.В. Гай, В.М. Бодунов. – К.: ЦП «Компринт», 2020. – 315 с.

11. Мельник В.П. Математичні моделі і методи аналізу режимів енергосистем / В.П. Мельник. – Івано-Франківськ: НАІР, 2017. – 488 с.

12. EMTP. User Manual [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://emtp.com/documents/EMTP%20Documentation/Printed_Documentation_Using_EMTP.PDF

13. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pscad.com/>

14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/grid-software/planning/pss-software/psse-xplore-order-form.html>

15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mccormick.northwestern.edu/documents/students/undergraduate/introduction-to-matlab.pdf>

16. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fglongattlab.fglongatt.org/Books.html>

17. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-54124-8>

18. Meira M., Ruschetti C.R., Álvarez R.E., Verucchi C.J. Power transformers monitoring based on electrical measurements: state of the art. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(12), p.p. 2805-2815. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.2086>.

19. de Leon F., Semlyen A. A simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1), p.p. 315-321. <https://doi.org/10.1109/61.368406>.

20. Bjelić S., Bogićević, Z. Computer simulation of theoretical model of electromagnetic transient processes in power transformers. I.J. Information Technology and Computer Science, 2014(1), p.p. 1-12. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2014.01.01>.

21. Borucki S. Diagnosis of technical condition of power transformers based on the analysis of vibroacoustic signals measured in transient operating conditions. IEEE Transactions on Power Delivery, 27(2), p.p. 670-676. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2185955>.

22. Guillermo A. Diaz, Enrique E. Mombello, Jhon Perez G., Hans K. Høidalen. Methodology for Fast Calculation of Impedance Matrix of Power Transformers for High Frequency Transient Studies. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, vol. 38, no. 2, pp. 1148-1158, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3209878.

23. Angrisani L., Bonavolontà F., Liccardo A., Schiano Lo Moriello R. Identification and classification of transformers current transients through Huang Hilbert Transform. Measurement, 2018. 125, p. 123–132. doi:10.1016/j.measurement.2018.04.080.

24. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / [Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В.]; М-во освіти і науки України, Центральнoукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

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

26. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.

27. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.

28. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К.: АТ «Київська книжкова фабрика», 1988. – 380 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

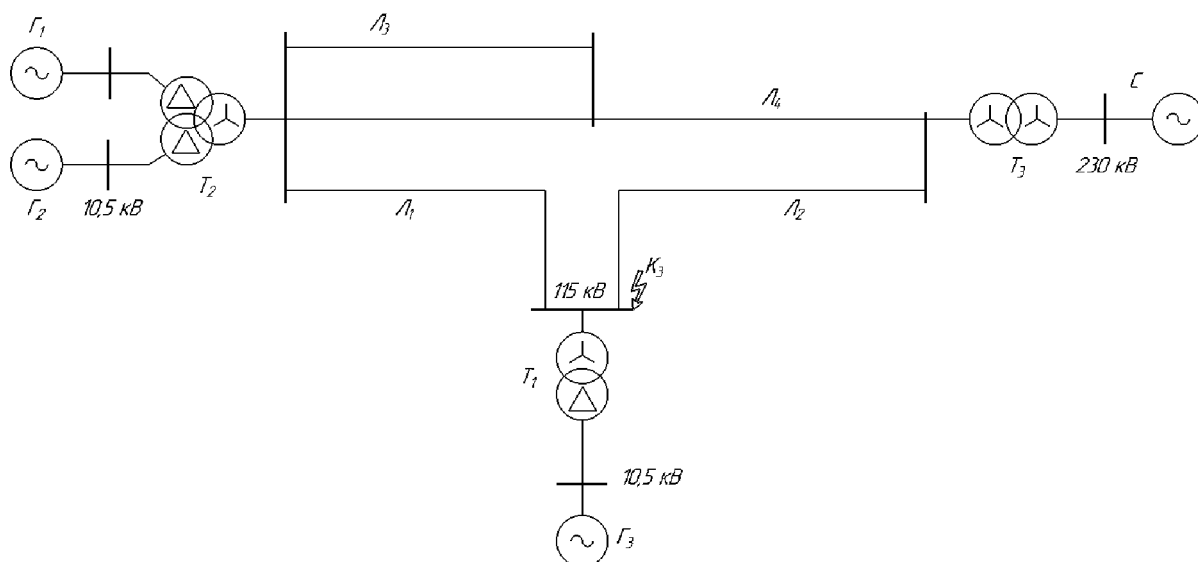


Схема електричної системи

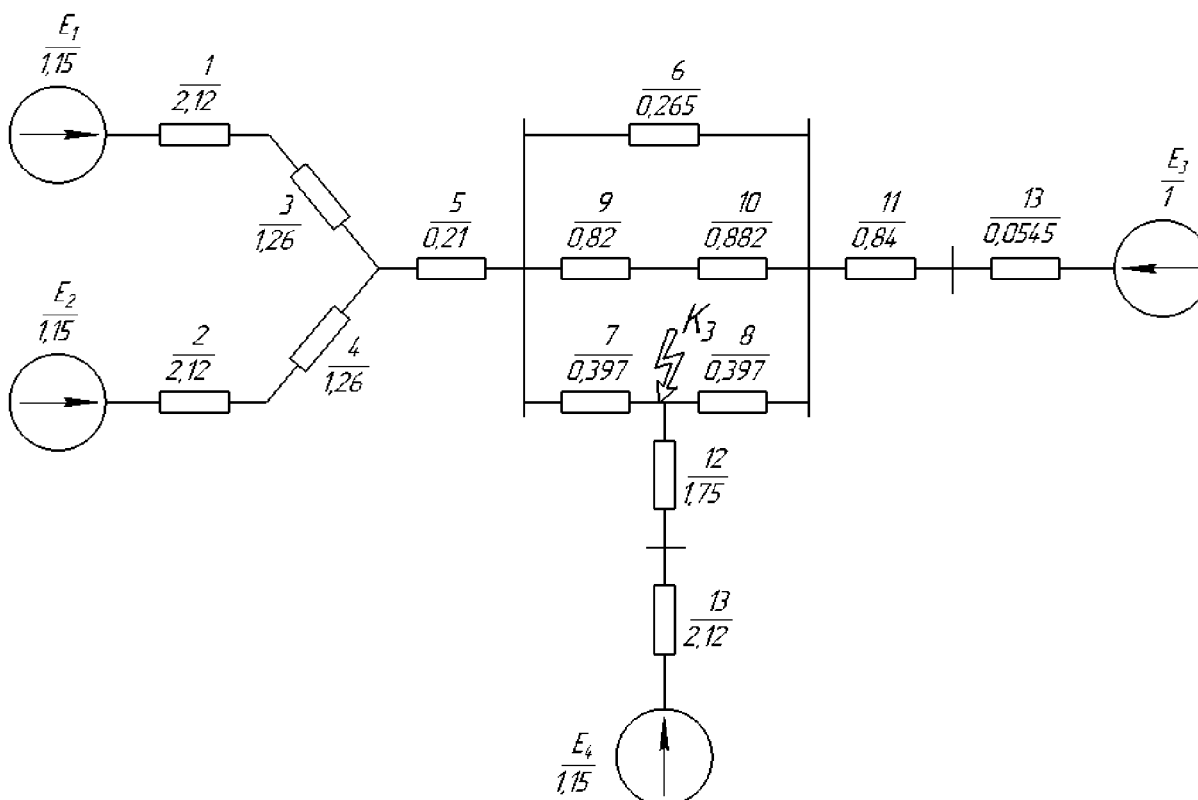
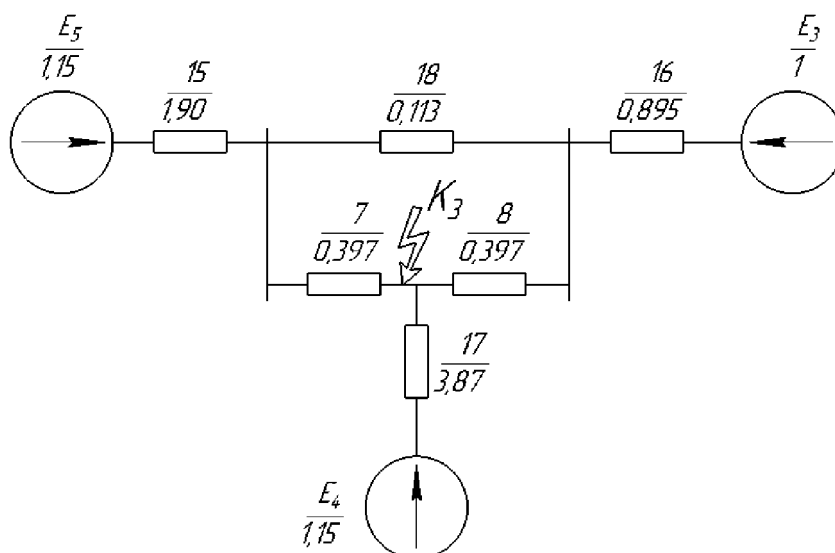
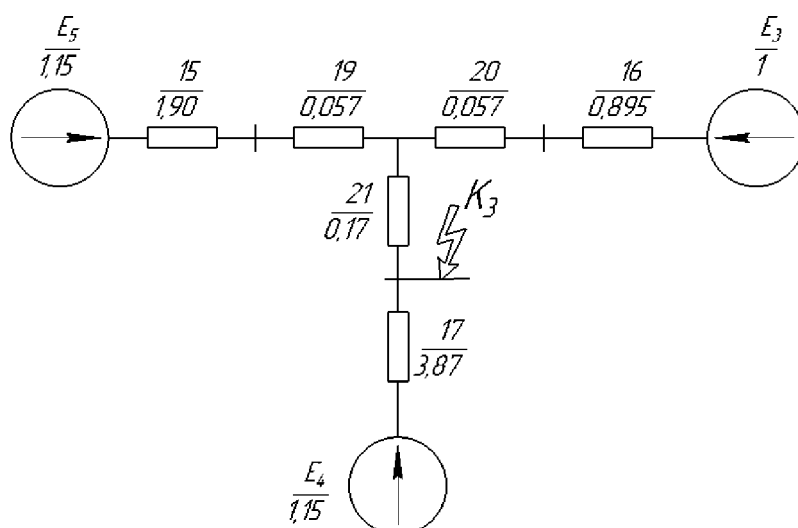


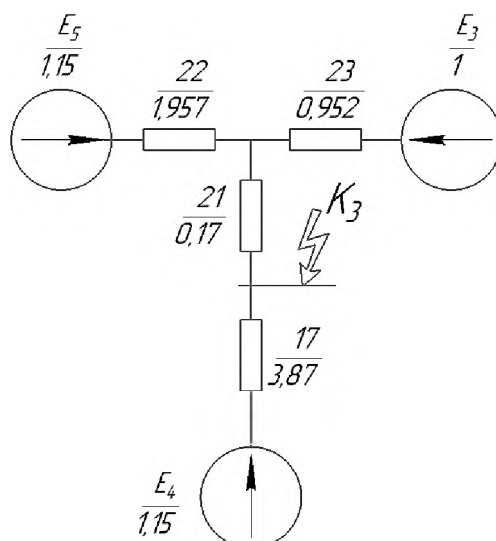
Схема заміщення електричної системи



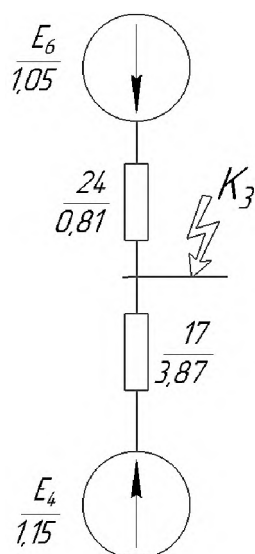
Перше перетворення схеми заміщення електричної системи



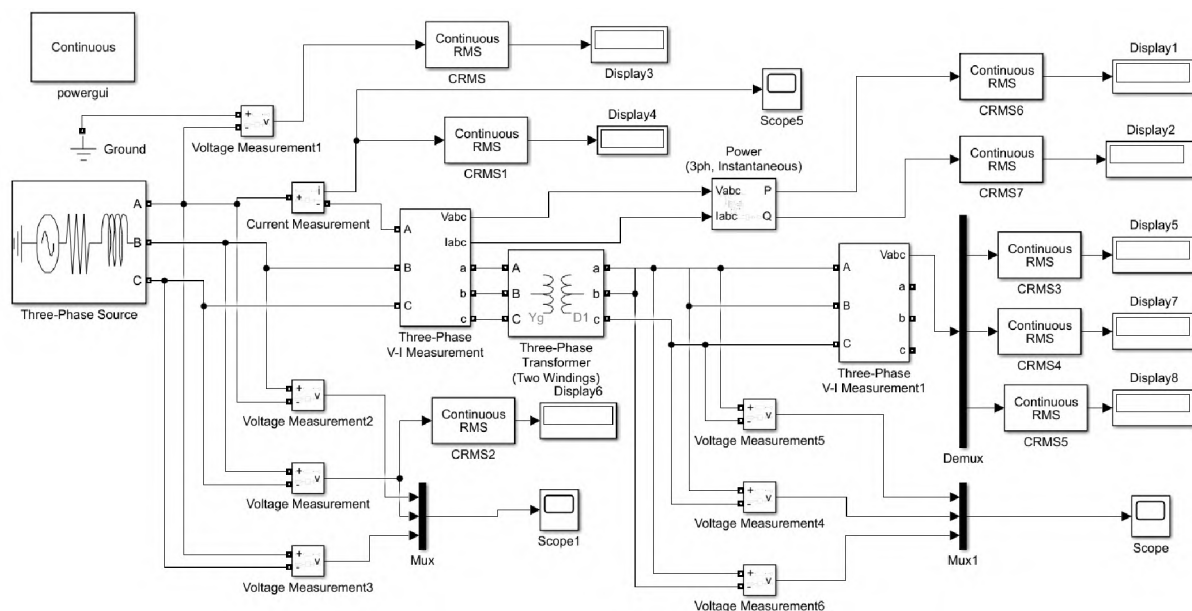
Друге перетворення схеми заміщення електричної системи



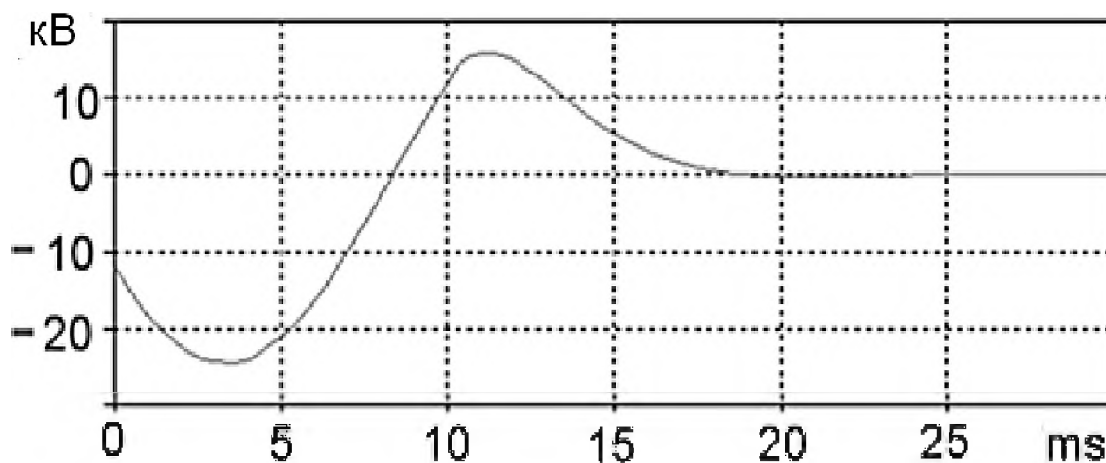
Третє перетворення схеми заміщення електричної системи



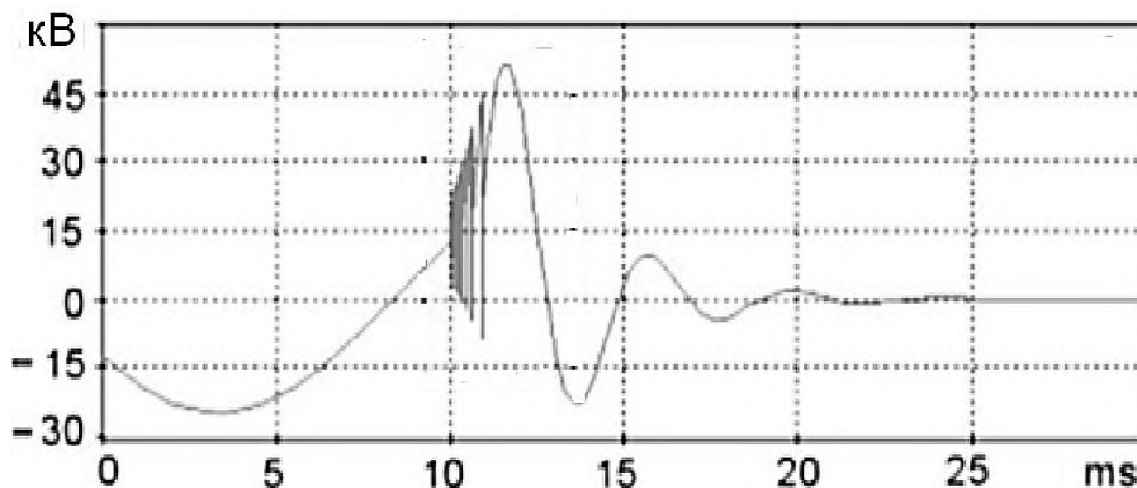
Четверте перетворення схеми заміщення електричної системи



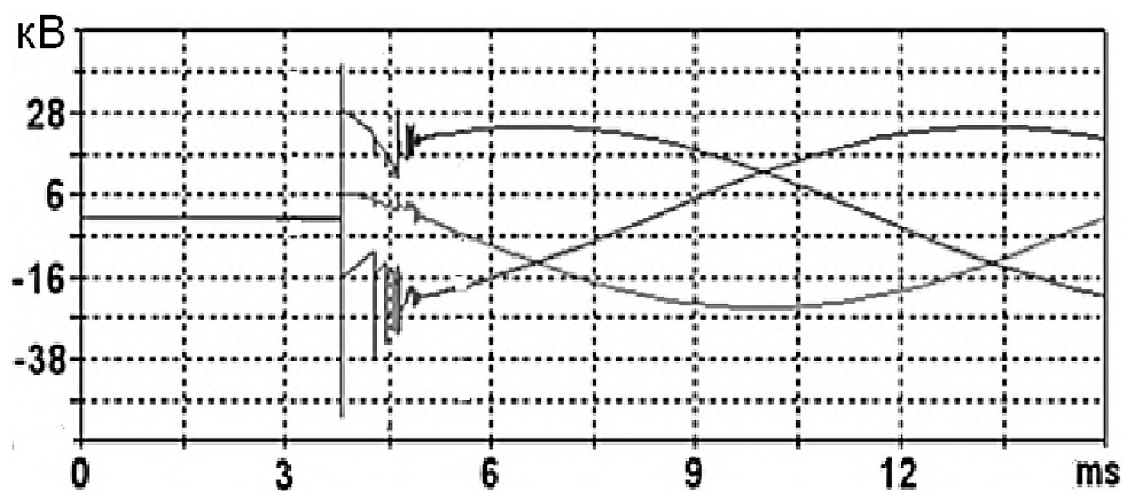
Модель для дослідження перехідних процесів у електричній мережі з визначенням впливу на роботу трансформатора



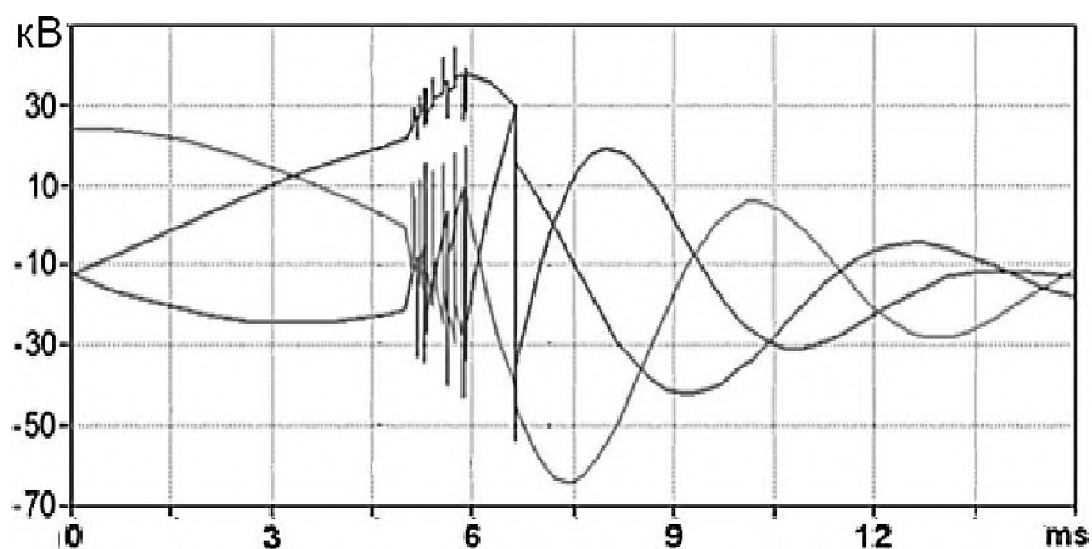
Коливання напруги на клемах трансформатора при перемиканнях вимикача (при низькій індуктивності електричного ланцюга)



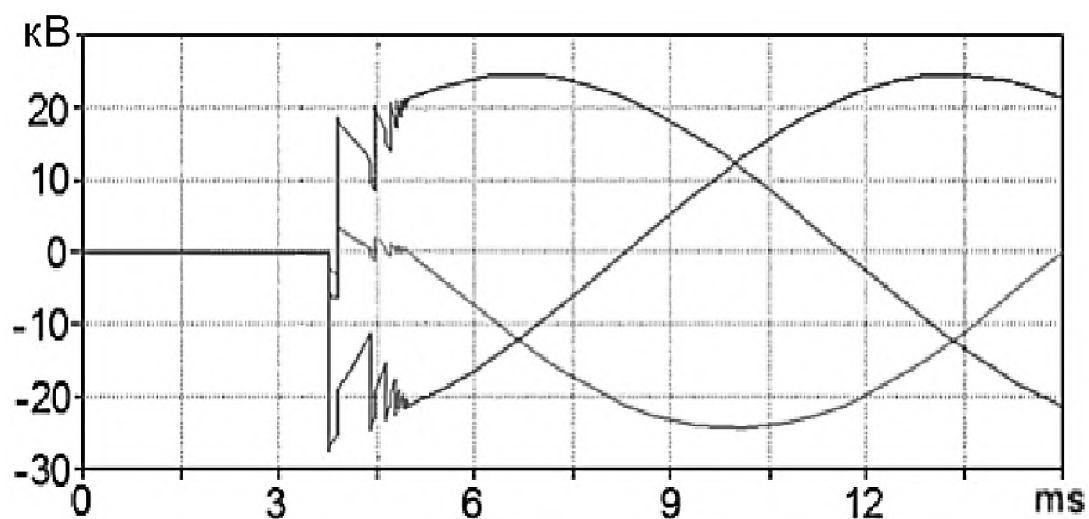
Коливання напруги на клемах трансформатора при перемиканнях вимикача (при високій індуктивності електричного ланцюга)



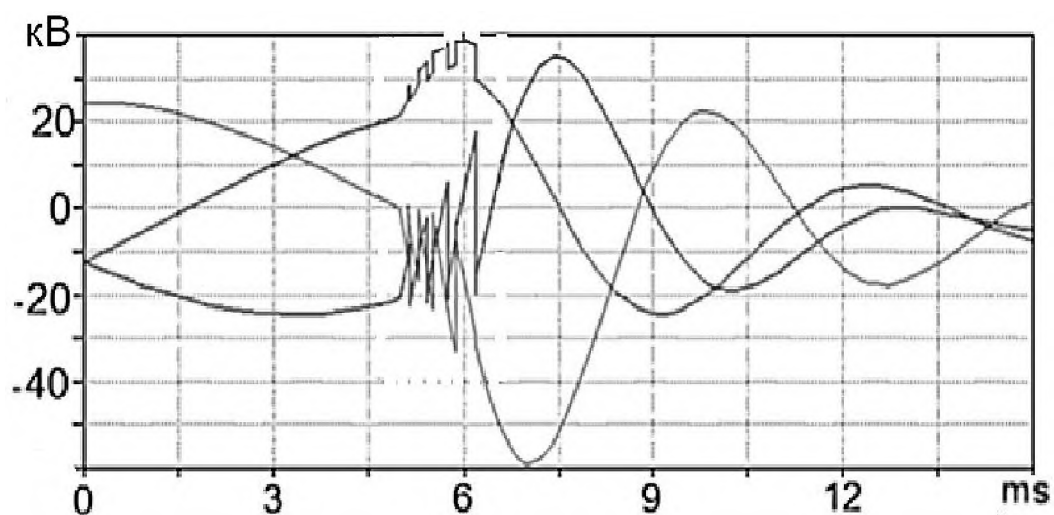
Форми хвиль напруги на клемах «незахищеного» трансформатора під час його приєднання до навантаження



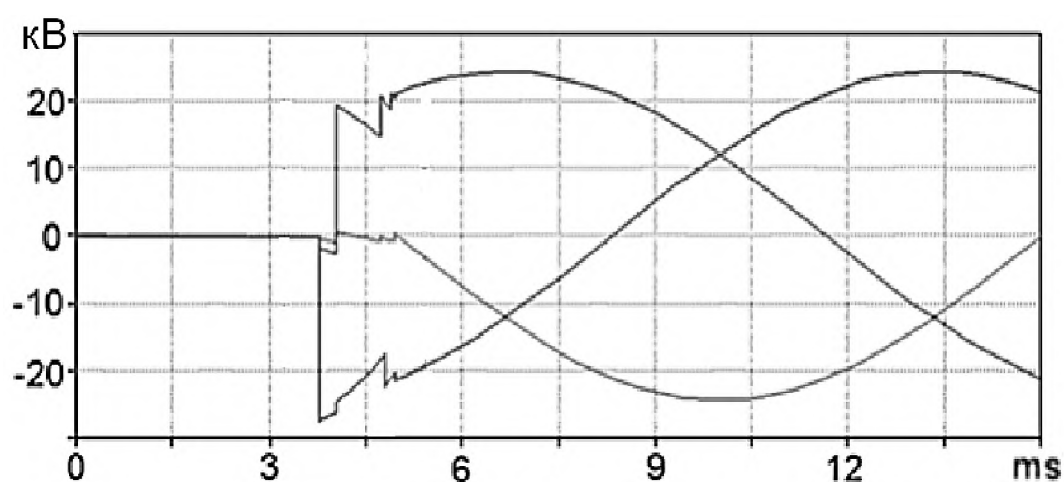
Форми хвиль напруги на клемах «незахищеного» трансформатора під час його від'єднання від мережі без навантаження



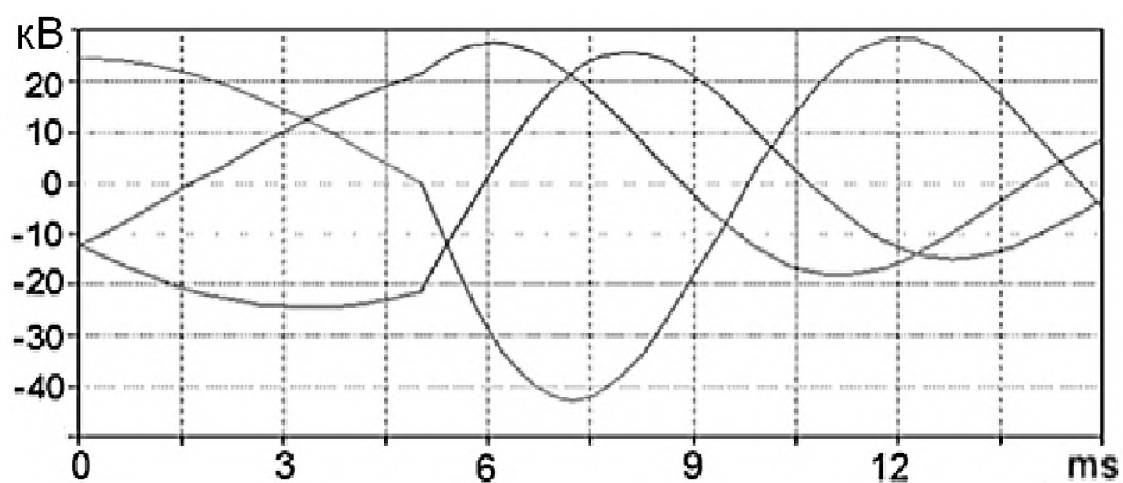
Форми хвиль напруги на клемах «захищеного» трансформатора під час його приєднання до мережі без навантаження



Форми хвиль напруги на клемах «захищеного» трансформатора під час його від'єднання від мережі без навантаження



Форми хвиль напруги на клемах «захищеного» трансформатора з використанням ємності у колі заземлення під час його приєднання до мережі без навантаження



Форми хвиль напруги на клемах «захищеного» трансформатора з використанням ємності у колі заземлення під час його від'єднання від мережі без навантаження

ДОДАТОК Б. ВИТЯГ З ГАЛУЗЕВОГО КЕРІВНОГО ДОКУМЕНТА
«ТРАНСФОРМАТОРИ СИЛОВІ. ТИПОВА ІНСТРУКЦІЯ З
ЕКСПЛУАТАЦІЇ»

4 Загальні вимоги до трансформаторних установок

4.1 Параметри трансформаторів повинні відповідати режимам роботи електричної мережі згідно з «Правилами будови електроустановок». При цьому повинні бути враховані тривалі навантажувальні режими, короточасні перевантаження і поштовхоподібні навантаження, а також можливі в експлуатації тривалі перевантаження. Ці вимоги стосуються усіх обмоток багатообмоткових трансформаторів.

4.2 Трансформатори потрібно установлювати так, щоб були забезпечені зручні та безпечні умови для нагляду:

- за рівнем масла в масловказівниках,
- за значенням тиску на манометрах герметичних вводів і маслонасосів,
- за станом приводних механізмів пристроїв РПН без знімання напруги.

Для нагляду за рівнем масла в масловказівниках повинне бути передбачене освітлення масловказівників у темний час доби, якщо загального освітлення недостатньо.

4.3 Для трансформаторів, які мають котки, у фундаментах повинні бути передбачені напрямні. Для закріплення трансформатора на напрямних повинні бути передбачені упори, які встановлюються з обох боків трансформатора.

Трансформатори вагою до 2 т, які не обладнані котками, допускається встановлювати безпосередньо на фундаменті.

На фундаментах трансформаторів повинні бути передбачені місця для установа домкратів.

4.4 Уздовж колій перекочування, а також біля фундаментів трансформаторів вагою більше 20 т потрібно передбачати анкери, за які

закріплюються лебідки, напрямні блоки, поліспасти, що використовуються під час перекочування трансформаторів у обох напрямках на власних котках. У місцях зміни напрямку руху потрібно передбачати ділянки для установалення домкратів.

4.5 На баках трифазних трансформаторів і реакторів і груп однофазних трансформаторів і реакторів зовнішнього установалення потрібно зазначати станційні та підстанційні номери і надані їм єдині диспетчерські найменування. На баки однофазних трансформаторів і реакторів повинно бути нанесено забарвлення фаз. Трансформатори та реактори зовнішнього установалення потрібно фарбувати у світлі тони фарбою без металевих наповнювачів, стійкою до атмосферних впливів і впливів масла.

4.6 За наявності перемикального пристрою для ввімкнення резервної фази кожний роз'єднувач повинен мати виразне забарвлення фаз і літерні позначення початку та кінця обмоток; потрібно вивісити чітку схему з зазначенням усіх перемикачів при використанні пристрою.

4.7 При встановленні трансформаторів та реакторів з плоскою кришкою, обладнаних газовим захистом, якщо про це зазначено в заводській документації, необхідно забезпечити нахил бака, при якому кришка і верхня частина бака мали б підйом у напрямку газового реле не менше 1-1,5 %, а маслопровід від бака до розширника – не менше 2 – 4 %. Якщо трансформатор має газовідвідний трубопровід, приєднаний до верхньої частини бака в декількох місцях по довжині бака, то нахил трансформатора по поперечній осі має бути таким, щоб місця приєднання газовідводів опинились у найвищій точці. При напівциліндричній формі верхньої частини бака газовідводи приєднуються до найвищої точки (посередині), і для таких трансформаторів нахил не вимагається. Кран, установалений на маслопроводі між газовим реле і розширником (або автоматичний клапан), під час роботи трансформатора повинен бути відкритий.

4.8 При встановленні розширника на окремій конструкції її потрібно розташовувати так, щоб не перешкоджати викочуванню трансформатора з фундаменту.

У цьому випадку газове реле потрібно розташовувати поблизу трансформатора в межах зручного та безпечного обслуговування з стаціонарної драбини. Для встановлення розширника можна використовувати портал комірки трансформатора.

4.9 Проводи вторинних кіл, приєднані до газового реле, трансформаторів струму та ін., потрібно надійно захищати від роз'їдання маслом і механічних пошкоджень.

Стаціонарні драбини для обслуговування газових реле трансформаторів і реакторів повинні бути в справному стані і забезпечувати доступ до газового реле згідно з вимогами ДНАОП 1.1.10-1.01-97.

Для контролю рівня масла в трансформаторі та реакторі на торцевій стінці розширника біля трубчастих або плоских масловказівників потрібно чітко нанести три контрольні риси, які відповідають рівням масла при усталеній температурі масла в непрацюючому трансформаторі:

мінус 45, 15, 40 °С – для класу виконання У;

мінус 60, 15, 40 °С – для класів виконання ХЛ, УХЛ

4.12 Трансформатори та реактори з масою масла 1000 кг і більше повинні працювати з постійно ввімкненою системою захисту масла від зволоження та окислення (термосифонними або адсорбційними фільтрами), і всі трансформатори повинні бути оснащені повітроосушниками або азотним, плівковим та іншим захистом від навколишнього середовища не залежно від режиму роботи трансформатора та реактора. Маслонаповнені вводи повинні працювати (зберігатись) з постійно ввімкненими пристроями захисту масла від окислення та зволоження.

4.13 Викидна (захисна) труба трансформатора не повинна бути направлена на встановлений поряд трансформатор або апарат, щоб під час викидання масла воно не потрапило на інше обладнання.

У випадку, якщо труба направлена на обладнання, що стоїть поряд, слід установити вогнестійку відбійну стінку або металевий щит між трансформатором та обладнанням.

Не допускається заміна скляної мембрани в трубі на мембрану з іншого матеріалу. Повинна бути забезпечена можливість контролю цілості мембрани при огляді трансформатора.

Повітряна порожнина викидної труби трансформаторів і реакторів, які мають газове реле, повинна мати сполучення з повітряною порожниною розширника.

4.14 Виносні охолоджувальні пристрої або пристрої охолодження системи ДЦ повинні розміщуватись так, щоб не перешкоджати викочуванню трансформатора з фундаменту і допускати проведення їх ремонту при працюючому трансформаторі. Потік повітря від вентиляторів дуття не повинен бути спрямований на бак трансформатора.

4.15 Розташування засувки охолоджувальних пристроїв повинне забезпечувати зручний доступ до них, можливість від'єднання трансформатора від системи охолодження або окремого охолодника від системи і викочування трансформатора без зливання масла з охолодників.

4.16 Охолоджувальні колонки та інше обладнання в системі охолодження Ц потрібно розташовувати в приміщенні, температура в якому має бути не нижче 5 °С.

В усіх випадках тиск масла в порожнині охолодника повинен перевищувати тиск води не менше ніж на 10 кПа (0,1 кг/см²). У необхідних випадках повинне бути передбачене опалення.

4.17 Для запобігання підвищеному нагріванню трансформатора або реактора та викликаного цим прискореного старіння їх ізоляції необхідно стежити, щоб при природній та штучній вентиляції різниця між

температурою повітря, яке надходить до трансформаторного приміщення знизу, та повітря, що виходить зверху, неперевисувала 15 °С при їх номінальному завантаженні.

У приміщеннях, де встановлено сухі трансформатори, відносна вологість повітря не повинна бути більше ніж 80 % при 25 °С.

Трансформаторні приміщення повинні утримуватись у повній справності. Через покрівлю, віконні і вентиляційні отвори до приміщень не повинні потрапляти атмосферні опади у вигляді дощу та снігу, а також дрібні тварини та птахи.

4.18 Двері трансформаторних приміщень повинні бути постійно замкнені. На дверях і в трансформаторних приміщеннях повинні бути написи, що зазначають станційні або підстанційні номери і привласнені їм одиниці диспетчерські найменування.

На дверях трансформаторного приміщення закріплюються попереджувальні плакати встановленого змісту і форми.

4.19 Нагрівання під час роботи трансформатора і реактора контролюють за температурою верхніх шарів масла, яка вимірюється манометричними термометрами, обладнаними сигнальними контактами.

При встановленні термометрів на трансформатори і реактори зовнішнього устанавлення необхідно вживати заходів щодо запобігання попаданню вологи в гільзи термометрів і пошкодження гільз при заморожуванні в них вологи.

4.20 Трансформатори із штучним охолодженням потрібно забезпечувати пристроями для автоматичного пуску та зупинки устаткування системи охолодження.

Автоматичний пуск повинен здійснюватись залежно від температури верхніх шарів масла або обмотки і, не залежно від цього – згідно із струмом навантаження трансформатора.

4.21 ШАОТ систем охолодження Д, ДЦ і Ц потрібно встановлювати за межами маслоприймача. Навішування шафи керування на бек

трансформатора допускається, якщо шафа і обладнання, що установлюється в ній, розраховані на роботу в умовах вібрації, яка виникає під час роботи трансформатора.

Трансформатори з штучним охолодженням потрібно забезпечувати сигналізацією про припинення циркуляції масла, охолоджувальної води або зупинку вентиляторів дуття, а також про автоматичне ввімкнення резервного охолодника або резервного Джерела живлення.

4.23 Навантаження двообмоткових трансформаторів потужністю 1000 кВоА і більше, за винятком установлених у трансформаторних пунктах (далі – ТП), контролюють по амперметрах, увімкнених у одну фазу, а триобмоткових трансформаторів – по амперметрах, увімкнених у кола усіх трьох обмоток у однойменну фазу.

На електростанціях і великих підстанціях для контролю за навантаженням, крім того, передбачаються ватметри активної та реактивної потужності з боку обмотки НН і СН.

4.24 Трансформатори і реактори потрібно експлуатувати з увімкненим захистом від внутрішніх пошкоджень і надмірних струмових перевантажень, а вимикальні елементи газового захисту потрібно вмикати з дією на вимкнення. При захисті трансформаторів запобіжниками розривна потужність останніх повинна відповідати потужності короткого замикання в даній точці мережі, повинна забезпечуватись селективна робота захисту.

4.25 Протипожежні засоби, якими оснащені трансформаторні установки, необхідно підтримувати у справному стані і періодично перевіряти. Станіонарні установки пожежогасіння за допомогою розпиленої води або багаторазової піни повинні мати засувки з автоматичним керуванням і включатись до роботи при спрацюванні захистів від внутрішніх пошкоджень. Дренаж і масловідводи від маслоприймальних пристроїв необхідно періодично очищати та перевіряти.

Масло, яке стікає з-під обладнання в процесі експлуатації, необхідно збирати до дренажної системи і очищати за допомогою відстійників та інших пристроїв.

Кабельні канали біля трансформаторів і реакторів зовнішнього установлення повинні бути щільно закриті і захищені від попадання масла, яке розтікається з-під трансформатора у випадку його пошкодження.

Експлуатація трансформаторів і реакторів без виконаної згідно з проектом системи пожежного водопостачання не допускається. Стационарні пристрої пожежогасіння необхідно перевіряти за графіком, затвердженим технічним керівником підприємства.

Гравійну засипку під трансформатором і реактором необхідно підтримувати в чистоті, а при засміченні або значному замаслюванні промивати або замінювати.

4.26 Запасні частини, які постачались разом з трансформатором і реактором, повинні зберігатись на складі підприємства з дотриманням правил зберігання, зазначених у супроводжувальній документації на них.

4.27 Трансформаторні та реакторні маслonaповнені вводи слід зберігати відповідно до вимог заводських інструкцій з монтажу та експлуатації вводів. За необхідності в герметичні маслonaповнені вводи під час зберігання треба доливати дегазоване масло за допомогою спеціальних пристроїв, які запобігають попаданню повітря у вводи.

4.28 Кожен трансформатор або реактор повинен мати комплект документів, які містять інформацію про його стан і умови експлуатації.

Комплект документів повинен містити:

- експлуатаційну документацію заводу-виготовлювача, яка включає паспорт трансформатора, паспорти на комплектуючі вироби, інструкції з експлуатації, необхідні рисунки;
- акти приймання і монтажу, протоколи пускових випробувань, акти капітальних ремонтів і протоколи випробувань під час ремонтів трансформатора або реактора;

- протоколи випробувань трансформаторного масла на всіх стадіях експлуатації трансформатора і аналізу газу, вилученого з нього;
- акти про аварійні пошкодження трансформатора або комплектуючих вузлів;
- місцеві інструкції з експлуатації, циркуляри, розпорядження тощо, які стосуються даного трансформатора або реактора.

Крім перелічених документів потрібно передбачати оперативну документацію, відомості розрахунків, журнали оглядів, журнали реєстрації ресурсу, журнали дефектів і т. ін.

5 Заходи безпеки під час експлуатації трансформаторів і реакторів

5.1 Монтаж, випробування, експлуатацію та ремонти трансформаторів необхідно провадити згідно з ДНАОП 1.1.10-01-97, ГОСТ 11677-85, а також НАПБ А.01.001-95.

Крім того, монтаж трансформаторів на напругу 110 кВ і вище необхідно провадити згідно з РД 16.363-87.

5.2 Під час експлуатації і випробувань трансформаторів їх баки повинні бути заземлені.

5.3 Забороняється присутність персоналу на кришці бака і підняття інструментів та інших речей на кришку бака під час роботи трансформатора.

Огляд газового реле здійснюється з майданчика драбини трансформатора.

5.4 Під час огляду працюючого трансформатора не слід знаходитись у зоні викидання масла із запобіжного клапана або викидної труби.

5.5 Забороняється наближатись до трансформатора під напругою з явними ознаками пошкодження: сторонні шуми, розряди на ізоляторах, сильна (струменем) течя масла і т. ін.

5.6 Забороняється підтягувати кріплення на працюючих маслоохолодниках системи охолодження типу Ц (НЦ).

5.7 Щоб уникнути опіків, не дозволяється торкатись оголеними руками поверхні працюючих електронасосів.

5.8 Забороняється рукояткою перемикати пристрої РПН трансформатора, який знаходиться під напругою з будь-якого боку.

5.9 При працюючому трансформаторі затискачі вторинних обмоток вбудованих трансформаторів струму повинні бути замкнені накоротко за допомогою спеціальних перемичок в чопобі затискачів або приєднанням вторинних кіл пристроїв захисту, електроавтоматики та вимірювань. При цьому забороняється розривати кола, підключені до вторинних обмоток трансформаторів струму, без попереднього замикання обмоток перемичкою.

5.10 Засоби пожежогасіння трансформатора необхідно підтримувати в постійній готовності. Протипожежні заходи повинні бути розроблені з урахуванням загальних і місцевих правил та інструкцій із залученням спеціалістів з протипожежної безпеки. Особливу увагу забезпеченню пожежної безпеки необхідно приділяти під час проведення ремонтних, зварювальних робіт і робіт із заміни, доливання та очищення масла.

5.11 Зварювальні роботи на непрацюючому трансформаторі, за необхідності, потрібно виконувати тільки після заливання його маслом до рівня 200 – 250 мм вище місця зварювання, щоб уникнути займання парів масла.

Під час проведення зварювальних робіт, з метою усунення течі масла в трансформаторі, необхідно створити вакуум, який забезпечує припинення течі масла в місці зварювання.

5.12 Забороняється здійснювати зварювальні роботи при працюючому обладнанні в приміщенні розташування системи охолодження типу Ц (НЦ) і на вузлах системи охолодження з наднормальним внутрішнім тиском.

5.13 Для виконання монтажних або ремонтних робіт усередині бака трансформатора необхідно продути бак сухим чистим повітрям і забезпечити природну вентиляцію відкриттям верхніх і нижніх люків. У процесі виконання робіт необхідно здійснювати безперервний контроль за людьми, які знаходяться всередині бака трансформатора.

5.14 Під час подавання в бак трансформатора, в якому працюють люди, осушеного повітря необхідно забезпечити працюючих теплим і чистим спецодягом і не допускати їх знаходження всередині бака більше 4 год на добу і 20 год на місяць.

5.15 Під час заповнення трансформатора маслом або під час його зливання бак трансформатора і виводи його обмоток, у випадку, якщо встановлені вводи, повинні бути заземлені, щоб уникнути появи електростатичних зарядів.

5.16 Необхідно уникати попадання масла і особливо його тривалого впливу на шкіру.

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____