

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний факультет

(повне найменування факультету)

Електричних та електронних апаратів

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Моделювання однофазної електромагнітної частини

керованого шунтувального реактора 180 МВАр, 500 кВ»

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи Е-812 м

Спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електромеханічне обладнання

енергоємних виробництв

НОВІКОВ В. О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ЖОРНЯК Л.Б.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент БЕМЗА В. А.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(вогне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Електротехнічний факультет
 Кафедра Електричних та електронних
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Електромеханічне обладнання енергоємних
(назва освітньої програми (спеціалізації))
виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

Петро АНДРІЄНКО

« 15 » грудня 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

НОВІКОВ Владислав Олександрович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Моделювання однофазної електромагнітної частини
керованого шунтувального реактора 180 МВАр. 500 кВ

керівник проекту (роботи) к. т. н., доцент ЖОРНЯК Людмила Борисівна

(науковий ступінь, ім'я звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 01 » листопада 2023 року № 407

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 30 листопада 2023 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Номинальна потужність 60 МВАр. Виконання

електромагнітної частини – однофазне. Напряга мережевої обмотки $500\sqrt{3}$ кВ.

Найбільша робоча фазна напряга $525\sqrt{3}$ кВ. Номинальний струм при мережевої робочій

нарузі 198 А. Клас напруги нейтралі 35 кВ. Тип охолодження - ДЦ

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. 1 Аналіз процесів, що відбуваються в електричній

частині керованих підмагнічуванням реакторів. 2 Огляд існуючих конструкцій КШР.

3 Типи шунтувальних реакторів, що використовуються в енергетичних системах.

4 Вибір та розрахунок керованого реактора однофазного 60 МВАр. 500 кВ.

5 Моделювання електромагнітних перехідних процесів однофазного шунтувального

реактора 60000/500. Висновки. Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Обмотка керування реактору КО Складальне креслення – А1, 1 лист

Обмотка мережева реактору МО Складальне креслення – А1, 1 лист

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	ЖОРНЯК Л. Б., доцент		

7. Дата видачі завдання « 02 » жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН



№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування магістерської роботи	02.10.2023	
2	Попередній розрахунок головних елементів апарата	16.10.2023	
3	Повірний розрахунок з висновками про роботоспроможність елементів апарата	23.10.2023	
4	Виконання загального виду виробу, робочих креслень головних вузлів та деталей апарата	31.10.2023	
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки магістерської роботи	07.11.2023	
6	Узгодження проекту з керівником	13.11.2023	
7	Перевірка керівником пояснювальної записки магістерської роботи на антиплагіат	27.11.2023	
8	Нормоконтроль та затвердження завідувачем кафедри	30.11.2023	
9	Рецензування магістерської роботи	04.12.2023	
10	ЗАХИСТ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ	11.12.2023	
11	Здача магістерської роботи до репозиторію	15.12.2023	

Студент(ка)

_____ Владислав НОВІКОВ _____
(підпис) (ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

_____ Людмила ЖОРНЯК _____
(підпис) (ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 98 с., 10 таблиць, 33 рисунка, 73 джерела.

КЕРОВАНІЙ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУВАЛЬНИЙ РЕАКТОР, МЕРЕЖА, КЕРУВАННЯ, КОМПЕНСАЦІЯ, ПОТУЖНІСТЬ, ТРАНСФОРМАТОР, ОБМОТКА, МАГНІТОПРОВІД, БАК, ТРАНСФОРМАТОРНА ОЛИВА

На теперішній час виникли об'єктивні передумови для відновлення та розвитку електроенергетики України у ХХІ столітті на новій технологічній основі, тобто переходу до нового розвитку шляхом створення інтелектуальної енергосистеми з активно-адаптивною електричною мережею, що побудована на концепції Smart Grid («розумні мережі») [1, 3, 4, 7, 9, 18, 28, 37, 41]. Відомо, що розвиток електроенергетики в передових країнах світу супроводжується інтенсивним пошуком нових технологій для вирішення проблеми подальшого підвищення ефективності роботи магістральних електричних мереж з метою оптимального розподілу потоків потужності об'єднаної енергосистеми. У США, Індії, Європейському Союзі, Канаді, Китаї концепція Smart Grid і є по суті державною політикою технологічного розвитку електроенергетики майбутнього [37, 41, 48, 49, 60, 68].

Таку ж політику почала реалізовувати Україна для міжсистемних ліній електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН) 500...750 кВ, що утворюють магістральні електричні мережі. У таких сучасних умовах експлуатації електроенергетичної галузі необхідно застосовувати технічні засоби регулювання реактивної потужності, що на відміну від застарілих концепцій [6, 9, 10, 11] дали б змогу підвищити пропускну здатність ЛЕП НВН. Результати, наведені в публікаціях [9, 18, 28], вказують на те, що застосування керованих шунтувальних реакторів (КШР) у ЛЕП НВН призводить до більш ефективної експлуатації магістральних електричних мереж.

Керовані підмагнічуванням шунтувальні реактори (КПШР) знаходять все більш широке застосування в енергосистемах України та за кордоном.

Основне призначення таких реакторів – це плавне регулювання реактивної потужності задля підтримки заданого рівня напруги без комутацій реакторних вимикачів. КППР, що встановлені на повітряних лініях електропередавання, забезпечують обмеження вимушеної складової напруги на лінії при її односторонньому включенні. КППР, що встановлені на лініях електропередавання великої протяжності, дозволяють підвищити межу активної потужності, що передається, за умовою статичної стійкості [2, 3, 4, 7, 9, 15, 18, 28].

На теперішній час все більш широке застосування в електричних мережах високої напруги знаходять КППР з граничним насиченням магнітного кола. Це пояснюється їх унікальними можливостями та високими техніко-економічними показниками. Плавність і великий діапазону регулювання цих реакторів при низькому рівні нелінійних спотворень і простоті експлуатаційного обслуговування дозволяє по новому і набагато ефективніше вирішувати проблеми компенсації ємнісних струмів однофазного замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю, забезпечувати регулювання реактивної потужності, підтримання рівня напруги і зменшення втрат.

Актуальність магістерської роботи пояснюється тим, що питання регулювання перетоків реактивної потужності та підтримки допустимого рівня напруги особливо загострилися в останні роки в енергосистемах України, а створення комп'ютерної моделі керованого реактора дозволяє ще на стадії проектування проаналізувати його поведінку в симетричних та несиметричних перехідних та усталених режимах роботи, оцінити швидкодію, виявити особливості проведення комутаційних операцій спільно з лініями електропередавання, знайти оптимальні алгоритми керування потужністю КППР.

Об'єкт дослідження – характеристики електромагнітної частини керованого шунтувального реактора в електричних мережах.

Предмет дослідження – однофазна електромагнітна частина керованого шунтувального реактора 180 МВАр, 500 кВ.

Мета роботи – дослідження можливостей підвищення надійності роботи керованих підмагнічуванням шунтувальних реакторів на етапі проектування за рахунок поєднання теоретичних і чисельних методів при розробці, розробленні конструкції пристрою компенсації реактивної потужності зовнішньої установки з природною циркуляцією масла, визначення масо-габаритних розмірів всього пристрою в цілому, до складу якого входять електромагнітна частина, трансформатор з тиристорним перетворювачем, система керування, регулювання, захисту та автоматики. А також розробка способу більш ефективного використання КППР в електричній мережі на основі його математичного моделювання для дослідження комутаційних і динамічних режимів роботи КППР в складі електроенергетичної системи.

Метод дослідження – теоретичні дослідження базуються на основних положеннях теорії електромагнітного поля, електричних та магнітних кіл, основних законах електротехніки, а також на теорії диференціальних рівнянь та комп'ютерного моделювання.

Публікації: 1) Новіков, В. О. Аналіз конструктивних методів підвищення роботоздатності високовольтних вводів вимірювальних трансформаторів [Електронний ресурс] / Є. М. Гавріков, В. О. Новіков, О. І. Сьотка, І. М. Чабан // Тиждень науки-2023. Електротехнічний факультет Тези доповідей науково-технічної конференції, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р. [Електронний ресурс] / Редкол.: Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – С. 160 – 162. – Режим доступу: https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2023/conf/4.1/TN-2023-ETF.pdf.

2) Новіков В. О. Аналіз конструктивних методів підвищення роботоздатності високовольтних вводів вимірювальних трансформаторів // Тиждень науки-2023. Електротехнічний факультет, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р.: доповідь. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ.....	2
РЕФЕРАТ.....	4
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ ЧАСТИНІ КЕРОВАНИХ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ РЕАКТОРІВ.....	12
1.1 Основні види пристроїв компенсації реактивної потужності.....	15
1.1.1 Види та класифікація реакторів енергетичного призначення.....	16
1.1.2 Схемні рішення та компонування обладнання.....	18
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КШР.....	34
3 ТИПИ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	48
4 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК КЕРОВАНОГО РЕАКТОРА ОДНОФАЗНОГО 60 МВАр 500 кВ.....	64
4.1 Методика розрахунку параметрів реактора	64
4.2 Розрахунок параметрів реактора.....	66
4.2.1 Розрахунок індуктивності реактора.....	66
4.2.2 Розрахунок основних розмірів реактора.....	66
4.2.3 Розрахунок параметрів режиму короткого замикання.....	72
4.2.4 Розрахунок динамічної стійкості обмоток при короткому замиканні.....	76
5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ОДНОФАЗНОГО ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА 60000/500.....	80
ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	93

ВСТУП

Системи електропередавання у всьому світі відчувають денні або сезонні зміни навантаження. Регульовані шунтувальні реактори дозволяють вирівнювати напругу в міру зміни навантаження у часі. Вони дозволяють уникнути непотрібні включення та відключення реакторів з фіксованими параметрами, що усуває небезпечні стрибки напруги. Регульований реактор завжди можна адаптувати до певних потреб, як у поточній роботі, так і для майбутньої мережі. Більше того, для оптимізації роботи системи регульовані шунтувальні реактори можуть взаємодіяти з іншими системами, такими як лінії передавання із статистичними компенсаторами VAR (SVC) та лінії передачі високої напруги постійного струму (HVDC). Таким чином, регульовані шунтувальні реактори є економічними засобами покращення стабільності напруги та якості електроенергії в умовах мінливого в часі навантаження [1, 3, 4, 7, 9, 18, 28].

Результати, наведені в публікаціях [9, 18, 28], вказують на те, що у всьому світі в даний час в електричних мережах високої напруги для керування потоками електричної енергії в нормальних та аварійних режимах роботи енергосистеми велике поширення набули шунтувальні реактори (ШР) та керовані шунтувальні реактори (КШР). ШР встановлюють зазвичай у мережах високої напруги для компенсації постійної зарядної потужності у лінії. КШР встановлюють у мережах зі змінною реактивною потужністю.

У лініях електропередавання внаслідок наявності ємності між лініями та землею утворюється реактивна потужність. Реактивну потужність не можна використовувати, її необхідно компенсувати скорочення втрат енергії [18, 19, 32].

Шунтувальні реактори поглинають реактивну потужність, збільшуючи цим енергоефективність системи. При низьких навантаженнях напруга збільшується вздовж лінії електропередавання. Шунтувальний реактор знижує

підвищення напруги, утримує його в необхідних межах, що сприяє стабільності напруги в системі.

Регульовані реактори шунтування (VSR) можуть використовуватися як універсальний резерв, якщо їх встановити у різних місцях у великих мережах електропередавання.

Використання шунтувальних реакторів є найбільш компактним та економічно ефективним способом компенсації реактивної потужності у високовольтних лініях електропередавання (ЛЕП) та в кабельних системах. Вони можуть використовуватися постійно для стабілізації передавання електроенергії або включатись в умовах низького навантаження тільки для контролю рівня напруги.

Шунтувальні реактори застосовуються в мережах вищих класів напруги для компенсації зарядної потужності. ШР та КШР відрізняються зазвичай будовою обмоток та їх кількістю. Для ШР достатньо основної обмотки – мережевої обмотки, в той час як в КШР використовується ще й керуюча обмотка (підмагнічувальна), яка дозволяє плавно регулювати індуктивність реактора, також в 3-фазних реакторах може бути і компенсаційна обмотка.

На даний час розвиток електроенергетики характеризується використанням керованих (гнучких) електричних мереж зі змінним навантаженням, а також вітрових та сонячних електростанцій зі змінними режимами генерації. Це вимагає розробки та впровадження нового керованого силового обладнання, що дозволяє змінювати свої характеристики в процесі роботи, впровадження інформаційних технологій та мікропроцесорних систем для керування, моніторингу та захисту цього обладнання. До такого обладнання належать спеціальні компенсатори реактивної потужності:

- керовані шунтувальні реактори (КШР),
- статичні тиристорні компенсатори (СТК);
- тиристорно-реакторні групи (ТРГ).

У багатьох випадках при швидких змінних навантаженнях та змінних потоках реактивної потужності, застосування керованих шунтувальних

реакторів (КШР), що використовують механічну дискретну комутацію вимикачів або вбудованих перемикачів, забезпечує необхідну оперативність регулювання та знижує надійність керування. Діапазон регулювання напруги у таких реакторах не перевищує зазвичай 30%, а час перемикання з одного положення ступеню на іншу становить 5-6 секунд.

В енергосистемах світу набувають поширення пристрої FACTS – кероване обладнання для електричних мереж змінного струму. Застосування пристроїв FACTS дозволяє оперативно керувати та перерозподіляти потоки активної та реактивної потужності. При цьому, крім виконання своїх прямих функцій, забезпечується вирішення низки додаткових завдань, включаючи підвищення надійності роботи електроенергетичних систем та зниження втрат електроенергії. В умовах функціонування ринків електроенергії та появи великої кількості енергопередавальних та енергорозподільчих компаній оптимальність ведення електричних режимів та ефективність роботи електротехнічного обладнання, як і раніше, залишається важливим фактором їх конкурентоспроможності.

Електромагнітні реактори призначені для використання у повітряних лініях електропередачі традиційного конструктивного виконання та підвищеної натуральної потужності, у розподільчих електромережах та в системах електропостачання промислових підприємств. Реактори як засіб автоматичного регулювання реактивної потужності, застосовують для керування режимами електроенергетичних систем з метою вирішення наступних завдань: компенсація надлишкової зарядної потужності ЛЕП та підвищення їх пропускної спроможності; обмеження комутаційних перенапруг; обмеження струмів короткого замикання; зменшення коливань напруги; раціональне розподілу напруги і струму в ЛЕП тощо.

Активна частина реакторів виготовляється на базі магнітопроводів трансформаторного типу або за типом магнітопроводів електричних машин змінного струму, але з нерухомим внутрішнім сердечником (названим за

аналогією «ротором»). Основними обмотками є трифазна робоча обмотка і обмотка управління постійного струму.

У реакторах використовується сильне магнітне насичення електротехнічної сталі магнітопроводу. Робочий діапазон значень магнітної індукції реакторів знаходиться за «коліном» кривої намагнічування сталі. У реакторах значні витіснення та розсіювання магнітного поля. Характеристики є реакторів суттєво нелінійними.

Дослідження та оптимізація пристрою реакторів та їх режимів роботи мають бути виконані відповідно до створених математичних моделей, реалізованих з використанням чисельних методів і комп'ютерних технологій.

Метою даної магістерської роботи є дослідити та моделювання електромагнітної частини однофазного шунтувального реактора 180 МВАр 500 кВ.

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ ЧАСТИНІ КЕРОВАНИХ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ РЕАКТОРІВ

Електропередавання зазвичай проектується, виходячи з міркувань встановленого економічним аналізом перетікання потужності, при цьому перевіряється можливість її перевантаження. Крім того, визначаються умови роботи передавання в після аварійному режимі, коли в результаті аварії можуть бути відключені або одна з ділянок її ланцюгів, або одна з ділянок на паралельних колах, або одна з груп трансформаторів, що паралельно працюють.

За тривалими нормальними та післяаварійними режимами визначаються основні показники роботи електропередавання розраховується його статична стійкість, визначаються втрати потужності та енергії. Однак, крім тривалих режимів, в електропередачі можуть існувати нетривалі режими. Ці режими не можуть вважатися аварійними, тому що мають місце на непошкодженій лінії, при обладнанні, що знаходиться в нормальному стані. Але вони водночас і є нормальними, тому правильніше назвати їх особливими режимами [8, 19, 30, 32, 39].

Особливим досить тривалим режимом може бути режим при відключенні однієї з фаз лінії або трансформатора, коли має місце робота «на двох фазах» або «на п'яти фазах». До особливих відносяться також режими дуже великих перевантажень і форсувань, режими асинхронного ходу, коли генератор, що «випав» з синхронізму, або група генераторів, що працюють як асинхронні, видають активну потужність і споживають деяку реактивну потужність. Сюди варто віднести режими ресинхронізації, коли генератори, що «випали» з синхронізму, без відключення втягуються в синхронізм. Особливими є режими роботи мало завантажених ліній або режими, коли лінії працюють абсолютно без навантаження – «на холостому ходу», а також і режими самозбудження генераторів, синхронних двигунів, компенсаторів та

асинхронних машин. Незважаючи на відносну короткочасність, такі режими можуть мати важливе значення для роботи електропередавання.

Останнім часом суттєво збільшилося споживання реактивної потужності як електроприймачами промислових підприємств через недостатнє використання компенсуючих пристроїв, так і комунально-побутовими споживачами внаслідок масового поширення таких типів електроприймачів, як комп'ютерна техніка, мікрохвильові печі, пральні машини тощо. За деякими оцінками, загальне споживання реактивної потужності наблизилося до 1 кВАр на 1 кВт активної потужності [30, 32, 69, 73]. Негативні наслідки передачі таких обсягів реактивної потужності від електростанцій до вузлів споживання загальновідомі — це й додаткові втрати активної потужності та зниження пропускної спроможності розподільчих мереж. Відомо також, що втрати реактивної потужності у трансформаторах становлять у середньому (30...40) % реактивної потужності навантаження на шинах 6...10 кВ. У розподільчих лініях від 35 кВ до 110 кВ втрати становлять (10...20)% реактивної складової навантаження на шинах цих ліній [2]. Таким чином, сумарні втрати реактивної потужності в розподільчій мережі можуть становити від 40 % до 60 % загального обсягу реактивної потужності, що передається.

Розподільна мережа з точки зору фізики процесів пов'язана з неминучим утворенням магнітних полів навколо фазних проводів розподільчих ліній та обмоток розподільчих трансформаторів, і є таким самим споживачем реактивної потужності, як і решта електроприймачів, що мають активно індуктивний характер. Тому широко поширений термін «втрати реактивної потужності» не можна вважати абсолютно коректним, оскільки так звані «втрати» не є безповоротними і можуть бути компенсовані.

Варто додати, що навіть повна компенсація реактивної потужності на шинах (переважно 0,4 кВ) споживачів не забезпечує компенсації втрат реактивної потужності у розподільчій мережі. Ця обставина робить правомірною постановку завдання компенсації реактивної потужності як

електроприймачів, підключених до розподільної мережі, а також реактивної потужності, що споживається власне розподільними лініями і трансформаторами.

На теперішній час основним навантаженням електричних мереж енергоємних виробництв переважно є асинхронні двигуни, різні розподільні або перетворювальні трансформатори, напівпровідникові перетворювальні апарати тощо. Подібне навантаження в процесі роботи є споживачем реактивної потужності, яка, витрачається на створення електромагнітних полів і створює додаткове завантаження обладнання для виробництва, передачі та розподілу електроенергії.

Різкозмінний характер споживання електроенергії супроводжується коливаннями напруги у вузлах навантаження [2, 3, 6, 71]. Використання навантаження з нелінійною вольт-амперною характеристикою супроводжується генерацією несинусоїдальних спотворень в мережу живлення, що негативно впливають на все електрообладнання енергетичного об'єкта:

- підвищене нагрівання апаратури передавання та розподілу електроенергії, збільшення активних втрат у провідникових та діелектричних матеріалах;
- вібрації, нестабільна робота двигунів;
- хибні спрацьовування пристроїв РЗ і А;
- електромагнітні перешкоди в апаратурі вимірювання та пристрої керування;
- несанкціоноване спрацьовування комутаційної апаратури;
- можливість виникнення резонансних явищ при компенсації реактивної потужності.

1.1 Основні види пристроїв компенсації реактивної потужності

Компенсуючі пристрої – це пристрої, призначені для досягнення необхідних параметрів реактивної потужності в мережі [2, 3, 48, 62, 64, 66].

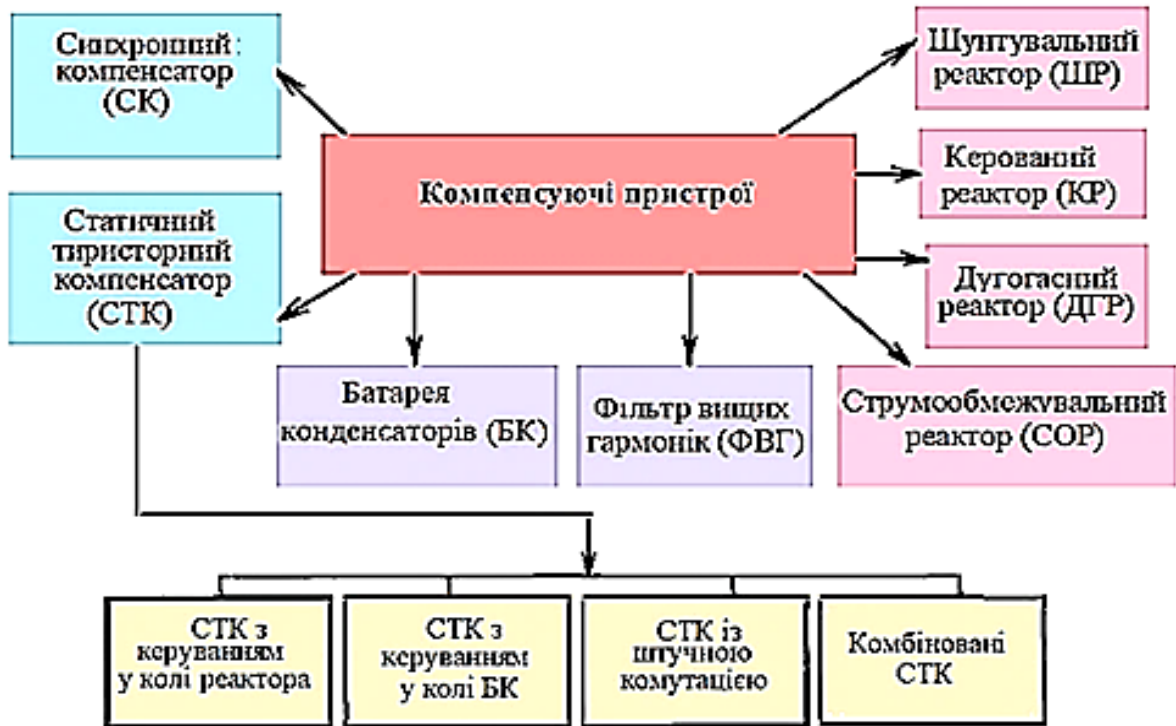


Рисунок 1.1 – Основні види пристроїв компенсації реактивної потужності

Основними технічними засобами, за допомогою яких здійснюється компенсація реактивної потужності на промислових підприємствах, є статичні конденсатори, синхронні двигуни, синхронні компенсатори, компенсаційні перетворювачі.

Синхронні компенсатори призначаються для компенсації коефіцієнта потужності мережі та підтримання нормального рівня напруги мережі у районах зосередження споживчих навантажень.

1.1.1 Види та класифікація реакторів енергетичного призначення

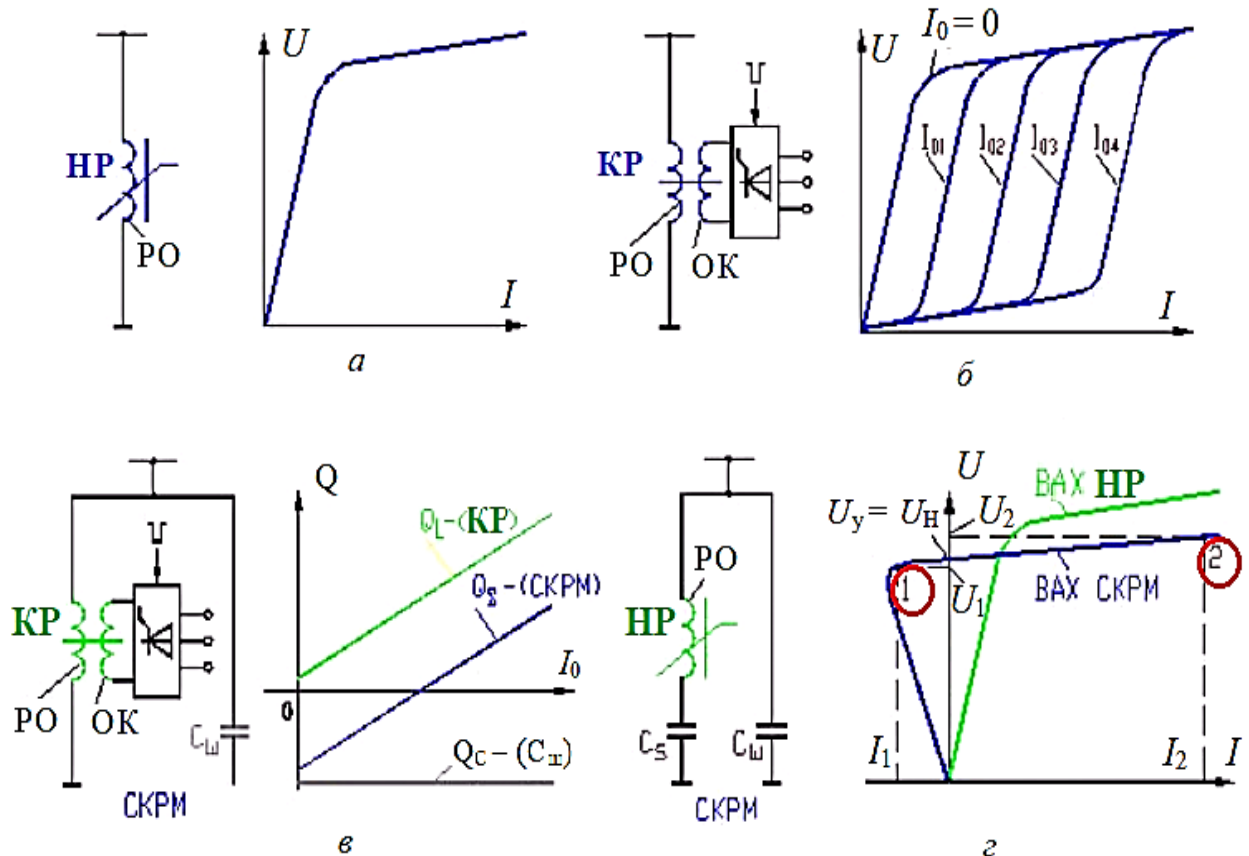
Головними електричними апаратами керування режимами електропередавання є електричні реактори енергетичного призначення [2, 3, 11, 13, 18, 19, 71].

Реактори енергетичного призначення складаються з двох головних частин: однієї або декількох обмоток та магнітної системи з магнітопроводом. Згідно вигляду вольт-амперної характеристики розрізняють такі типи енергетичних реакторів [2, 3]:

- нерегульовальні шунтувальні реактори (НР) з лінійною характеристикою (рисунку 1.2, а);
- реактор з нелінійною характеристикою або реактор з насиченням (КР) (рисунку 1.2, б);
- тиристорно-керовані реактори з сімейством лінійних характеристик (КР) (рисунку 1.2, в);
- тиристорно-керовані реактори з сімейством нелінійних характеристик;
- тиристорно-керовані реактори (НР) з насиченням (рисунку 1.2, г).

На рисунку 1.2 показано умовне графічне позначення і вольт-амперні характеристики (ВАХ) реактора, що насичується (а) і керованого реактора (б), статичних компенсаторів реактивної потужності (СКРМ), що складаються з паралельно вмикаємих конденсаторних батарей і керованого реактора (рисунку 1.2, в) або реактора, що насичується (рисунку 1.2, г) в якості регульовального елемента СКРМ. Вольт-амперні характеристики КР та НР, що використовуються у СКРМ, показані на рисунку 1.2, в та г. Типова ВАХ самого СКРМ, реалізованого на основі НР, впливає, що в межах власної робочої характеристики СКРМ здатний регулювати напругу в точці підключення. СКРМ близький за своїм принципом роботи до синхронного компенсатора, але йому не властива механічна інерція, і його швидкодія значно більша (рисунку 1.2, в).

СКРМ, виконані на основі НШР, застосовуються для керування режимами енергосистем з метою вирішення таких завдань, як регулювання напруги, підвищення пропускної спроможності діючих та новозбудованих систем електропередавання, обмеження перенапруги та коливань напруги тощо.



- а – реактора, що насичується (НР); б – керованого реактора (КР);
 в – статичний компенсатор реактивної потужності реактора (СКРМ) на базі керованого реактора (КР); г – статичний компенсатор реактивної потужності реактора (СКРМ) на базі реактора, що насичується (НР);
 РО – робоча обмотка; Q – реактивна потужність реактора; I_0 – струм підмагнічування.

Рисунок 1.2 – Умовне графічне позначення та вольт-амперні характеристики енергетичних реакторів [3]

Вольт-амперна характеристика СКРМ, наведена на рисунку 1.2, г має деякий «статизм» (статичність), під яким розуміється співвідношення між зміною напруги та зміною струму в регульовальному діапазоні компенсатора (ділянка ВАХ, що проходить між точками 1 і 2).

1.1.2 Схемні рішення та компонування обладнання

Процес впровадження електромережевого обладнання завжди пов'язаний з виконанням ряду проєктних завдань, і керовані шунтуючі реактори не є винятком. При обґрунтуванні вибору необхідної потужності УШР вирішуються питання забезпечення якості напруги в вузлах електричної мережі, оптимізації перетікань реактивної потужності, мінімізації втрат потужності, підвищення пропускної спроможності ліній електропередачі, статичної та динамічної стійкості. Після їх розгляду та визначення необхідної потужності компенсуючих пристроїв перед проєктувальником порушується питання розміщення обладнання на території підстанції та підключення його окремих блоків. Розглянемо докладніше схемні та компонувальні рішення, що застосовуються при проєктуванні установки КШР на підстанціях.

Комплекс КШР серії РТУ складається із трьох основних частин [2, 3]:

- електромагнітна частина (ЕМЧ) реактора типу РТДУ або РОДУ (рисунок 1.3);
- трансформатори з напівпровідниковими перетворювачами (ТМП) (рисунок 1.4);
- система автоматичного керування (САК) (рисунок 1.5).

ЕМЧ схожа зі звичайними силовими трансформаторами, і тому вони мають близькі вимоги до свого розміщення, проте слід враховувати деякі особливості, що виникають у зв'язку з особливим призначенням вторинних обмоток реактора ТМП блочного зовнішнього виконання є установкою понижуючого трансформатора та напівпровідникового перетворювача на загальній рамі, з'єднаних між собою коротким, близько одного метра

довжиною, жорстким шинним мостом, що постачається в комплекті. ТМП встановлюються на відкритому майданчику у безпосередній близькості до ЕМЧ [23, 28, 39].

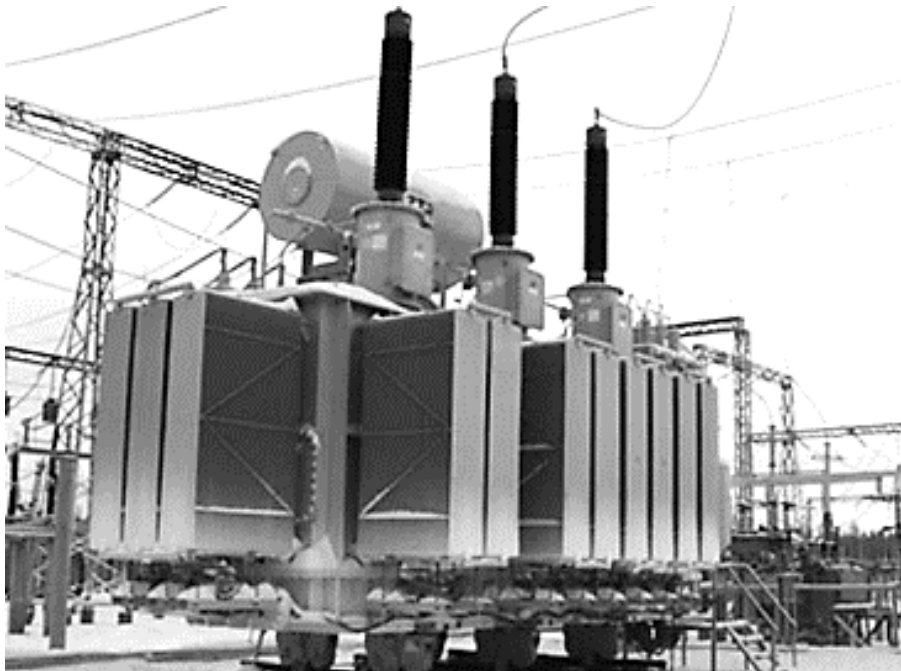


Рисунок 1.3 – Електромагнітна частина КШР типу РТУ-100 000/220-УХЛ1 [23, 45]

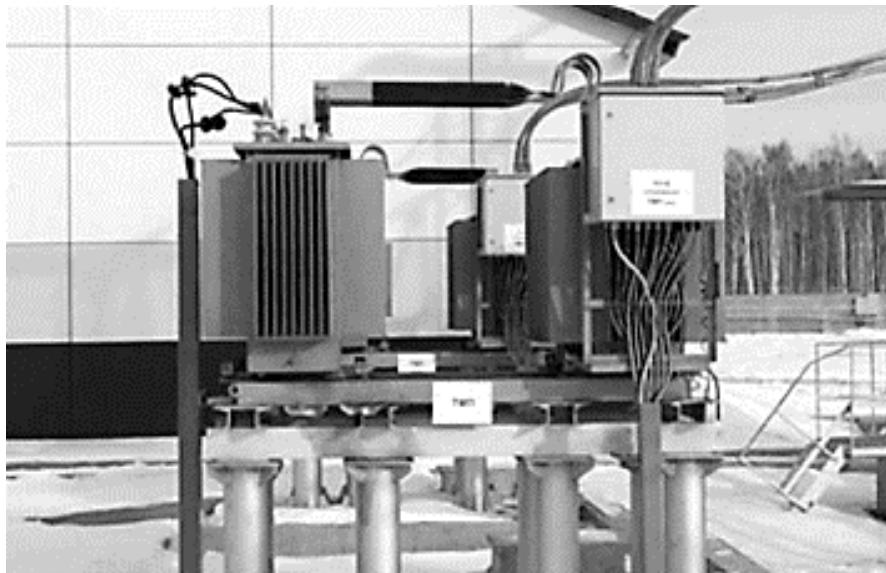


Рисунок 1.4 – Трансформаторно-перетворювальний блок (ТМП) [62, 65]

САК являє собою мікропроцесорний пристрій, укладений у стандартну шафу, що встановлюється в опалювальному приміщенні поряд із силовою частиною комплексу або в будівлі ОПУ [65].



Рисунок 1.5 – Загальний вид шафи САК [65]

Для триобмотувальних реакторів 220...500 кВ особливостями вторинних обмоток реактора є:

- наявність переважаючого струму 3-ї гармоніки та кратних їй у комп'ютерній обмотці в стаціонарних режимах;
- відсутність електромагнітного зв'язку між обмоткою управління та мережевою обмоткою.

Як показує аналіз літературних джерел, всі дослідники та розробники КШР вважають, що першу із зазначених особливостей необхідно враховувати при проектуванні ошиновування для складання в трикутник у разі, якщо реактор складається з групи трьох однофазних реакторів (РОДУ) [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]. Для економії місця на майданчику підстанції цю ошиновку можна виконати кабелем, який має бути розрахований на перебіг значної величини струму 3-ї гармоніки. Також дана особливість має бути врахована при проектуванні релейного захисту КШР, що буде докладніше розглянуто нижче. Струм навантаження від ТМП дуже малий і не перевищує 80 А з урахуванням

можливе навантаження. Розрахунок струму короткого замикання у трикутнику КО та в ошиновці, що живить ТМП, нічим не відрізняється від розрахунку КЗ на боці низької напруги звичайного трансформатора зі схемою з'єднань обмоток $Y_n/D-11$, підживлення з боку ТМП відсутнє.

Друга особливість дозволяє зменшити відстань між ізоляторами ошиновки полюсів «+»/«-», незважаючи на те, що формально номінальна напруга ОК становить 40 кВ (для КШР 500 кВ). При виборі цієї відстані слід керуватися номінальною напругою напівпровідникових перетворювачів, що живлять обмотку керування, та зручністю монтажу. При виборі ошинування на стороні випрямленого напруги з нагрівання необхідно керуватися номінальним струмом напівпровідникових перетворювачів і можливістю їх перевантаження, а по термічній стійкості при коротких замиканнях підживлення місця замикання здійснюється тільки випрямленим струмом з боку напівпровідникового перетворювача.

Для двообмотувальних реакторів 110 кВ (див. рисунок 1.6) особливістю є поєднання компенсаційної обмотки та обмотки управління в одній багатосекційній обмотці, що представляє собою подвійний розімкнений трикутник. Еквіпотенційні виводи цього «трикутника» підключаються до полюсів двонапівперіодних напівпровідникових перетворювачів, живлення яких здійснюється через однофазні трансформатори від інших проміжних висновків «подвійного трикутника» ОК, напруга між якими в режимі холостого ходу становить 22 кВ. На рисунку позначені наступні елементи схеми [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]:

1 – РТДУ-100000/220 – трифазна електромагнітна частина РТУ 25000/110;

2 – напівпровідниковий трифазний перетворювач ППМ-200/750;

3 – САК – система автоматичного управління реактора;

4 – трансформатор перетворювача типу ОМ-200/22/0,22;

5 – трансформатор початкового підмагнічування ТМО-2,5/0.4/0.012;

6 – запобіжник типу ПКТ 101-10-31.5-12.5;

- 7 – УЗП - пристрій захисту від перенапруг;
- 8 – ДПТ – датчик постійного струму;
- 9 – ДПН - датчик постійної напруги;
- 10 – ТА1-ТА9 - вбудовані трансформатори струму (ТС).

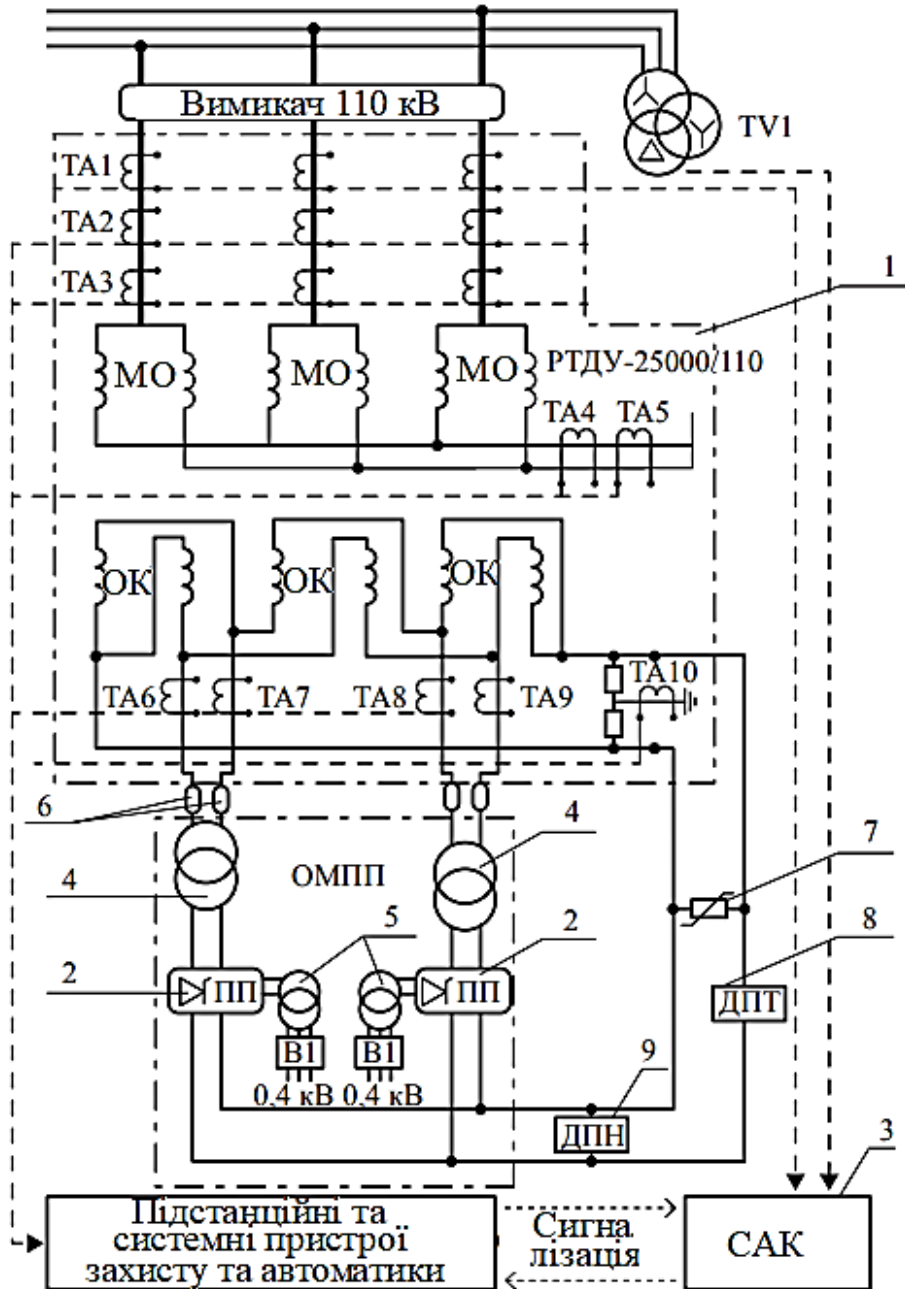


Рисунок 1.6 – Принципова схема двообмотувального КШР
серії РТУ-25000/110- УХЛ1 [3]

Живлення обмотки керування двообмотувального реактора випрямленим струмом здійснюється від двох (основний та резервний) однофазних перетворювальних блоків, розміщених на загальній рамі (ОМПП). Кожний блок складається з однофазного трансформатора і напівпровідникового перетворювача невеликої потужності 200 кВА. Однофазні трансформатори підключаються до обмотки управління через високовольні запобіжники. Функцію попереднього підмагнічування забезпечують однофазні малопотужні трансформатори типу ТМО-2.5/0.4/0.012 з їх живленням від мережі 0,4 кВ.

При виборі ошинування між вторинною обмоткою двообмотувального КШР та однофазними трансформаторами (ОМ) з термічної стійкості до струмів КЗ у розрахунковій схемі реактор також представляється як двообмотувальний трансформатор зі схемою з'єднань обмоток $Y_n/D-11$. У зв'язку з тим, що трансформатори напівпровідникових перетворювачів однофазні, розрахунковим видом короткого замикання на стороні змінного струму ОМП є однофазне коротке замикання, підживлення з боку перетворювачів відсутнє. Вибір ошиновки з боку випрямленого напруги ідентичний описаному вище підходу для триобмотувальної конструкції КШР.

Для реалізації алгоритмів системи автоматичного керування комплекс КШР обладнаний зовнішніми датчиками струму та напруги. Місце встановлення цих датчиків визначається проектувальником з урахуванням двох основних вимог [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]:

- необхідно розмістити датчики у будь-якому полюсі загальної ошиновки всіх перетворювачів, виключивши можливість їх від'єднання при виведення в ремонт основного або резервного ТМП, а також під час виведення у ремонт пошкодженої фази та введення резервної; інакше кажучи, для контролю повного випрямленого струму від будь-якого з ТМП датчики слід розмістити між групами ТМП та фазою реактора;

- виключити навантаження на датчики від тягіння проводів ошинування.

Усі лінійні КШР комплектуються додатковими обмежувачами перенапруг, що підключаються між полюсами «+»/«-» (рисунок 1.7). Вимоги до встановлення аналогічні вищеописаним для датчиків струму та напруги.

При компонованні основних елементів комплексу керованого шунтувального реактора крім фізичних особливостей КШР необхідно враховувати питання надійності та зручності експлуатації обладнання комплексу. Надійність електромагнітної частини та масляних трансформаторів досить висока, на відміну від напівпровідникових перетворювачів, у зв'язку з чим і здійснюється резервування живлення обмотки керування резервним ТМП. У разі виходу з ладу основного перетворювача його функції перебирає резервний. Для проведення ремонту ПП необхідно забезпечити доступ вантажної техніки для вилучення з бака напівпровідникового перетворювача та заміни напівпровідникових елементів, що вийшли з ладу. Також для виявлення обладнання, що вийшло з ладу, необхідно мати легкий доступ до шаф з'єднання (ШС), розташованим на рамі напівпровідникових перетворювачів. У разі розміщення трансформаторно-перетворювальних блоків на великій висоті доступ до ШС може бути забезпечений за допомогою спорудження майданчиків для обслуговування. На схемі, наведеній на рисунку 1.7, представлено таке обладнання, що входить до складу комплексу КШР серії РТУ-180000/500-УХЛ1 [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]:

1 – РОДУ-600000/500 – електромагнітна частина РТУ-180000/500;

ТМД – трансформатор динамічних режимів, 1000 кВА, 6(10)/1,1 кВ;

ТМО – основний трансформатор статичних режимів 1000 кВА, 10/0,40 кВ;

ТМР – резервний трансформатор статичних режимів 1000 кВА, 10/0,40 кВ;

ППО, ППР, ППД – напівпровідникові трифазні керовані перетворювачі;

САК – система автоматичного керування;

ДПТ – датчик постійного струму;

ДПН – датчик постійної напруги;

ОПН – обмежувач напруги (захисний пристрій);

ТА1– ТА9 – вбудовані трансформатори струму;

TV1, TV2 – трансформатори напруги 500 кВ та 10 кВ;

В_А, В_В, В_С – вимикач 500 кВ реактора;

В_О, В_Р, В_Д — вимикачі основного, резервного, динамічного ТМП;

В_{КО} — вимикачі шунтування КО (тільки для лінійних КШР).

Датчик постійного струму, включений у розріз будь-якого полюса шини, є випрямлячем струму між усіма ТМП і РОДУ і призначений для керування та обмеження струму зміщення САУ від будь-якого працюючого ТМП. Як згадувалося вище КШР 500 кВ можуть бути виготовлені як у трифазному виконанні потужністю 180 МВА, так і у вигляді групи однофазних реакторів потужністю 60 МВА.

Крім основного складу обладнання КШР (ЕМЧ, САК, ТМП) для лінійних КШР за необхідності можуть бути застосовані компенсаційні реактори (КР), що встановлюються в нейтраль мережевої обмотки КШР, а також додаткові пофазнокеровані вимикачі, що встановлюються між фазами компенсаційної обмотки. Необхідність КР та вимикачів КО обумовлена участю лінійних КШР (ЛКШР) у циклах АПВ, проте їх вибір має здійснюватися тільки на підставі розрахунків неповнофазних режимів, а не застосовуватися повсюдно [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33].

Трансформатори всіх ТМП мають однакову потужність та схеми з'єднання «зірка-нуль-трикутник», який дозволяє включати їх первинну обмотку як із ізольованою, так і із заземленою нейтраллю. Для ТМП, підключених до компенсаційної обмотки реактора, здебільшого випадків використовується заземлення нейтралі первинної обмотки силового трансформатора, що забезпечує високі струми замикання на землю і чутливість МТЗ як для міжфазних, так і для однофазних коротких замикань.

Вбудовані тиристорні перетворювачі ТМП в окремому оливному баку виконуються за відомою схемою «Ларіонова» з додатковою шунтовою гілкою,

яка використовується при роботі трифазного випрямно-інверторного перетворювача при роботі на індуктивному навантаженні.

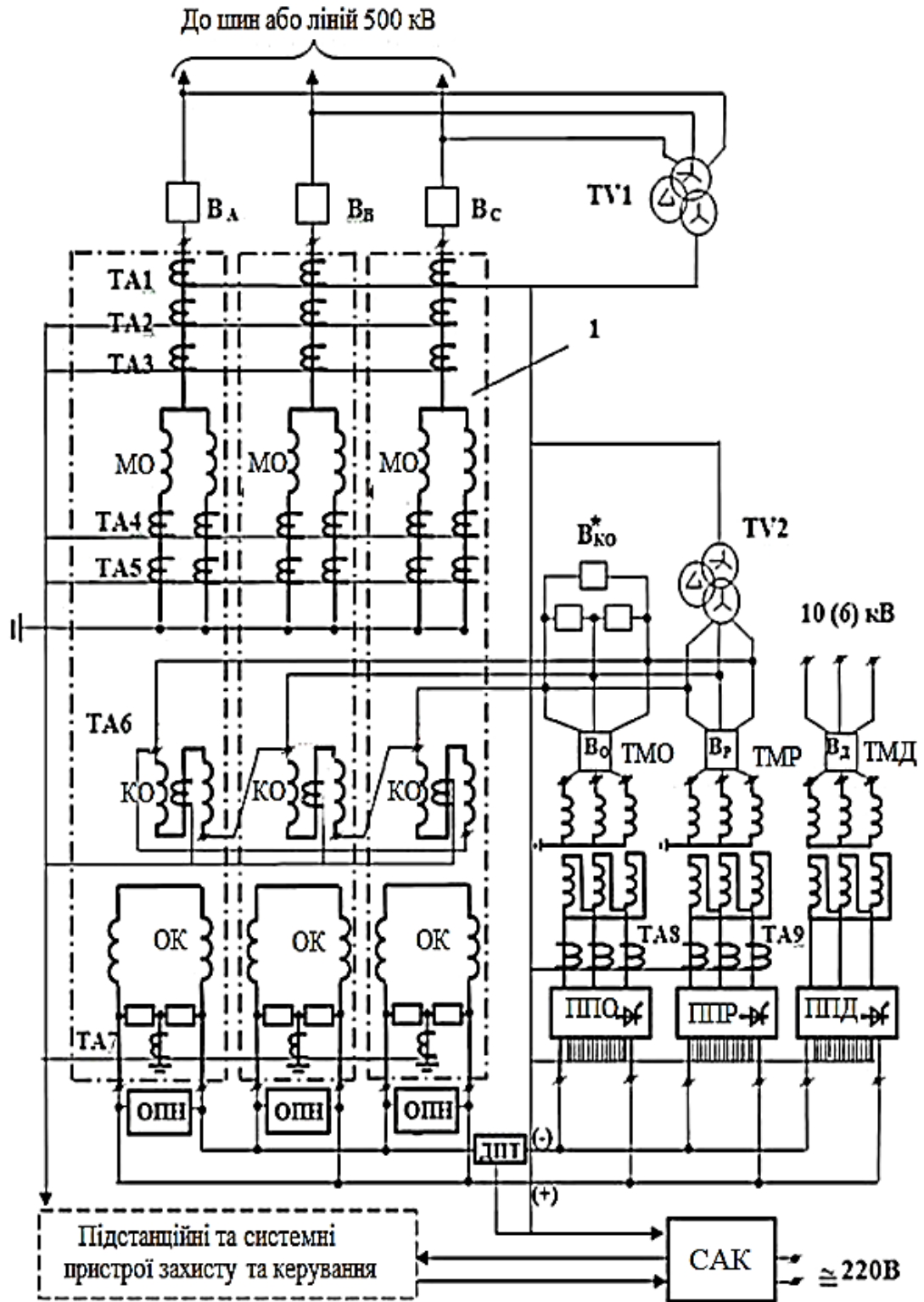


Рисунок 1.7 – Принципова схема триобмотувального КШР серії РТУ-180000/500-УХЛ1

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики РТУ-180000/500

Технічні характеристики (найменування параметру)	Значення параметра
1	2
Основні характеристики реактора	
Заводський тип (марка)	РТУ-180000/500
Номінальна потужність, МВАр	180
Виконання електромагнітної частини: – однофазне (так, ні) – трифазне (так, ні)	Так Так
Номінальна напруга, кВ	525
Найбільша робоча напруга, кВ	550
Клас напруги нейтралі, кВ	35
Номінальний струм мережевої обмотки, А	198
Номінальна лінійна напруга компенсаційної обмотки в режимі холостого ходу реактора, кВ	11
Номінальний струм обмотки керування, А, не більше	2000
Номінальна частота, Гц	50
Можливі варіанти заземлення нейтралі: – глухе заземлення на землю (так, ні) – заземлення через компенсаційний реактор з відповідним захистом ГНН від перенапруг (так, ні)	Так Так
Повні втрати при номінальній напрузі та номінальній потужності: – при однофазному виконанні (на три фази), кВт – при трифазному виконанні, кВт	1080 900

Продовження таблиці 1.1

1	2
Допуск на втрати %	+15
Величина відхилення реактивного струму кожної фази реактора від середньоарифметичного значення струмів трьох фаз, % від номінального струму, не більше	± 3
Мінімальний час зміни потужності від 5 до 100% або назад, з, не більше	0,3
Час виходу на номінальний режим із попереднім підмагнічуванням, с, не більше	0.02
Допустиме навантаження за потужністю (не більше 20 хв), % від номінальної потужності (при найбільшому робочому напрузі мережі)	30
Допустиме перевантаження по струму мережевої обмотки (не більше 20 хв), % від номінального струму (при напрузі мережі не нижче від номінального)	20
Амплітуда будь-якої вищої гармоніки мережного струму при номінальній синусоїдальній напрузі, % від номінального струму, не більше	3
Перевищення температури елементів реактора над температурою навколишнього середовища при номінальному струмі мережевої обмотки повинні бути не більше, град.	65 78 60 85
Напруга короткого замикання ПО–КО %, не менше	50
Подвійна амплітуда величини вібрації на стінці бака, мкм, не більше	200

Продовження таблиці 1.1

1	2
Комплект поставки	
Електромагнітна частина реактора: — три електромагнітні частини при однофазному виконанні електромагнітної частини; — резервна фаза при однофазному виконанні; — одна електромагнітна частина при трифазному виконанні електромагнітної частини	так на вимогу так
Система підмагнічування	Так
Система автоматичного управління (САУ), яка встановлюється на пульті управління підстанцією	так
Пристрій захисту від перенапруг (УЗП)	так
Система моніторингу	на вимогу
Система автоматичного керування (САК)	
Система автоматичного керування з каналом	так
Статизм регулятора САК з напруги, % від $U_{c\text{ ном}}$	1...5
Діапазон зміни уставки за напругою, кВ	500...550
Діапазон зміни уставки струмом, А	0...200
Точність завдання уставки за напругою, кВ не більше	1
Точність завдання уставки за струмом, А, не більше	1
Кліматичне виконання - УХЛ 4 для встановлення в закритому приміщенні з температурою навколишнього повітря +5...+35 °С	так
Кількість перетворювальних блоків ТМП-1000/10/0,4	так

Необхідно зазначити, що використання для регулювання потужності в КШР трансформаторно-перетворювального блоку малої потужності (1% номінальної потужності реактора), накладає на обладнання, що входить до

складу реактора та на алгоритми його керування, особливі вимоги при застосування КШР на лінії. Як свідчать джерела [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]. проведені на ряді мережевих об'єктів експерименти за участю та під керівництвом автора показують, що комутація реактора може вивести з ладу напівпровідниковий перетворювач ТМП.

Якість напруги в енергосистемі залежить від ряду факторів: значення використовуваної потужності не стає, у крайньому випадку, протягом року та протягом дня. Відповідно до цього потрібна зміна режиму вироблення електроенергії та її передачі по лінії. У разі передавання потужності по лінії, її поле компенсується. При передаванні потужності, меншої природної лінії, вона генерує надмірну реактивну потужність. У незайнятій фазі генерує максимальну кількість реактивної потужності. У міру того, як потужність, що передається по лінії, зростає, струм збільшується і, відповідно, збільшується сила магнітного поля.

При передаванні природної енергії по лінії потужність його електричного та магнітного полів однакова, що забезпечує взаємну компенсацію. Коли потужність передається понад природну, потужність магнітного поля лінії перевищує потужність її електричного поля, і лінія стає споживачем реактивної потужності. Реактивну потужність, що генерується лініями необхідно компенсувати енергосистемою [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33].

У режимах з низьким навантаженням – з ємнісною природою реактивних струмів – напруга в енергосистемі зростає. У режимах максимального навантаження індуктивних реактивних струмів – напруга зменшується. Важливими завданнями при проектуванні та експлуатації енергосистем є мінімізація цих коливань.

Проблема стабілізації напруги та збільшення пропускної здатності передавальної мережі актуальна в усьому світі, особливо у країнах з протяжними територіями, з великою протяжністю з'єднань між сусідніми підстанціями. Для вирішення цієї проблеми було розроблено ряд пристроїв для

компенсації реактивної потужності. Шунтувальні реактори відносяться до таких пристроїв.

Робота ліній електропередавання – це зв'язок між електростанціями та споживачами електроенергії. Усі лінії електропередавання відносяться до розподільних, системоутворюючих та міжсистемних ліній. Розподільними лініями електроенергія передається на відносно короткі відстані, які зазвичай не перевищують кількох десятків кілометрів, що значно менше – до ста кілометрів і більше. Високовольтними лініями електрика передається на сотні кілометрів. Довжина міжсистемних повітряних ліній передач може бути понад тисячу кілометрів. Напруга ліній розподілу не перевищує 220 кВ, магістральних – 500 кВ, і навіть напруга міжсистемних ліній, відповідно, – 750 кВ і вище, в залежності від довжини ліній.

Основними показниками енергоспоживання споживачів є надійність та якість електроенергії. Вони визначають основні вимоги до лінії електропередавання [3, 8, 9, 10, 11, 13, 15].

Лініям передавання потрібно здійснювати передачу потужності у нормальному та після аварійному режимах. Відповідно до нормативних документів та стандартів, У режимі після аварії передача по лінії електропередавання може значно збільшитись (наприклад, при від'єднанні паралельної лінії). Зміна напруги від передбаченого значення обмежена. Збільшення напруги на лініях у їх нормальних режимах використання має бути обмежено через зношування та порушення ізоляційних властивостей електроустаткування. Недостатня напруга в нормальних умовах роботи має бути обмежена для найкращих умов експлуатації електроустаткування.

Падіння напруги вздовж лінії є неприпустимим. Густина струму у проводах у нормальному режимі вибирається економічним станом передавання, в режимі після збою – відповідно до умови нагріву дротів.

Як у нормальному, так і в пост-аварійному режимі необхідно забезпечити баланс реактивної потужності у системі.

Втрати на короні, а також радіоперешкоди на лінії мають бути мінімальними. Повітряні лінії становлять як електричні, і магнітні поля. У нас є такі функції. Електричне поле лінії мало змінюється за зміни навантаження протягом дня, а також через обмежені інтервали зміни напруги. Магнітне поле змінюється в межах разом із зміною струму. Це визначає основні засади роботи ЛЕП [3, 8, 9, 10, 11, 13, 15].

Інша особливість полягає в тому, що при великій довжині лінії напруга та струм змінюються на всьому протязі ліній. Фазовий зсув вздовж лінії визначається швидкістю розповсюдження електромагнітної хвилі, що працює з параметрами лінії відношення.

Явище передавання електроенергії по ЛЕП має хвильову природу, що створює необхідність розгляду хвильових процесів при дослідженні роботи ліній електропередавання.

Пропускна спроможність ліній електропередавання – максимальна потужність, що передається по лінії без обмежень за тривалістю передачі електроенергії, підтримки щільності струму не більше допустимих значень, а також дотримання інших вимог. Основні серед них:

- точне обмеження критичної щільності струму;
- контролювання зміни напруги;
- забезпечення стійкості режиму.

Забезпечення першої вимоги досягається оптимальним вибором активного перерізу дротів на етапі проектування лінії.

Вимоги передбачають забезпечення балансу реактивної потужності, який може бути досягнутий, більшою чи меншою мірою, за допомогою використання спеціальних компенсуючих пристроїв.

Умови визначають додаткові вимоги до параметрів лінії та компенсуючим пристроям. При нормальній роботі змінні напруги обмежені допустимим рівнем напруги – найвищим рівнем робочої напруги. Передбачається, що номінальна напруга є мінімальною напругою у нормальному режимі. Крім того, вище рівня напруги лінії електропередачі,

чим менша різниця між довгостроковою і номінальною напругами. Таке обмеження склалося через підвищення добротності лінії (збільшення відношення індуктивного н активного опору ліній) у разі підвищення класу напруги. Але збільшення довжини ліній електропередавання надвисоких класів напруги створює суттєві проблеми забезпечення цього обмеження.

Актуальність теми магістерської роботи пояснюється тим, що для забезпечення можливості дослідження зазначених проблем має бути створена математична модель КШР, що відображає реальні процеси, які протікають у реакторі та енергосистемі. Розробка імітаційної моделі КШР у середовищі Simulink є актуальним завданням [3, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 72].

Багаторічний досвід розробників даних проблем, а також аналіз джерел, присвячених даній тематиці, застосування керованих реакторів для ліній електропередавання 500 кВ дозволяє стверджувати, що на початкових етапах застосування КШР вони встановлювалися виключно з метою стабілізації напруги у точці підключення.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КШР

Керований шунтувальний реактор (КШР) є новий тип пристроїв FACTS, який починаючи з 90-х років минулого сторіччя широко використовується для стабілізації напруги та керування перетіканнями реактивної потужності як у магістральних так і розподільчих мережах, так і на рівні великих промислових споживачів. На сьогоднішній день в енергосистемах СНД та Балтії експлуатується обладнання КШР сумарною потужністю понад 4700 МВАр. Визначальна роль КШР у країнах СНД тим паче помітна, якщо врахувати, що аналогічне за виконуваними функціями обладнання, у кращому випадку, представлено в окремих енергосистемах одиничними екземплярами. До основних причин такого успіху керованих шунтувальних реакторів можна віднести їх високу надійність, кращі техніко-економічні показники, конструктивну схожість зі звичайним трансформаторним обладнанням, простоту в експлуатації та нижчу вартість [2, 3, 7, 49, 60, 63, 64, 67, 73].

У блоці з батареєю статичних конденсаторів (БСК) керований реактор виконує всі функції статичних тиристорних компенсаторів (СТК) Проте, на відміну традиційного схемного рішення СТК, що складається з трансформатора зв'язку, послідовно включених реакторів і зустрічно-паралельного тиристорного вентиля на повну потужність, в УШР є тільки специфічний трансформаторний пристрій, в якому роль реактора виконують індуктивності обмоток, а роль зустрічно-паралельного тиристорного вентиля - стрижень, що насичується. В результаті замість трьох силових елементів має місце один. При цьому КШР не вимагає встановлення потужних фільтрів вищих гармонік для забезпечення якості напруги. Для експлуатації КШР не потрібна спеціальна підготовка обслуговуючого персоналу та створення додаткових робочих умов на підстанціях, як, наприклад, застосування водяного охолодження або розміщення обладнання у закритих приміщеннях. Додатковою перевагою КШР є можливість його підключення безпосередньо на шини високої напруги та відсутність необхідності використання

трансформаторів, що підвищують. Це дозволяє забезпечити весь регульовальний діапазон реактора саме на тому класі напруги, де це необхідно за режимом роботи електричних мереж [2, 3, 7, 49, 60, 63, 64, 67, 73].

Досвід експлуатації керованих шунтувальних реакторів повністю підтвердив високі споживчі якості пристроїв даного типу. Встановлення навіть одного з них забезпечує безперервне автоматичне керування оптимальними рівнями напруги на ряді розподільних під станцій великого району електричних мереж. При цьому різко знижуються витрати на експлуатаційне обслуговування та ремонт трансформаторного та комутаційного обладнання, що приймає інтенсивну участь у процесі регулювання напруг [3].

Плавне та швидше регулювання забезпечують керовані підмагнічуванням шунтувальні реактори (КПШР). Протягом більш ніж 40 років ПрАТ ЗТР «Запоріжтрансформатор» (Україна) [29] розроблялися та удосконалювалися різні конструкції реакторів із підмагнічуванням. Були досліджено реактори з кільцевим, поперечним, поздовжньо-поперечним та поздовжнім підмагнічування різних ділянок магнітної системи. Досліджувалися реактори з різним розташуванням та кількістю обмоток, однофазні та трифазні, з плоскою та просторовою магнітної системи. Однак, найбільше практичне застосування отримала конструкція однофазних та трифазних реакторів, у яких кожен стрижень однієї фази магнітної системи поділено на дві частини по вертикалі. На кожному з цих частин розташовуються обмотки керування, включені послідовно зустрічно, та частини компенсаційних обмоток, включені послідовно згідно. Мережева обмотка охоплює обидві частини стрижня. Компенсаційні обмотки окремих фаз з'єднані між собою за схемою «трикутник», нейтральні кінці різних фаз мережної обмотки з'єднані за схемою «зірка», а лінійні кінці приєднані до мережі. Кінці обмоток керування різних фаз приєднані до керованого пристрою постійної напруги, яке живиться від компенсаційних обмоток чи мережі власних потреб підстанції. Зміна постійної напруги на кінцях обмоток керування забезпечує спеціальна система автоматичного керування (САУ).

Зміна постійної напруги та струму в обмотках керування за спеціальними алгоритмами забезпечує осьове підмагнічування окремих вертикальних частин стрижня магнітної системи. Як наслідок змінюється індуктивність мережної обмотки та споживаної реактивної потужності реактора КПШР.

За останні роки підприємством ПрАТ «Запоріжтрансформатор» освоєно серійний випуск реакторів такого типу. В енергомережах Азії та Європи успішно працюють 129 фаз однофазних та трифазних реакторів. Усього 97 реакторів, в тому числі: потужністю 25 МВАр (35 кВ, 110 кВ та 220 кВ); потужністю 63 МВАр (110 кВ та 220 кВ); потужністю 100 МВАр (110 кВ, 220 кВ, 400 кВ); потужністю 180 МВАр (330 кВ, 500 кВ) [29, 30, 31].

У комплект поставки входить обладнання, показане на рисунку 2.2. Приклади КПШР, які перебувають у експлуатації, показані рисунку 2.2.

За конструкцією, умовами та простотою експлуатації КПШР можна порівняти зі звичайним трансформаторним чи реакторним обладнанням. За функціональними можливостями вони є автоматично регульованим обладнанням, яке дозволяє:

- автоматично, залежно від заданого алгоритму, здійснювати процес стабілізації напруги в точці підключення реактора до мережі або реактивної потужності (струму), що споживається реактором;
- підвищити до 30% пропускну спроможність лінії електропередачі за допустимим рівнем напруг;
- знизити втрати потужності в електричних мережах та підвищити надійність їх експлуатації, у тому числі і за рахунок різкого зниження кількості спрацьовувань комутаційного обладнання та перемикаючих пристроїв трансформаторів, встановлених у мережі;
- підвищити межу переданої потужності за умовою статичної та динамічної стійкості системи електропередачі;

– спільно з батареями конденсаторів (БСК), виконувати всі функції джерел та компенсаторів реактивної потужності, тобто. повністю замінити за функціями синхронні компенсатори, що обертаються, СТК і ТРГ.



Рисунок 2.1 – Керований підмагнічуванням реактор виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор» [29]

У роботі [3] наведено технічні дані виготовлених КПШР, електричні схеми, дані заводських та мережових випробувань, розглянуто окремі питання проектування та методики розрахунку параметрів КПШР. У роботі [29] наведено результати досліджень впливу УПШР на різні характеристики електричних мереж стаціонарних та перехідних режимах. У тому числі проаналізовані вплив на показники статичної стійкості режимів електропередачі, зниження втрат активної потужності та підвищення пропускної спроможності ліній, розглянуті внутрішні перенапруги в лініях, що містять КПШР [2, 3, 29, 30, 31].



а



б



в



г

а) 180 МВАр, 330 кВ; б) 180 МВАр, 330 кВ;
в) 180 МВАр (3×60 МВАр), 500 кВ; г) 100 МВАр, 220 кВ

Рисунок 2.2 – Приклади керованих підмагнічуванням шунтувальних реакторів, виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор», що знаходяться в експлуатації [29, 30]

Особливості релейного захисту КПШР, досвід експлуатації та пуско-налагоджувальних робіт описаний у роботі [3]. Аналіз ефективності застосування КПШР у експлуатації наведено у [2...4].

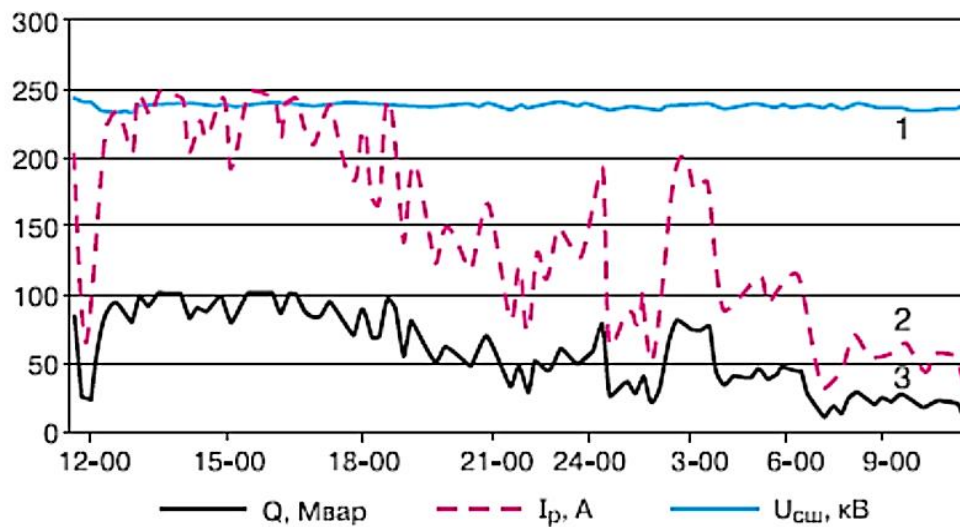
Прикладом ефективності застосування реакторів виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор» (Україна) є результати експлуатації трифазного КПШР 25 МВАр 110 кВ на підстанції «Кудимкар» протягом понад 10 років. На цій підстанції за рахунок встановлення реактора коливання напруги в точці підключення до мережі обмежені величиною $\pm 1,5\%$ щодо заданої величини напруги [29, 30].

Одночасно скорочена кількість комутацій БСК та перемикаючого пристрою ПУ трансформаторів приблизно у 100 разів. У години максимуму графіка навантаження, втрати енергії у прилеглий мережі знижено на 2,0 МВт. Забезпечено безперебійне електропостачання споживачів, що дало змогу відкласти будівництво нової лінії 220 кВ.

Як зазначають розробники ПрАТ «Запоріжтрансформатор» [29, 30] значно ефективною виявилася експлуатація трифазних реакторів КПШР 25 МВАр 110 кВ на трьох підстанціях нафтовидобувних підприємств Сибіру. Зокрема, після введення на підстанціях БСК та КПШР пропускна спроможність лінії 110 кВ зросла на 30...50 %, рівні напруги досягли від 105 % до 110 % номінального значення та забезпечили регулювання у широкому діапазоні залежно від режимів. Оптимізація потоків реактивної потужності, дозволила довести передану потужність до гранично допустимою за перерізом проводів, забезпечити на 100 % взаємне резервування навантажень електропередавання, що примикають, на 35 % знизити втрати активної потужності у проводах лінії, в десятки разів скоротити кількість комутацій БСК та ПУ трансформаторів, забезпечити плавну автоматичну стабілізацію напруги в режимах, що встановилися в відповідність із заданими рівнями (уставками) [29].

Основне призначення трифазного реактора 100 МВАр 220 кВт – регулювання реактивної потужності та стабілізація напруги. На рисунку 2.3 наведено дані вимірювань, отримані при мережевих випробуваннях на підстанції. Вартість цього реактора виявилася суттєво меншою (на 30 %), ніж вартість комплексу (автотрансформатор з некерованим реактором), що

визначило рішення щодо його встановлення на підстанціях. Крім вартісних показників, важливою перевагою при використанні КПШР 100 МВАр з автоматичним плавним регулюванням потужності є економія втрат. Втрати режиму короткого замикання в автотрансформаторі становлять 315 кВт, втрати холостого ходу 65 кВт, втрати у трьох однофазних некерованих реакторах $3 \times 125 \text{ кВт} = 375 \text{ кВт}$, що в сумі складає 755 кВт. Втрати в реакторі КПШР 100 МВАр за мінімальної потужності (у режимі холостого ходу) 87,7 кВт, при номінальному навантаженні 558 кВт.



1 – напруга у мережі 220 кВ, 2 – струм фази реактора, 3 – потужність реактора

Рисунок 2.3 – Добовий графік навантаження трифазного КПШР 100 МВАр 220 кВ [29]

Встановлено, що середньодобова потужність реактора становить близько 60% від його номінальної потужності. При цьому, середньодобові навантажувальні втрати (втрати в обмотках та додаткові втрати) становлять близько 188 кВт. У сумі зі втратами сталі 87,7 кВт (втратами х.х.) експлуатаційні (реальні) середньодобові втрати становлять близько 275 кВт, порядку 56 % по відношенню до втрат при номінальній потужності 558 кВт. Втрати 275 кВт майже в 3 рази менше втрат комплексу (автотрансформатор та некерований реактор).

Набутий досвід експлуатації КППШР 100 МВАр 220 кВ на підстанціях, де встановлені реактори виробництва ПрАТ ЗТР трифазного КППШР 180 МВАр 330 кВ на підстанціях показав, що керовані реактори раціонально розташовувати не тільки вдалині, а й поблизу електростанцій, на яких регулювання напруги можна здійснити зміною збудження генераторів. Це пояснюється тим, що КППШР дозволяють помітно полегшити роботу генераторів (які часто мають граничний термін експлуатації) та сприятливо впливають на режим вироблення та споживання реактивної потужності [29].

Основні експлуатаційні характеристики КППШР виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор» наведено в таблиці 2.1 [29].

Застосування в електричних мережах цих УПШР, які використовують нелінійні властивості магнітних матеріалів, вимагає додаткових роз'яснень щодо трьох характеристик:

- несинусоїдність струму мережевої обмотки;
- збільшені порівняно із звичайними шунтувальними реакторами втрати;
- збільшена в порівнянні з СТК швидкодія (час переходу від режиму холостого ходу до номінального режиму).

Для дослідження першої із зазначених характеристик при мережевих випробуваннях КППШР на кожному ступені потужності проводилася реєстрація гармонійного складу мережного струму обмотки реактора. Аналіз цих вимірювань показав, що в номінальному режимі та в режимі холостого ходу спотворення струму мінімальні (менше 1% номінального струму), а при 70÷80% потужності реактора – максимальні. Максимальний рівень спотворень – 3÷5%. При цьому, підключення БСК до компенсаційної обмотки суттєво (приблизно вдвічі) знижує спотворення струму реактора. Максимум струму спотворення стає рівним близько 2,5% при 70÷80 % потужності реактора, а за іншої потужності спотворення значно менше.

Таблиця 2.1 – Основні експлуатаційні характеристики
КПШР виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор»

Тип КПШР	Втрати, кВт	Швидко- дія, с з форсу- ванням, але без початкового підмагні- чування стрижня	Уставка по потужності, МВАр		Уставка по напрузі, кВ		Коефіцієнт плавного регулювання установок, %	
			Діапа- зон	крок	Діапа- зон	крок	Діапа- зон	крок
3фази 180 МВАр 500 кВ	990	0,3	9÷234	1	475÷550	1	1÷5	1
3фази 180 МВАр 330 кВ	950	0,7	9÷234	1	300÷363	1	1÷5	1
3фази 100 МВАр 220 кВ	580	0,7	5÷130	1	200÷250	1	1÷5	1
3фази 63 МВАр 220 кВ	450	0,5	3÷82	1	200÷250	1	1÷5	1
3фази 25 МВАр 110 кВ	230	0,7	1,5÷32,5	1	100÷126	1	1÷5	1

Крім того, для експлуатації має значення відсоткове спотворення напруги мережі точці приєднання реактора, а не величина струму спотворення реактора. Відсотки спотворення напруги визначаються не КПШР.

Вони залежать від характеру споживачів мережі, від співвідношення опорів реактора та мережі. Вимірювання в мережі показують, що додаткове спотворення напруги мережі при включенні реактора у відсотках набагато нижче ніж відсотки спотворення струму реактора. Зокрема, при

випробуваннях трифазного реактора 100 МВАр 220 кВ напруга в точці підключення мало дуже низький додатковий відсоток спотворень напруги вищими гармоніками (нижче 1 %) як для випадку, коли до реактора було підключено БСК, так і за його відключення. В джерелах [2, 3, 48, 62, 64, 66] зазначено, що аналогічне становище було і при випробуваннях в умовах експлуатації трифазного реактора КПШР 25 МВАр 110 кВ, коли навіть при максимальному струмі спотворення реактора додаткового збільшення вищих гармонік у напрузі мережі зафіксувати не відбувалося. Варто також відзначити, що при використанні інших пристроїв плавного регулювання реактивної потужності (СТК, ТРГ, керовані шунтувальні реактори трансформаторного типу КШРТ) застосовуються тиристорні перетворювачі, потужність яких дорівнює повній потужності та перевантаження яких не допустиме. У реакторах УПШР потужність перетворювача мала (близько 1 %) і вони здатні витримувати короткочасно значні навантаження (по напрузі до 110÷130 %, за потужністю до 200 %). Перевантаження по струму та потужності виникають в експлуатації реакторів при однофазних коротких замиканнях мережі [29, 30].

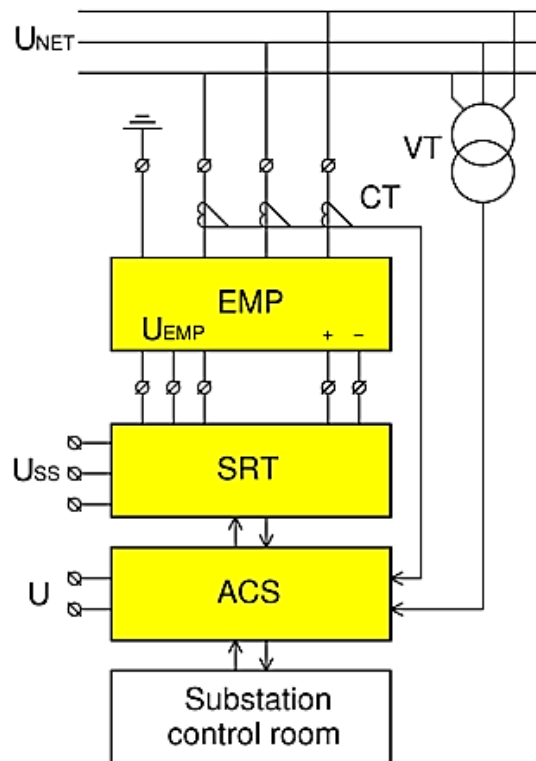
За втратами некеровані реактори не мають переваг перед УПШР, якщо враховувати конкретні коефіцієнти їх добового навантаження та те, що один УПШР замінює цілий комплекс обладнання. У пристроях компенсації реактивної потужності СТК та ТРГ немає високовольтних обмоток. У цих пристроях перетворювачі виготовляються на повну потужність, тому що їх вигідніше робити на низькій напрузі, а не на напрузі мережі 110...500 кВ. Таким чином, при використанні цих пристроїв потрібні додаткові трансформатори, що підвищують. Наявність в КПШР високовольтних обмоток, безпосередньо підключаються до мережі, забезпечує регулювання потужності безпосередньо на шинах високої напруги, що ефективніше. Втрати в різних пристроях компенсації реактивної потужності можна також порівнювати за по відношенню до номінальної потужності. В КПШР ці втрати становлять 0,5...0,7 % від номінальної потужності (менші значення – для більшої потужності). У керованих реакторах трансформаторного типу КШРТ

(з реактансом 100%) ці втрати більше приблизно в 1,5...2 рази через великі втрати в самому трансформаторі з реактансом 100 % і через втрат у перетворювачі порядку 0,2...0,3%. Для ТРГ втрати більше втрат в КПШР приблизно в 2 рази, оскільки ці втрати виникають і в перетворювачі, і в приєднаних до нього некерованих шунтувальних реакторах і в трансформаторі, що підвищує, постійно підключений до мережі. У СТК втрати більше, ніж в УПШР приблизно в 3 рази також через втрат у підвищувальному трансформаторі та іншому устаткуванні, але насамперед через суттєвих втрат у самих напівпровідникових приладах – повністю керованих тиристорах (близько 2% номінальної потужності) [29, 30].

Швидкодія КПШР в умовах експлуатації залежить від режиму роботи пристрою підмагнічування та системи автоматичного керування. У КПШР, що поставляються ПАТ «Запоріжтрансформатор», ці пристрої можуть працювати у трьох режимах (без форсування, з форсуванням перетворювачем потужністю до 1%, та в режимі з форсуванням перетворювачем підвищеної потужності). В результаті випробувань отримано, що без форсування за потужності перетворювача близько 0,2 % від номінальної потужності реактора час набору потужності від холостого ходу до номінального режиму складає 5 с. Цей режим на практиці використовується тільки як випробувальний режим для зіставлення розрахункових та експериментальних даних. У режимі з форсуванням підмагнічування використовується повна потужність перетворювача, яка складає близько 1% потужності реактора. При цьому час набору потужності за вимірними осцилограм перехідного процесу становить від 0,3 с до 0,7 с. У більшості практичних задач, така швидкодія є достатньою.

У разі потреби збільшення швидкодії до 0,03...0,07 с потужність перетворювача, що живить обмотки підмагнічування, необхідно ще більше збільшувати. Фактично КШР стає безінерційним за потужності перетворювача, дорівнює приблизно 25 % потужності реактора, але це досить велика потужність, хоча вона і дорівнює 100 %, як і альтернативних варіантах (СТК, ТРГ, КШТР) [29, 30].

Варто зазначити, що збільшена потужність джерела підмагнічування у разі такого режиму роботи КППР повинна використовуватися не завжди, як у альтернативних пристроях, а короткочасно (десяті частки секунди), лише у перехідних режимах форсування. Для задоволення реальних вимог експлуатації виявляється цілком достатньою перетворювача лише на рівні 1 % потужності реактора [29, 30].



EMP – електромагнітна частина;

SRT – трансформаторно-перетворювальний блок;

ACS – система автоматичного керування;

UNET – напруга мережі – 35÷750 кВ;

VT – трансформатор напруги; СТ – трансформатор струму;

USS – напруга власних потреб підстанції – 0.4 чи 6, 10, 35 кВ;

U_{EMP} – напруга компенсаційних обмоток реактора – 0.4, 6, 10, 35 кВ;

U – напруга вторинних ланцюгів живлення підстанції.

Рисунок 2.4 – Схема з'єднання комплексу КППР, що поставляється
ПрАТ «Запоріжтрансформатор» [29]

У кожному конкретному випадку, для більш ефективного використання КПШР та вирішенні питання про застосування того чи іншого пристрою компенсації реактивної потужності необхідно проводити моделювання процесів у реальній електричній мережі, та визначати необхідні допустимі значення рівня нелінійних спотворень мережного струму обмотки, рівня втрат та необхідну швидкодію. Для КПШР розроблено та перевірено експериментально математичні моделі, що дозволяють моделювати і перехідні процеси в електричних мережах, що містять КПШР різних конструкцій з різними алгоритмами та режимами керування [29].

Як показує досвід впровадження, вартість КПШР до 2-х разів нижча за альтернативні варіанти компенсації реактивної потужності (СТК, ТРГ), а термін окупності зазвичай досягає 1,5...2 роки.

Таким чином, теоретичні дослідження та більше ніж десятирічний досвід експлуатації реакторів на підстанціях показує, що широкомасштабне застосування керованих підмагнічуванням реакторів виробництва ПАТ «Запоріжтрансформатор» – це ефективний та економічний шлях оптимізації режимів електричної мережі, підвищення якості електроенергії, покращення умов експлуатації. Обладнання, що випускається, є надійним і по вартості може конкурувати з альтернативним обладнанням для компенсації та генерації реактивної потужності.

Основні характеристики КШР є наступними:

- діапазон регулювання реактивної потужності – 100%;
- потужність керування – 1...3% номінальної потужності КШР;
- гарантована швидкість набору повної потужності – 0,15...3 с;
- час набору повної потужності із попереднім підмагнічуванням – не більше 0,02 с;
- питома повна маса – 1,5...3 кг/кВАр;
- питомі втрати: холостого ходу – 0,5...1,0 Вт/кВАр, а номінальні втрати – 4...8 Вт/кВАр.

- допустиме навантаження струмом – 120 % (трохи більше 30 хвилин);
- повністю автоматичний режим експлуатації;
- рівень надійності, умови експлуатації та поточного обслуговування відповідають звичайним шунтувальним реакторам [29].



Рисунок 2.5 – РТУ-180000/500 комплексу КПШР, що складається з трьох реакторів РОДУ 60000/500, виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор»

3 ТИПИ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Керовані шунтувальні реактори – це електромагнітні реактори, індуктивність яких може плавно регулюватися за допомогою системи автоматичного керування, що дозволяє здійснювати стабілізацію напруги на повітряних лініях з великою зарядовою потужністю. У комбінації з батареями конденсаторів, що включаються паралельно, КШР є аналогами статичних тиристорних компенсаторів (СТК), дозволяючи підтримувати напругу на лініях як в режимі малих, так і та великих навантажень [3, 8, 9, 10, 11, 13, 15].

КШР являє собою статичний пристрій шунтувального типу з плавно регульованим індуктивним опором. КШР призначений для автоматичного керування потоками реактивної потужності та стабілізації рівнів напруги, що дозволяє:

- усунути добові та сезонні коливання напруги в електричній мережі;
- підвищити якість електричної енергії;
- оптимізувати та автоматизувати режими роботи електричної мережі, у тому числі з використанням як центрального регулятора системи SCADA/EMS;
- знизити втрати електроенергії при її транспортуванні та розподілі;
- підвищити стійкість енергосистеми;
- у десятки разів покращити умови експлуатації та підвищити надійність роботи електротехнічного обладнання за рахунок різкого скорочення кількості комутацій нерегульованих пристроїв компенсації реактивної потужності та обмеження використання менш надійних в експлуатації пристроїв РПН трансформаторів та автотрансформаторів;
- збільшити пропускну спроможність ліній електропередачі та забезпечити надійне автоматичне керування рівнями напруги при перетоках потужності, близьких до граничних статичних стійкості;

- уникнути ефекту «лавини напруги» при виникненні аварійних ситуацій в електричній мережі (наприклад, аварійне відключення навантаження, генератора, лінії електропередачі та інше);

- забезпечити умови для роботи генераторів електростанцій у такому діапазоні генерації реактивної потужності, що сприяє найбільш сприятливим експлуатаційним режимам [29].

Актуальність використання КШР полягає в перевагах їх використання, а саме в тому, що:

- регульовальний діапазон становить 100% номінальної потужності КШР;

- має плавне регулювання з необмеженим ресурсом можливих змін;

- має можливість нормованого навантаження КШР до 130% та короткочасного навантаження до 200%;

- має можливість регулювання напруги та реактивної потужності безпосередньо в точці підключення;

- має можливість використання малопотужних вентильних пристроїв з меншими втратами та відсутністю необхідності у водяному охолодженні;

- має традиційні вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу на підстанції;

- має нижчий рівень втрат: у 1,5 – 3 рази;

- має можливість зовнішньої установки;

- має істотно нижчу вартість.

Недоліком експлуатації КШР є зниження діапазону регулювання пристроїв РПН (від 45...55 % потужності до номінальної) та використання в інтенсивному режимі, що призводить до їх прискореного зносу [1, 3, 4, 7, 9, 18, 28, 37, 41].

Область застосування керованих реакторів поширюється (але не обмежується) на такі види електричних мереж:

- мережі з різко змінним графіком навантажень;

- мережі зі зношеним комутаційним та трансформаторним обладнанням, яке часто використовується для регулювання рівнів напруги;
- мережі, утворені довгими передаваннями, що мають тенденцію до частоті зміни значення та/або напрямки потоків потужності;
- мережі, які живлять споживачів із підвищеними вимогами до стабільності напруги;
- мережі із підвищеними втратами;
- мережі, режим роботи яких не дозволяє забезпечити допустиме завантаження генераторів за реактивною потужністю.

Широкі функціональні можливості КШР забезпечують доцільність їх застосування у різних класах напруги. При цьому очікуваний ефект може виявлятися як на рівні локального району споживчих мереж, так і при вирішенні першочергових завдань національної енергосистеми в цілому.

В умовах ринкових відносин в електроенергетичному секторі та збільшення інвестицій у розвиток електричних мереж, КШР пропонують цілу низку значних вигод для всіх господарюючих суб'єктів:

- на рівні магістральних та розподільчих електричних мереж КШР забезпечують суттєве зниження втрат електроенергії та відповідне збільшення прибутку системних операторів та розподільчих компаній;
- на рівні споживачів електроенергії КШР встановлюються з метою зниження плати за споживану реактивну потужність (підтримка $\cos(\varphi)$), забезпечення необхідної якості напруги у кінцевих споживачів, а також як необхідні заходи щодо підключення до мережі нових потужностей.

Отже, застосування керованих шунтувальних реакторів на об'єктах Українських ЕС дозволяє керувати режимами роботи мереж таким чином, щоб знизити втрати, підвищити пропускну спроможність ліній електропередачі. За рахунок цього підвищується надійність роботи системи, значно економиться електроенергія під час її передавання.

У світі є лише кілька фірм, які займаються виробництвом реакторного обладнання. Як правило, ці фірми мають спеціалізацію за типами реакторів, що випускаються. Наприклад «ЗТР» і «ABB» випускають тільки масляні шунтувальні реактори, «TRENCH» – тільки дугогасні та сухі шунтувальні, фільтрові та струмообмежувальні реактори, а також реактори для статичних компенсаторів тощо. ВАТ «Електро завод» проектує і випускає практично всі види реакторного обладнання, починаючи з реакторів-перетворювачів частоти класу напруги 100 В до шунтувальних реакторів на клас напруги 1150 кВ.

Шунтувальні реактори розраховані на високу і надвисоку напругу і можуть приєднуватися як до лінії, так і підключатися до шин підстанції. Їх використовують як один із засобів компенсації реактивної потужності в споруджуваних, реконструйованих і експлуатованих електричних мережах напругою від 110 кВ до 1150 кВ, що утворюються відповідними лініями електропередавання [23, 29, 33, 39, 41, 64, 66, 73].

Розрізняються реактори за такими ознаками: призначенням, видом магнітної системи, особливостям обмоток, кількістю фаз, можливістю зміни індуктивності, видом охолодження тощо. Найбільше поширення у високовольтних мережах 330 кВ і вище, знайшли шунтувальні реактори.

Реактор типу реактор компенсуючий, однофазний, сухий (РКОС) призначений для обмеження струмів короткого замикання в електричних мережах частотою 50 Гц та забезпечення збереження рівня напруги в електроустановках у разі коротких замикань за реактором Реактор РКОС представляє собою котушку без сталевих магнітопроводу з лінійною вольт–амперною характеристикою. Активний опір котушок є порівняльно невеликий. Обмотки реакторів виконані з багатожильного алюмінієвого проводу, що має зовнішню кремнійорганічну ізоляцію, а також ізоляцію жил для зменшення втрат від вихрових струмів. Обмотки котушок виконані окремо для кожної фази у вигляді концентрично розташованих витків із застосуванням транспозиції для забезпечення рівномірного розподілу в них струмів. Стяжні

колонки фаз реакторів виготовляються із текстоліту. Кожна колонка фази спирається на порцеляновий ізолятор [23, 29, 33, 39, 41, 64, 66, 73].

Сухі компенсуючі (шунтувальні) реактори (РКОС) призначені для регулювання напруги та компенсації зарядної потужності ліній електропередавання та виготовляються на напругу від 6 кВ до 35 кВ, потужністю трифазного комплексу від 1,5 МВАр до 80 МВАр. Дані реактори використовуються в комплексі з обладнанням статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності для плавного регулювання напруги з високою швидкістю та у вакуумно-реакторних групах для ступінчастого регулювання напруги як у ручному, так і автоматичному режимі. РКОС має велику індуктивність і малий активний опір, що забезпечує малі втрати.

Основним недоліком цих реакторів є малий діапазон регулювання рівня високого напруги як у шинах підстанцій, і на високовольтних лініях електропередавання. Як правило, реактори даного типу використовуються як резервні пристрої компенсації реактивної потужності і включаються в роботу у разі виведення в ремонт основних, потужніших шунтувальних реакторів.

Реактор однофазний з примусовою циркуляцією повітря і масла типу РОДЦ призначений для компенсації реактивної потужності ліній електропередавання 500 кВ і більше. Як правило, група з трьох однофазних реакторів даного типу з'єднується за схемою «зірка з ефективно заземленою нейтраллю». Бак реактора дзвонового типу, що складається з верхньої (знімної) та нижньої частин. Роз'єм між частинами бака розташований на висоті приблизно 600...700 мм та ущільнений гумовими прокладками за допомогою болтового з'єднання. Бак передбачає можливість перекочування реактора на каретках у поздовжньому та поперечному напрямках. На місці експлуатації реактор встановлюється на каретки [23, 29, 33, 39, 41, 64, 66, 73].

Реактор типу РОДЦ має низку конструктивних недоробок, які в експлуатації виявляються підвищеною вібрацією, випаданням дистанційних розпірок, болтів кріплення пружинних демпферів, обривом висновків екранів або самих екранів, поступовим накопиченням окалини та шлаку в піддоні,

обривом ланцюгів струму зовнішніх приєднань. У зв'язку з цим на багатьох енергооб'єктах виробляється заміна цього типу реакторів більш досконалим.

Реактор однофазний, шунтувальний, масляний з природною циркуляцією оливи та повітря типу РОМ призначений для компенсації реактивної потужності ліній електропередачі 500 кВ і більше. За аналогією з попереднім типом шунтувального реактора, даний реактор РОМ призначений для компенсації реактивної потужності, що генерується високовольтними лініями електропередавання. Реактор дозволяє регулювати напругу у вузлах енергосистем у нормальних режимах. В аварійних режимах використання даного реактора підвищує стійкість енергосистеми.

Істотною перевагою РОМ є наявність системи охолодження з природною циркуляцією оливи та повітря. У його конструкції відсутні циркуляційні оливо насоси та вентилятори охолодження, що значно спрощують його обслуговування та експлуатацію. Недоліком даного реактора є неможливість плавної зміни рівня напруги у точці його підключення.

Реактор однофазний з примусовою циркуляцією повітря, керований типу РОДУ є керованим шунтувальним реактором (КШР) трансформаторного типу являє собою змінний індуктивний опір, який плавно регулюється підмагнічуванням феромагнітних елементів магнітного кола. Для високовольтних мереж 330 кВ і вище КШР виробляються у пофазному виконанні. Магнітна система однієї фази КШР містить два стрижні, на кожному якого розміщено обмотки керування та мережеві обмотки. При підключенні до обмоток керування регульованого джерела постійної напруги відбувається наростання потоку підмагнічування, який у сусідніх стрижнях спрямований у різні боки та викликає насичення стрижнів КШР у відповідні напівперіоди струму [23, 29, 33, 39, 41, 64, 66, 73].

Насичення стрижнів призводить до виникнення та зростання струму в мережевій обмотці за рахунок нелінійних властивостей магнітопроводу. Зміна величини струму підмагнічування призводить до зміни струму мережевої обмотки, за рахунок чого забезпечується плавна зміна рівнів напруги в точці

підключення КШР і величина реактивної потужності, що споживається реактором.

Керовані шунтувальні реактори мають істотні переваги перед іншими засобами компенсації реактивної потужності:

- трансформаторне виконання для відкритого розподільчого пристрою на будь-який клас напруги, менші площі та строки будівництва;
- можливість плавного регулювання в широкому діапазоні споживаної реактивної потужності;
- можливість безпосереднього підключення до ЛЕП без проміжних трансформаторів, встановлення КШР у будь-якій частині енергосистеми;
- забезпечення стабілізації напруги;
- оптимізація перетоків реактивної потужності, підвищення пропускної спроможності, низькі втрати та питома вартість;
- зниження числа комутацій вимикачів та дій РПН трансформаторів;
- менші витрати на обслуговування.

Особливо ефективно застосування КШР при встановленні на довгих лініях електропередачі, режими роботи яких обумовлені різко змінним графіком навантаження і постійно змінюють напрями перетіканнями активної потужності. Грамотне регулювання рівнів напруги за допомогою КШР значно знижує втрати під час передачі електричної енергії [2, 3, 29, 33, 39, 41, 64, 66, 67, 71, 73].

Крім регулювання напруги в лінії електропередавання і збільшення потужності, що передається, КШР може виконувати інші найважливіші функції:

- обмеження підвищення напруги та комутаційних перенапруг, у тому числі при включенні ліній на холостий хід;
- гасіння дуги в паузі однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) з функцією адаптивного керування;
- підвищення статичної та динамічної стійкості.

Також КШР, стабілізуючи напругу на шинах підстанцій, забезпечує значне зниження числа комутацій обладнання, призначеного для підтримки напруги у допустимих межах при змінах режиму роботи енергосистеми (перемикань РПН на трансформаторах та автотрансформаторах, включення/відключення некерованих реакторів та конденсаторних батарей тощо). Це значно підвищує надійність роботи суміжного обладнання підстанцій, дозволяє знизити експлуатаційні витрати на ремонти. Одночасно відбувається і підвищення якості напруги в мережі низьких класів напруги, у споживачів електроенергії, що також підвищує надійність роботи обладнання та знижує збитки у споживачів від неякісної напруги.

Якщо порівнювати КШР із звичайними шунтувальними реакторами, його переваги очевидні. Звичайні шунтувальні реактори традиційно використовуються на лініях 110...500 кВ, а їх потужність і кількість визначається зарядною потужністю лінії, яку необхідно компенсувати, при цьому їх використання необхідно, перш за все, в режимах малої потужності, що передається по лініях, або на неодруженим ходом цих ліній. У міру завантаження ліній додатковою активною потужністю, виробляє зарядна (реактивна) потужність все більше споживається індуктивним опором лінії, при цьому необхідність постійної встановленої потужності звичайних шунтувальних реакторів знижується. Якщо споживання реактивної потужності зростає, це може призводити до зниження напруги в точці підключення реактора нижче необхідного за режимами рівня на даному енергооб'єкті. Це, у свою чергу, призводить до зниження пропускної спроможності лінії, а також зниження межі статичної стійкості електропередавання. Такі недоліки можна усунути за рахунок застосування керованого шунтувального реактора, який автоматично підлаштовується під необхідний рівень напруги на об'єкті електроенергетики [3, 29, 33, 39, 41, 64, 66, 73].



Рисунок 3.1 – Шунтувальний реактор РОМ-50000/500 виробництва ПрАТ ЗТР (Запоріжжя, Україна) [29]

Шунтувальні реактори виробництва ПрАТ ЗТР призначені для компенсації реактивної потужності в лініях електропередавання напругою 35...800 кВ. Вони дозволяють збільшити пропускну спроможність лінії, знизити втрати електроенергії при її трансформації, покращити якість електроенергії, що поставляється споживачеві. В якості базової конструкції реактора, що шунтує, була обрана конструкція зі стрижневою магнітною системою з немагнітними зазорами в стрижні, як найбільш надійна, економічна і більш повно задовольняє вимогам замовників (рисунок 3.1...3.3).

Нейтральні реактори виробництва ПрАТ "ЗТР" призначені для обмеження струмів короткого замикання на землю при аварії на лінії електропередавання (рисунок 3.4). Як правило, ці реактори виконуються без магнітної системи, з екранами, розташованими зовні та по торцях обмотки. Ізоляція обмоток – маслобар'єрного типу. Система охолодження типу М [29].



Рисунок 3.2 – Шунтувальний реактор POM-60000/500 виробництва ПрАТ ЗТР (Запоріжжя, Україна) [29]

Таблиця 3.1 – Структура умовного позначення реактору POM -60000/500

Р	Реактор
О	Однофазний
М	Природна циркуляція повітря та оливи
60000	Номінальна потужність, кВА
500	Номінальна напруга, кВ
У1	Кліматичне виконання та категорія розміщення



Рисунок 3.3 – Нейтральний реактор РОМ-110000/750 виробництва ПрАТ ЗТР
(Запоріжжя, Україна) [29]

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики реактору РОМ -60000/500 У1 [29]

Найменування параметру (фази)	Одиниця вимірювань	Норма
Номінальна напруга	кВ	$500/\sqrt{3}$
Найбільша робоча фазна напруга	кВ	$525/\sqrt{3}$
Номінальна потужність	кВАр	60000
Втрати при номінальній напрузі	кВт	141,17
Номінальна частота	Гц	50
Струм обмотки при максимальній робочій напрузі	А	198



Рисунок 3.4 – Шунтувальний реактор РОМ-84/123 виробництва ЗТР ПрАТ (Запоріжжя, Україна) [29]

Активна частина реактора встановлюється на дно бака із трансформаторним маслом. Бак реактора круглої форми з кишенею для встановлення введення 500 кВ з високоміцної сталі здатний витримувати вакуум і надлишковий тиск до 1 атм. На баку реактора розміщуються сучасні пластинчасті охолоджувачі малооб'ємні, об'єднані в дві групи. Завдяки високій ефективності системи охолодження перевищення температури обмотки, олії та магнітопроводу знижено в середньому на 10 °С порівняно з нормами, що дозволило збільшити термін служби реактора з 20 років до 30 років. Реактор оснащений сучасним захистом, контрольно-вимірювальною апаратурою, пристроями для підйому та транспортування, а також системою моніторингу.

Реактор однофазний з примусовою циркуляцією повітря та оливи типу РОМБСМ, РОМБС, РОДЦ призначений для компенсації реактивної потужності в лініях електропередавання напругою 750 кВ.

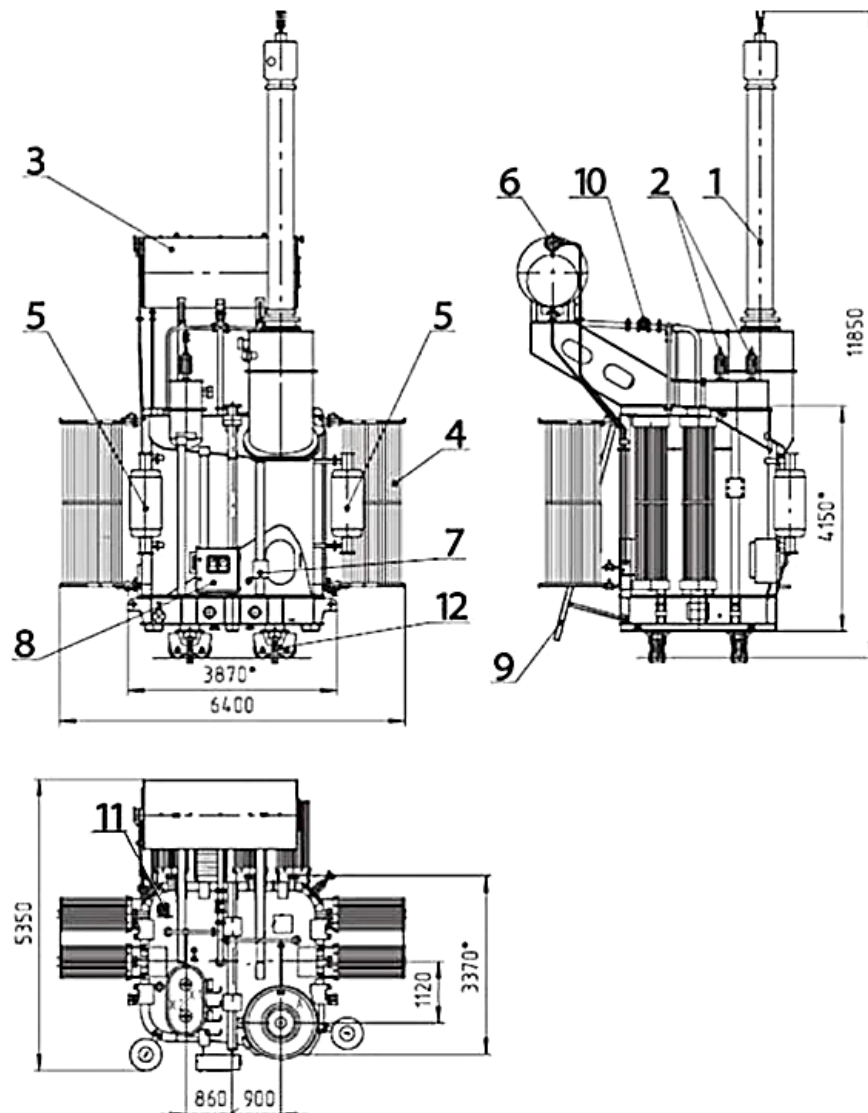


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд та габаритні розміри реактора типу
РОМ-60000/500-У1 [29]

Реактори приєднуються до лінії електропередавання. Група трьох однофазних реакторів з номінальною напругою 110 кВ з'єднується за схемою «зірка з глухозаземленою нейтраллю». Група трьох однофазних реакторів з номінальною напругою 500...750 кВ з'єднується за схемою «зірка з глухозаземленою нейтраллю» або за схемою «зірка з ефективно заземленою нейтраллю» через компенсаційний реактор.

Реактори виконуються з просторової осесиметричної магнітної системи, яка дозволяє надійно захистити конструкцію реактора від впливу змінного електромагнітного поля.



Рисунок 3.6 – Фотографія реактора типу РОМ-60000/500-У1 виробництва ЗТР ПрАТ (Запоріжжя, Україна) [29]

Реактори виконуються з центральним феромагнітним стрижнем з немагнітними проміжками, рівномірно розподіленими по довжині стрижня, що призводить до зниження основних втрат через скорочення довжини магнітної силової лінії в немагнітному середовищі.

Частини стрижня набираються із радіально розташованих пластин електротехнічної сталі, склеєних між собою епоксидним компаундом. При цьому досягається мінімальне значення додаткових втрат у стрижні.

Завдяки застосуванню жорсткої конструкції стрижня в реакторі досягнуто мінімального рівня вібрацій (механічних коливань) бака та арматури на баку. На стрижні концентрично розташовується обмотка, намотана підрозділеним скальпованим мідним дротом з ізоляцією зі зміцненого кабельного паперу. Обмотка виконана за схемою «з введенням усередину».

Застосування підрозділеного дроту із трьох тонких елементарних провідників дозволило максимально знизити додаткові втрати в обмотці від осьового поля.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики реакторів РОДЦ, РОМ, РОМБС, РОД, РОДЦГ, РТМ, РОДБС, РОУДЦ [29]

Основні технічні дані реактору					
Тип	Потужність, кВА	Номинальна напруга, кВ	Охолод- ження	Маса, т	Розміри, мм
РОДЦ- 60000/500У1	60000	525/ $\sqrt{3}$	ДЦ	66	6475 x 3200 x 9200
РОДБС- 60000/500У1	60000	525/ $\sqrt{3}$	Д	67,5	4650 x 5145 x 9875
РОМБС- 60000/500	60000	525/ $\sqrt{3}$	М	60,2	4630 x 5060 x 9960
РОД- 40000/550	40000	550/ $\sqrt{3}$	Д	72	6700 x 4950 x 10260
РОМ- 40000/550	40000	550/ $\sqrt{3}$	М	73,7	6700 x 4980 x 10400
РОМБС- 40000/550	40000	550/ $\sqrt{3}$	М	64,0	4775 x 4250 x 9875
РОМБС- 60000/550	60000	550/ $\sqrt{3}$	М	84,0	5000 x 4950 x 9975
РОДЦ- 110000/750У1	110000	787/ $\sqrt{3}$	ДЦ	96	8510 x 3930 x 10900
РОДЦГ- 110000/750У1	110000	787/ $\sqrt{3}$	ДЦ	98,8	7610 x 6580 x 10760
РОДЦ- 300000/1150У1	300000	1200/ $\sqrt{3}$	ДЦ	245	15100 x 8000 x 16400

Дискові котушки обмотки переплетені між собою в пари за новою схемою, яка забезпечила зниження міжкатушкових напруг у 1,5...2,0 рази та суттєве підвищення електричної міцності головної та поздовжньої ізоляції реактора. Для підвищення електричної міцності головної ізоляції маслобар'єрної в конструкцію реактора введені електростатичні екрани.

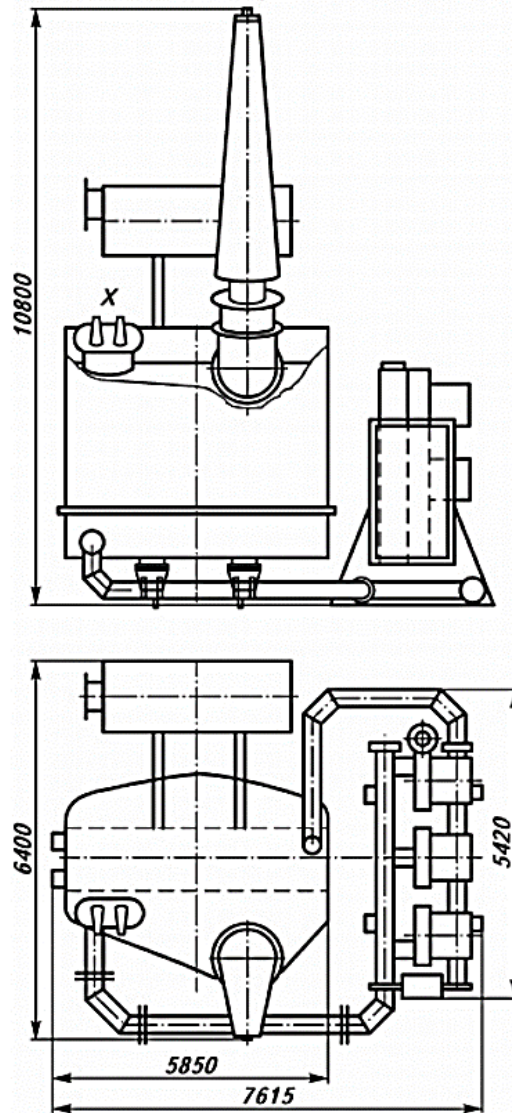


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд та габаритні розміри реактора типу РОДЦ-110 000/750-У1 [65]

4 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК КЕРОВАНОГО РЕАКТОРА ОДНОФАЗНОГО 60 МВАр 500 кВ

Реактор – це статичний електромагнітний пристрій, що призначений для використання його індуктивності в електричному колі. Шунтувальний реактор має значну індуктивність та малий активний опір. Однофазний керований оливний реактор РОДУ-60000/500 з системою охолодження типу ДЦ (примусова циркуляція повітря та оливи) призначений для паралельного включення в мережу із завданням компенсації ємнісного струму. Він споживає реактивну потужність, що генерується високовольтною лінією, її ємнісною складовою, через що знижується напруга в мережі [29].

Через значні питомі значення потужності (реактивна ємнісна складова) високовольтна лінія (ВЛ) 500 кВ сумарна зарядна потужність становиться порівняною з її пропускною спроможністю.

4.1 Методика розрахунку параметрів реактора

Методика розрахунку параметрів реактора описана в [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Основи вибору реактора полягають в тому, що спочатку необхідно розглянути принцип роботи реактора, заснованому на роботі електричних ланцюгів, що містять активний, ємнісний та індуктивний навантаження. В цьому випадку на створення електричного та магнітного поля буде витрачатися енергія, що дорівнює енергії цих полів, де можна відокремити постійну та змінну складову електричного та магнітного поля.

$$W_{\text{м.м.ср.}} = \frac{L \cdot I^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \frac{I^2}{2\omega^2 C} (1 + \cos 2\omega t), \text{ Дж}$$

Постійна складова чисельно дорівнює енергії, що витрачається при перехідному процесі кола

$$W_{\text{м.м.пост.}} = \frac{L \cdot I^2}{2} + \frac{I^2}{2\omega^2 C}, \text{ Дж.}$$

Змінна складова електричного та магнітного поля змінюється з подвійною кутовою швидкістю і розраховується, як

$$W_{\text{м.м.змін.}} = \frac{L \cdot I^2}{2} - \frac{I^2}{2\omega^2 C} \cos 2\omega t, \text{ Дж.}$$

Реактивна потужність процесу, Q пропорційна середньому за $\frac{1}{4}T$ (чверть періоду) енергії, що віддається джерелом на підтримку електричного та магнітного поля.

$$Q = \frac{\pi \cdot \omega \cdot W_{\text{м.м.змін.ср.}}}{2}, \text{ Вт}$$

Виходячи з цих формул слід, якщо

$$\frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{I^2}{2\omega^2 C},$$

тому $Q = 0$, тобто треба підібрати параметри індуктивності та ємності щоб ці вирази були рівними [4, 5, 18, 19, 20, 71].

При виборі реактора зазвичай є високовольтна лінія, що має зарядну ємність, і треба підібрати реактор певної індуктивності, щоб реактивна потужність дорівнювала 0. Щоправда, в технічних вимогах рідко вказується зарядна потужність лінії. Зазвичай вказують реактивну потужність, з якої вираховується необхідна індуктивність, а вже потім з неї вираховуються основні параметри реактора.

4.2 Розрахунок параметрів реактора

4.2.1 Розрахунок індуктивності реактора

Знаходиться комплексний опір із вихідних параметрів згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$Z = \frac{(U / 3)^2}{Q},$$

$$Z = \frac{(525000 / 3)^2}{60000000} = 1531 \text{ Ом.}$$

З комплексного опору знаходиться індуктивність

$$L = \frac{Z}{2\pi \cdot f},$$

$$L = \frac{1531}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 4,9 \text{ Гн.}$$

4.2.2 Розрахунок основних розмірів реактора

Основна формула для розрахунку індуктивності реактора згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$L = \mu_0 \cdot w^2 \left(\frac{S_3}{l_{3.\text{сум}}} + \frac{\frac{S_a}{3} - S_{\text{ст}} - 0,75 \cdot \Pi_{\text{ст}} \cdot \varepsilon}{H_{\text{обм}}} \right),$$

де μ_0 – магнітна стала;

w – кількість витків;

S_3 – площа зазору;

$\frac{S_3}{l_{з. сум}}$ – висота зазору сумарна;

$\frac{S_a}{3}$ – площа однієї треті частини радіального розміру обмотки;

$S_{ст}$ – площа перерізу стрижня;

$P_{ст}$ – периметр перерізу стрижня;

ϵ – опуклість магнітного поля в зазорі;

$H_{обм}$ – висота обмотки.

Оскільки більшість параметрів залежить від діаметра стрижня необхідно задатися їм виходячи з найбільш ефективних розмірів, щоб не було перевитрати сталі або перевитрати дроту.

Отже, візьмемо діаметр стрижня 730 мм. Діаметр отвору в середині 100 мм згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Стрижень візьмемо радіально шихтований зі з'єднанням у середині для правильного розподілу потоків потужності в зазорах та магнітопроводі, які можуть значно впливати на місцеві нагрівання в стрижні. Також можна в реакторах використовувати і евольвентну схему шихтування.

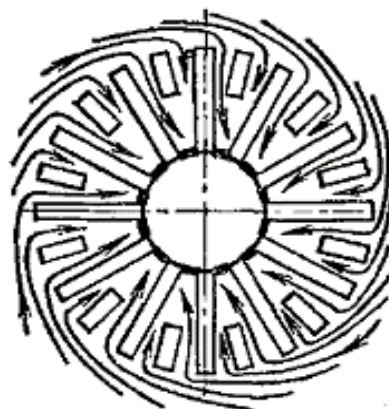


Рисунок 4.1 – Картина потоків потужності у зазорі стрижневого реактора при радіальному вигляді шихтування та центральній схемі заземлення

Сталь магнітопроводу вибирається 3409,30 з індукцією, яку рекомендується взяти 1,72 Тл згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Через те, що це однофазний некерований реактор, вибирається стрижень типу $\frac{1}{2}$ з ярмами в половину перерізу та однією мережевою обмоткою (МО) на основному стрижні згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Порахуємо вольт-виток, виходячи зі стрижня

$$U_{\text{в.в.}} = 4,44 \cdot f \cdot B_{\text{ст}} \cdot k_{\text{зап}} \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{ст}}^2}{2} - \pi \cdot \frac{D_{\text{в.отв.}}^2}{2},$$

де $k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт заповнення стрижня приймається рівним 0,979;

$D_{\text{в.отв.}}$ – діаметр внутрішнього отвору.

$$U_{\text{в.в.}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,72 \cdot 0,979 \cdot \pi \cdot \frac{0,73^2}{2} - \pi \cdot \frac{0,1^2}{2} = 153,5 \text{ В/в.}$$

Знайдемо кількість витків:

$$w = \frac{U_{\text{ф}}}{U_{\text{в.о.}}},$$

$$w = \frac{303,108}{153,5} = 1976 \text{ витків.}$$

Тепер треба визначитися з розмірами обмотки. Приймаємо кількість прокладок (полів), що дорівнює 48. Потрібно підібрати котушки так, щоб дробова кількість витків була більшою за 0,5.

Вибираємо обмотку з безперервною котушкою із вводом у середину RL , 142 котушки, в кожній з яких $27 \frac{40}{48}$ витків на дві зони з урахуванням того, що є дві паралельні гілки згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Тепер вибирається провід, для мідного дроту ефективна густина струму знаходиться в діапазоні 2...3 А/мм².

Розраховується струм реактора за формулою:

$$I = \frac{3 \cdot Q / U}{3},$$

$$I = \frac{3 \cdot 60000 / 525}{3} = 199,95 \text{ A.}$$

Для розрахунку береться три потужності, оскільки система лінії електропередавання є трифазною. Через те, що ввод заводиться в середину, обмотка поділяється на дві зони, і струм також розділяється на два. Отже, у кожній зоні струм буде приблизно дорівнюватиме 100 А згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]. Отже, ефективний переріз витка буде в межах 33...50 А/мм².

Візьмемо транспонований провід ПТБ $\frac{1.5}{2} \cdot 5$, що означає, що у дроті є 5 елементарних провідників з радіальним розміром 1 мм та осьовим – 5 мм, ізоляція дроту 2 мм на дві сторони, товщина склеювання у дроті стандартна 0.1 мм. Візьмемо 2 дроти в радіальному напрямку в 1 витку. Транспонований провід виготовляється з міцніших проводів і має більшу динамічну стійкість у порівнянні зі звичайним дротом. Переріз витка складе 50 мм² щільність струму 2 А/мм².

Отже, тепер можемо розрахувати розміри обмотки:

$$l_{\text{рад}} = l_{\text{ізол}} + l_{\text{склейк}} \cdot n_{\text{склейк}} + l_{\text{рад.пров}} \cdot n_{\text{пров}} \cdot n_{\text{пров.рад.}} \cdot n_{\text{ц.в}},$$

$$l_{\text{рад}} = 2 + 0,1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 28 = 291,2 \text{ мм.}$$

Висоту радіальних охолоджувальних каналів між котушками приймемо 4,8 мм. Усадку ізоляції приймаємо 10% в осьовому напрямку:

$$H_{\text{обм}} = h_{\text{ізол}} \cdot 0,9 + h_{\text{склейк}} \cdot 0,9 + h_{\text{пров}} \cdot n_{\text{пров}} \cdot n_{\text{кат}} + h_{\text{кан}} \cdot n_{\text{кан}},$$

$$H_{\text{обм}} = 2 \cdot 0,9 + 0,1 \cdot 0,9 + 5 \cdot 2 \cdot 142 + 4,8 \cdot 141 = 2365,2 \text{ мм.}$$

Тепер необхідно задатися параметрами головної ізоляції. Є стандартизовані параметри напруженості у трансформаторній оливі:

- між ярмом та обмоткою 8 кВ/мм;
- між обмоткою та стрижнем або екраном стрижня 4 кВ/мм.

Розраховується спочатку ізоляція між ярмом та обмоткою

$$h_{\text{ярм.ізол}} = \frac{U}{E},$$

$$h_{\text{ярм.ізол}} = \frac{525}{8} = 70 \text{ мм.}$$

Ізоляція між обмоткою та стрижнем розраховується згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$h_{\text{ст.ізол}} = \frac{U}{E},$$

$$h_{\text{ст.ізол}} = \frac{525}{4} = 132 \text{ мм.}$$

Також на бічних ярмах і стрижні встановлюються електростатичні екрани на відстані 20 мм від них і завтовшки 3 мм.

Ізоляція від обмотки до бака становитиме 150 мм, від бічного ярма до бака 100 мм. Знайдемо розміри магнітопроводу згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Висота стрижня, що дорівнює висоті вікна розраховується як

$$H_{\text{ст}} = H_{\text{обм}} + 2 \cdot h_{\text{ярм}},$$

$$H_{\text{ст}} = 2365,2 + 2 \cdot 70 = 2505,2 \text{ мм.}$$

Ширина вікна розраховується як

$$B_{\text{вікна}} = h_{\text{ст.ізол}} + l_{\text{рад}} + h_{\text{ярм.ізол}} + 2 \cdot l_{\text{ек}} + l_{\text{кан.ек.ст}},$$

$$B_{\text{вікна}} = 132 + 291,2 + 70 + 2 \cdot 3 + 20 = 539,2 \text{ мм.}$$

Підставляються дані в основну формулу для розрахунку індуктивності реактора

$$L = \mu_0 \cdot w^2 \left(\frac{S_3}{l_{3,\text{сум}}} + \frac{\frac{S_a}{3} - S_{\text{ст}} - 0,75 \cdot \Pi_{\text{ст}} \cdot \varepsilon}{H_{\text{обм}}} \right),$$

$$L = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1976^2 \cdot \left(\frac{S_3}{l_{3,\text{сум}}} + \frac{\frac{291,2}{3} \cdot 3,14 \cdot 730 + 2 \cdot 20 + 3 + 132 + 291,2 - \varepsilon}{2365,2} - \frac{417 - 0,75 \cdot 3,14 \cdot 730}{2365,2} \right), \text{ Гн}$$

Після численних перетворень видно, що залишилися ще не визначені параметри, які вибираються з попереднього рівняння. Отже згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]:

$$H_3 = 34 \text{ мм; } H_B = 96 \text{ мм; } n_3 = 19; n_B = n_3 - 1 = 18.$$

Стрижень також містить не стандартні вставки вгорі та внизу, а також розподільні шунти по 105 мм.

Знайдемо опуклість магнітного поля у зазорі згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$\varepsilon = H_3 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{H_3}{H_B}\right),$$

$$\varepsilon = 0,034 \cdot \frac{1}{3,14} \cdot \ln\left(1 + \frac{0,034}{0,096}\right) = 0,003 \text{ м.}$$

Площа зазору дорівнює:

$$S_3 = S_{\text{ст}} + 4 \cdot D_{\text{ст}} \cdot \varepsilon,$$

$$S_3 = 0,417 + 4 \cdot 0,73 \cdot 0,003 = 0,426 \text{ мм.}$$

Площа стрижня дорівнює:

$$S_{\text{ст}} = k_{\text{зап}} \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{ст}}^2}{2} - \pi \cdot \frac{D_{\text{в.отв.}}^2}{2},$$

$$S_{\text{ст}} = 0,979 \cdot \pi \cdot \frac{0,73^2}{2} - \pi \cdot \frac{0,1^2}{2} = 0,417 \text{ мм.}$$

Уточнимо індукцію стрижня із зазорами згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$B = \frac{B_{\text{ст}}}{\frac{1}{0,979} + \frac{2}{S_{\text{ст}}}},$$

$$B = \frac{1,72}{\frac{1}{0,979} + \frac{2}{0,417}} = 1,657 \text{ Тл.}$$

Індукція в ярмі відповідно дорівнює $B_{\text{ярм}} = 1,6 \text{ Тл.}$

4.2.3 Розрахунок параметрів режиму короткого замикання

Напруга короткого замикання $U_{\text{к}}$ вираховується через індуктивний опір, який розраховувався у п. 4.2.1 за формулою $Z = \frac{(U/3)^2}{Q}$, з якої можна вирахувати згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$U_{\text{к}} = \frac{Z \cdot Q}{U_{\text{ф}}^2},$$

$$U_{\text{к}} = \frac{1540 \cdot 60000000}{303108^2} = 1,005 \text{ \%}.$$

Визначимо довжину проводу

$$l_{\Pi} = \pi \cdot D_{\text{ср.об}} \cdot w,$$

де $D_{\text{ср.об}} = D_{\text{ст}} + 2 \cdot h_{\text{ст.ізол}} + l_{\text{рад}} = 1,3312$ м.

$$l_{\Pi} = 3,14 \cdot 1,3312 \cdot 1976 \cdot 2 = 16520 \text{ м.}$$

Знаходиться опір обмотки за умови сталої температури за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$R_{\text{обм}} = \rho \cdot \frac{l_{\Pi}}{F_{\text{в}}},$$

де $F_{\text{в}}$ – переріз витку,

$$R_{\text{обм}} = 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{16520}{0,00005} = 7 \text{ Ом,}$$

Визначимо втрати у проводі за формулою

$$P_{\Pi} = I^2 \cdot R_{\text{обм}},$$

$$P_{\Pi} = 100^2 \cdot 7 = 70000 \text{ Вт.}$$

Знайдемо додаткові втрати. Індукція поля розсіювання в осьовому напрямку розраховується як

$$B_{\text{ос}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I \cdot w \cdot K_{\text{ос}}}{H_{\text{обм}}},$$

де $K_{\text{ос}}$ – коефіцієнт поправки індукції осьового поля, що дорівнює 0,95,

$$B_{\text{ос}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 1976 \cdot 0,95}{2,3652} = 0,141 \text{ Тл.}$$

Втрати на одиницю маси в обмотці МО від осьових полів дорівнюють згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$p_{\text{в.ос}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{\text{пр}}^2}{18 \cdot \gamma_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{пр}}} \cdot B_{\text{ос}}^2,$$

$$p_{\text{в.ос}} = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,00135^2}{18 \cdot 8900 \cdot 2,135 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,141^2 = 0,261 \text{ Вт/кг.}$$

Маса проводу знаходиться за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$S_{\text{п}} = I_{\text{п}} \cdot y_{\text{п}},$$

$$S_{\text{п}} = 16520 \cdot 0,0005 \cdot 8900 = 7351,4 \text{ кг.}$$

Втрати на одиницю маси в обмотці МО від осьових полів розраховуються як

$$P_{\text{в.ос}} = p_{\text{в.ос}} \cdot G_{\text{пр}},$$

$$P_{\text{в.ос}} = 0,261 \cdot 7351,4 = 1919 \text{ Вт.}$$

Тепер знайдемо втрати від радіального поля розсіювання згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$B_{\text{рад1}} = 0,4 \cdot B_{\text{ос}},$$

$$B_{\text{рад2}} = 0,1 \cdot B_{\text{ос}},$$

$$B_{\text{рад1-2}} = \sqrt{B_{\text{рад1}}^2 + B_{\text{рад1}} \cdot B_{\text{рад2}} + B_{\text{рад2}}^2},$$

$$B_{\text{рад1}} = 0,4 \cdot 0,141 = 0,0564 \text{ Тл,}$$

$$B_{\text{рад2}} = 0,1 \cdot 0,141 = 0,0141 \text{ Тл,}$$

$$B_{\text{рад1-2}} = \sqrt{0,0564^2 + 0,0564 \cdot 0,0141 + 0,0141^2} = 0,064 \text{ Тл.}$$

$$B_{\text{рад2-3}} = B_{\text{рад2}}.$$

Втрати від радіального поля розсіювання в обмотці на одиницю маси проводу розраховуються як

$$P_{\text{в.рад1-2}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{\text{пр}}^2}{18 \cdot \gamma_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{пр}}} \cdot B_{\text{рад1-2}}^2,$$

$$P_{\text{в.ос}} = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,001^2}{18 \cdot 8900 \cdot 2,135 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,064^2 = 0,03 \text{ Вт/кг.}$$

$$P_{\text{в.рад2-3}} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{\text{пр}}^2}{18 \cdot \gamma_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{пр}}} \cdot B_{\text{рад2-3}}^2,$$

$$P_{\text{в.ос}} = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,001^2}{18 \cdot 8900 \cdot 2,135 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,141^2 = 0,01 \text{ Вт/кг.}$$

Повні втрати на ділянках 1-2 та 2-3 від радіальної складової поля розсіювання в обмотці МО розраховуються як

$$P_{\text{в.рад1-2}} = p_{\text{в.рад1-2}} \cdot G_{\text{пр.1-2}},$$

$$P_{\text{в.рад2-3}} = p_{\text{в.рад2-3}} \cdot G_{\text{пр.2-3}},$$

де $G_{\text{пр.1-2}} = 0,05 \cdot G_{\text{пр}}$ та $G_{\text{пр.2-3}} = 0,45 \cdot G_{\text{пр}}$, а отже:

$$P_{\text{в.рад1-2}} = 0,03 \cdot 0,05 \cdot 7351,4 = 11 \text{ Вт,}$$

$$P_{\text{в.рад2-3}} = 0,01 \cdot 0,45 \cdot 7351,4 = 33 \text{ Вт.}$$

Втрати від радіальної складової поля розсіювання в обмотці МО розраховуються згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71] як

$$P_{\text{в.рад}} = 2 \cdot (P_{\text{в.рад1-2}} + P_{\text{в.рад2-3}}),$$

$$P_{\text{в.рад}} = 2 \cdot (11 + 33) = 88 \text{ Вт.}$$

Розрахунок додаткових втрат від циркулюючих струмів, спричинених осьовим полем розсіювання, не проводиться через те, що транспозиція вважається ідеальною, та втрат немає.

4.2.4 Розрахунок динамічної стійкості обмоток при короткому замиканні

Кратність амплітуди ударного струму К.З. по відношенню до номінального значення $K_{КЗ} = 30$ розраховується за співвідношенням для ударного коефіцієнта:

$$K_{уд} = \left(1 + \exp \left[-\frac{\pi \cdot U_{КЗ.а}}{U_{КЗ.р}} \right] \right) = 2,$$

що враховує збільшення струму к.з. через наявність аперіодичної складової.

Ударний струм К.З., що проходить через кожен виток у котушки мережевої обмотки МО розраховується як

$$I_{КЗ.уд} = I_{ном} \cdot K_{КЗ},$$

$$I_{КЗ.уд} = 100 \cdot 30 = 3000 \text{ А.}$$

Розрахунок механічного напруження в обмотках від радіальних сил розраховується із міркувань, що радіальні сили у межах обмотки виникають при взаємодії струму К.З. з осьовим полем розсіювання, в якому знаходиться провідник, та який проходить через провідник. Розрахунок ведеться за середнім зусиллям, що діє на всі провідники в котушці, що розглядається.

З декількох концентрично розташованих обмоток зовнішня завжди піддається розтягуванню, а внутрішня – стисканню під дією радіальних сил. Розрахунок радіальних сил ведеться для обмотки МО.

Середнє алгебраїчне значення індукції осьового поля розсіювання при К.З. котушки, що діє по її ширині

$$B_{\text{ос.ср.КЗ}} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{КЗ.уст}} \cdot \frac{B_{\text{ос}}}{2},$$

де $K_{\text{КЗ.уст}} = 10$,

$$B_{\text{ос.ср.КЗ}} = 2 \cdot 10 \cdot \frac{0,141}{2} = 1,41 \text{ Тл.}$$

Напруження розтягування або стиснення у провіднику котушки дорівнює згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]:

$$G_{\text{рад}} = \frac{B_{\text{ос.ср.КЗ}} \cdot I_{\text{КЗ.уд}} \cdot D_{\text{ср}}}{F_{\text{обм}}},$$

$$G_{\text{рад}} = \frac{1,41 \cdot 3000 \cdot 1,3312}{0,7} = 8044 \text{ Н/м}^2.$$

Розрахунок механічних напруг в обмотках від осьових сил проводиться з міркувань, що осьові сили у провідниках обмотки виникають при взаємодії струму К.З. з радіальним полем розсіювання, якому знаходиться провідник, що проходить через провідник. Розрахунок також ведеться з припущенням усереднення зусиль, що діють на провідник котушки, що розглядається.

Довжина розрахункового прольоту дорівнює

$$l_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ср}}}{n_{\text{прокл}}} - b_{\text{прокл}},$$

$$l_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2912}{48} - 0,06 = 0,001 \text{ м.}$$

Середня алгебраїчна величина індукції радіального поля розсіювання при К.З., що діє вздовж висоти обмотки дорівнює

$$B_{\text{рад.ср.КЗ}} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{КЗ.уст}} \cdot 0,17 \cdot B_{\text{ос}},$$

$$B_{\text{рад.ср.КЗ}} = 2 \cdot 19 \cdot 0,17 \cdot 0,141 = 0,5 \text{ Тл.}$$

Напруження вигину в кожному провіднику котушки визначається з розгляду прольоту між прокладками котушки як балки з защемленими кінцями

$$G_{\text{рад}} = \frac{B_{\text{рад.ср.КЗ}} \cdot I_{\text{КЗ.уд}} \cdot l_0^2}{2 \cdot n_{\text{пар}} \cdot b_{\text{пр}} \cdot h_{\text{пр}}^2},$$

$$G_{\text{рад}} = \frac{0,5 \cdot 3000 \cdot 0,001^2}{2 \cdot 2 \cdot 0,005 \cdot 0,01^2} = 750 \text{ Н/м}^2.$$

Сумарні напруження у провіднику від радіальних та осьових сил не повинні перевищувати допустиме напруження згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$G = G_{\text{рад}} + G_{\text{ос}} \leq [G],$$

$$G = 750 + 8044 = 8794 \text{ Н/м.}$$

Допустиме напруження для мідного транспонованого проводу дорівнює $[G]=2,36 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

Критичне радіальне навантаження $P_{\text{к}}$ для кругової балки, що діє на одиницю довжини балки також розраховується за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]:

$$P_{\text{к}} = K_{\text{у}} \frac{E_{\text{пр}} \cdot I_{\text{пр}}}{D_{\text{ср}}^3},$$

де $E_{\text{пр}}$ – модуль пружності провідника для мідного транспонованого дроту, що дорівнює $2,3 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$;

$I_{\text{пр}}$ – момент інерції перерізу провідника обмотки, що дорівнює

$$I_{\text{пр}} = \frac{h_{\text{пр}} \cdot b_{\text{пр}}^3}{12},$$

$$I_{\text{пр}} = \frac{0,01 \cdot 0,003^3}{12} = 2,25 \cdot 10^{-11} \text{ Н/м.}$$

K_y – коефіцієнт стійкості кругової арки, що залежить від розхилу кінців арки, що визначається центральним кутом і характером втрати стійкості арки, що визначається числом напівхвиль « n », які виникають вздовж арки за умови втрати стійкості, а отже:

$$K_y = \left(\frac{n_{\text{прок}}}{2} \right)^2 - 1,$$

$$K_y = \left(\frac{48}{2} \right)^2 - 1 = 575.$$

$$P_k = 575 \frac{2,3 \cdot 10^{11} \cdot 2,25}{1,3312^3} = 2235;$$

Критична напруга у провіднику G_k , що відповідна критичному радіальному навантаженню P_k , розраховується як

$$G_k = \frac{K_y \cdot E_{\text{пр}} \cdot b_{\text{пр}}^2}{12 \cdot R_{\text{ср}}^2},$$

$$G_k = \frac{575 \cdot 2,3 \cdot 10^{11} \cdot 0,003^2}{12 \cdot 1,3312^2} = 5,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м.}$$

Згідно з вимогами згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71] критерій стійкості обмотки, що піддається стисканню виконується, тобто $G_{\text{рад}} \leq G_k$.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ КЕРОВАНОВОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ОДНОФАЗНОГО ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРУ 60000/500

Для оцінки роботи КППР у різних режимах в умовах випробувань та в умовах експлуатації різними виробниками та ПрАТ «Запоріжтрансформатор» проводилися розробки математичних моделей КППР, також випробувального обладнання, обладнання електричних мереж та підстанцій. Вважається, що створення адекватних моделей дозволяє відпрацьовувати та оптимізувати алгоритми роботи систем автоматизованого керування КППР, а також проводити перевірку нових конструктивних рішень електромагнітної частини та напівпровідникових перетворювачів КППР. Розробка моделей розробниками переважно проводиться в програмному комплексі MATLAB/Simulink/SimPowerSystem [2, 3, 29, 59, 72].

У роботі [1, 2] наведено описи моделей електромагнітних частин (ЕМЧ) КППР різного конструктивного виконання, моделей випробувального обладнання, моделей, що імітують різні види заводських випробувань електромагнітних частин. Наведено експериментальні дані та результати розрахунків роботи КППР в умовах заводських випробувань та в умовах експлуатації.

На рисунку 5.1 наведена схема електрична принципова електромагнітної частини РОДУ 60000/500 трифазного реактора РТУ-180000/500 конструктивного виконання А [29].

В електромагнітній частині реактора даного виконання є обмотка керування (ОК), що складається з чотирьох секцій, розташованих попарно навколо двох напівстрижнів магнітної системи (ОК11 і ОК12, ОК21 і ОК22), а також мережева обмотка (МО), що охоплює обидва напівстрижня. Особливістю даного конструктивного виконання є відсутність у реактора окремої компенсаційної обмотки (КО). Для придушення третьої гармонійної складової струму реактора та живлення напівпровідникового перетворювача

використовуються вводи «а» і «х», а для керування – вводи «+» та «-» обмотки керування реактора. Шунтувальний резистор R , підключений до вводу обмотки керування призначений для утворення кола розряду індуктивності обмотки та для зниження рівня перенапруги на вводах обмотки [48, 49, 62, 63].

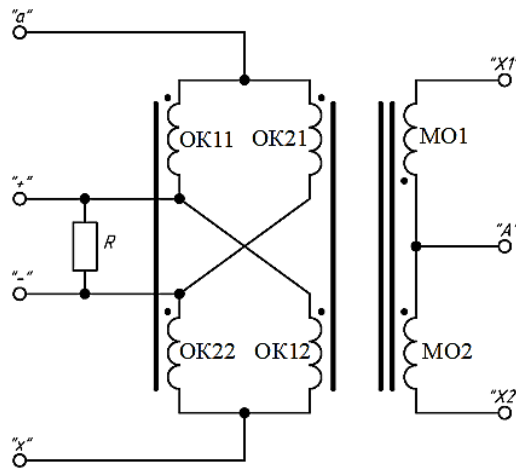


Рисунок 5.1 – Схема електрична принципова РОДУ-60000/500 виконання А

На рисунку 5.2 наведена схема електрична принципова електромагнітної частини РОДУ 60000/500 трифазного реактора РТУ-180000/500 конструктивного виконання Б. В електромагнітній частині реактора даного виконання є компенсаційна обмотка (КО) та обмотка керування (ОК), що складаються з двох секцій, розташованих навколо двох напівстрижнів магнітної системи, а також мережева обмотка (МО), що охоплює обидва напівстрижні.

Моделі електромагнітних елементів КППР розроблялися двома способами. Перший спосіб – це побудова моделей на основі еквівалентної схеми заміщення магнітної системи реактора (схема ЕМ моделі). У моделях на основі еквівалентної схеми заміщення магнітної системи реактора зв'язок між електричними та магнітними ланцюгами реалізовувалася за допомогою джерела магнітного потоку. Принцип реалізації такого зв'язку показано на рисунку 5.3. Нелінійні ділянки магнітного кола реалізуються за допомогою джерел магнітної напруги, приклад яких наведено на рисунку 5.4 [29, 48, 49, 62, 63].

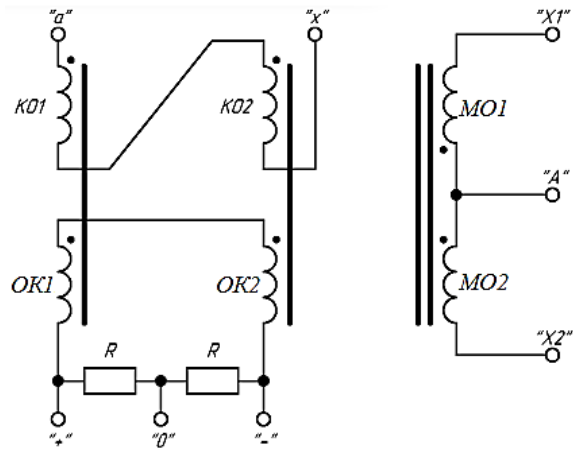


Рисунок 5.2 – Схема електрична принципова РОДУ-60000/500 виконання Б [29]

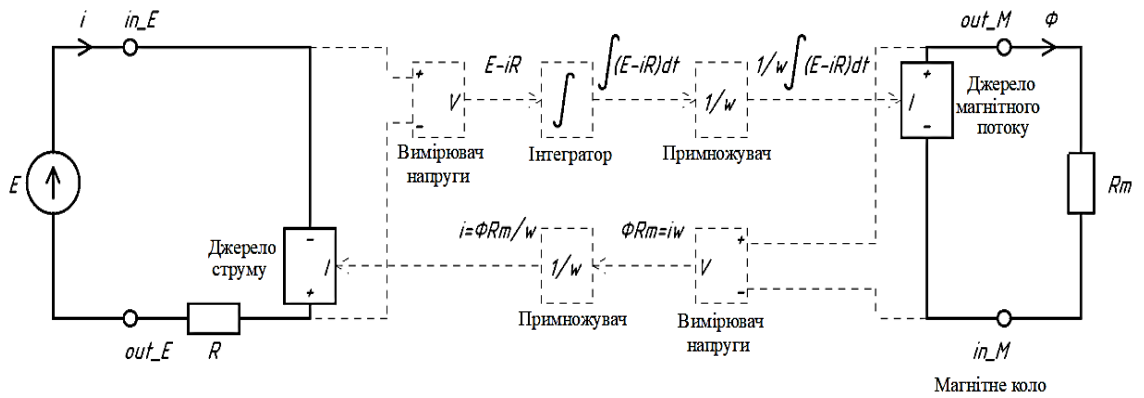


Рисунок 5.3 – Принцип реалізації зв'язку між електричними та магнітними колами

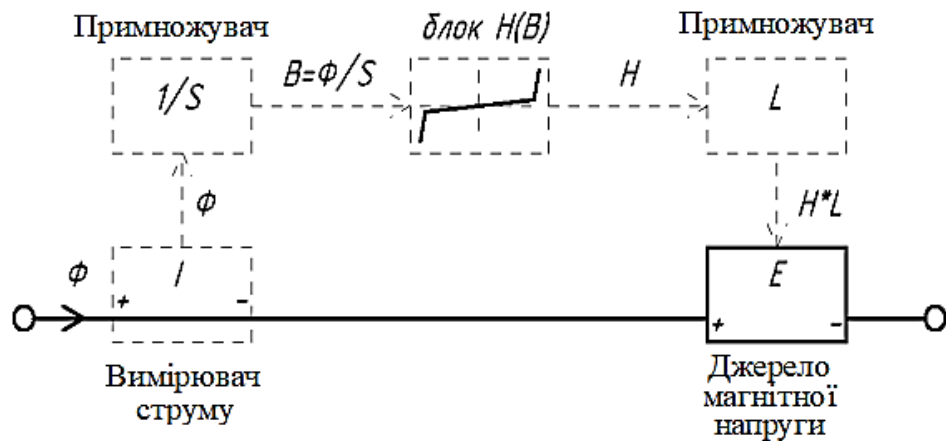


Рисунок 5.4 – Принцип реалізації нелінійної ділянки магнітного кола

Еквівалентна схема заміщення магнітної системи реактора РОДУ-60000/500 виконання А наведено на рисунку 5.5, схема електромагнітної моделі (ЕМ) моделі електромагнітної частини реактора – на рисунку 5.6, а результати моделювання ЕМ моделі при подачі на МО змінної, а на ОК постійної напруги – на рисунку 5.7.

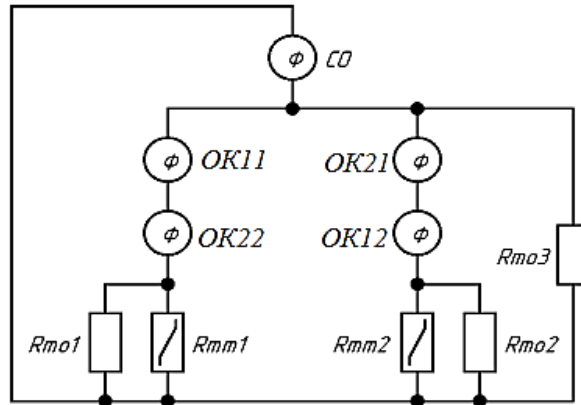


Рисунок 5.5 – Схема заміщення магнітної системи реактора виконання А

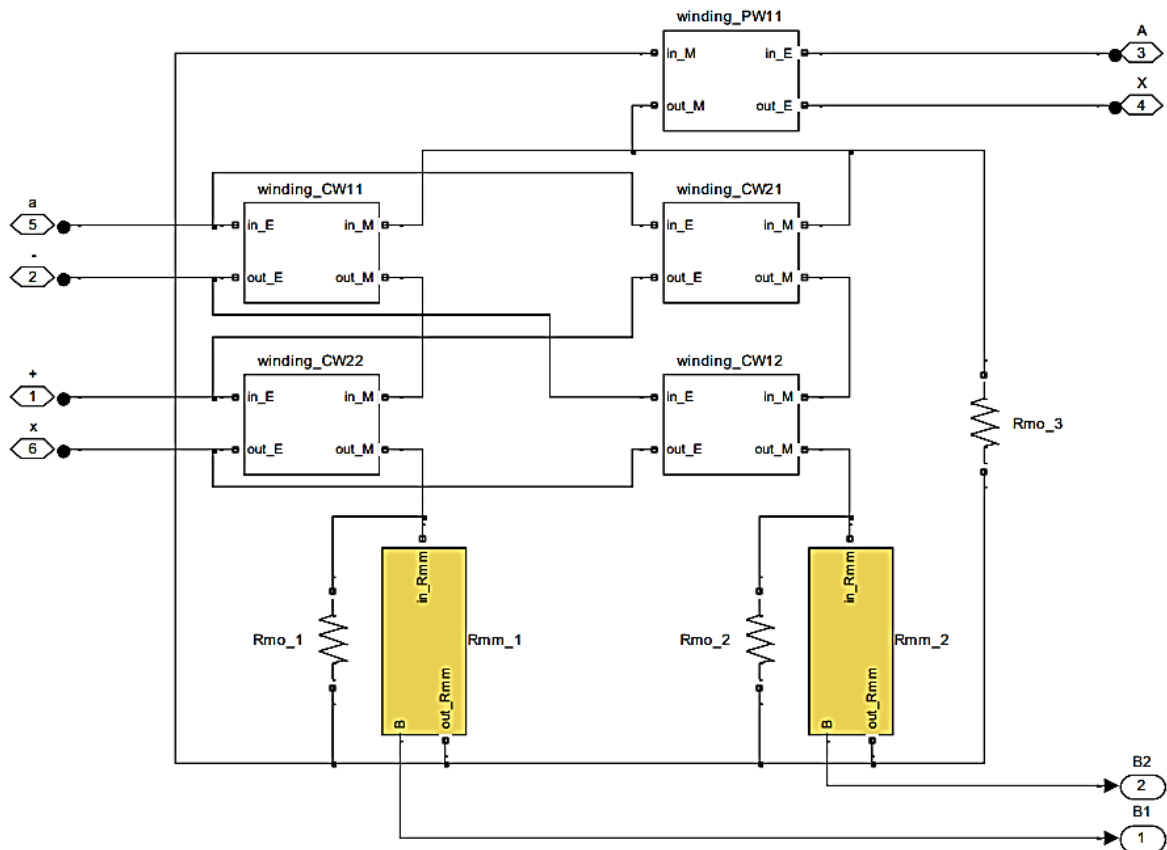
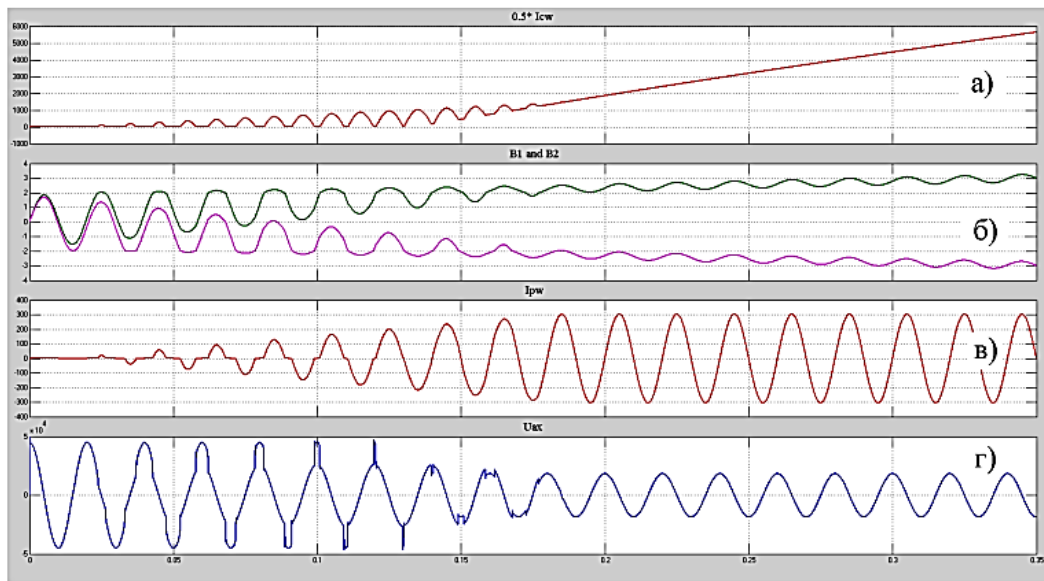


Рисунок 5.6 – Схема електромагнітної моделі (ЕМ) частини реактора виконання А



а) струм у ОК; б) індукції у напівстрижнях; в) струм у МО; г) напруга на КО.

Рисунок 5.7 – Результати моделювання ЕМ моделі реактора виконання А при подачі на МО змінної, а на ОК постійної напруги

Другий спосіб – побудова моделей електромагнітних частин КШР на основі електричної схеми заміщення реактора (ЕТ моделі). Такі моделі розроблялися шляхом використання SimPowerSystem-блоків Saturable Transformer, заснованих на Т-образній схемі заміщення трансформатора. Схема ЕТ моделі електромагнітної частини реактора РОДУ-60000/500 виконання А наведено на рисунку 5.8, а результати моделювання ЕТ моделі при подачі на МО змінної напруги, але в ОК постійної напруги – на рисунку 5.9. На відміну від ЕМ моделей параметри ЕТ моделей визначаються на основі розрахунку або вимірювання власних та взаємних індуктивностей обмоток та їх частин, розрахункових або вимірних втрат в обмотках, магнітопроводі та елементах конструкції. Для обліку нелінійності використовується залежність $B(H)$ для еквівалентного магнітного ланцюга реактора (за результатом розрахунку або вимірювання). Тобто параметри ЕТ моделі повніше відбивають характеристики реального реактора. Далі розглядаються результати розрахунків за моделями типу ЕТ.

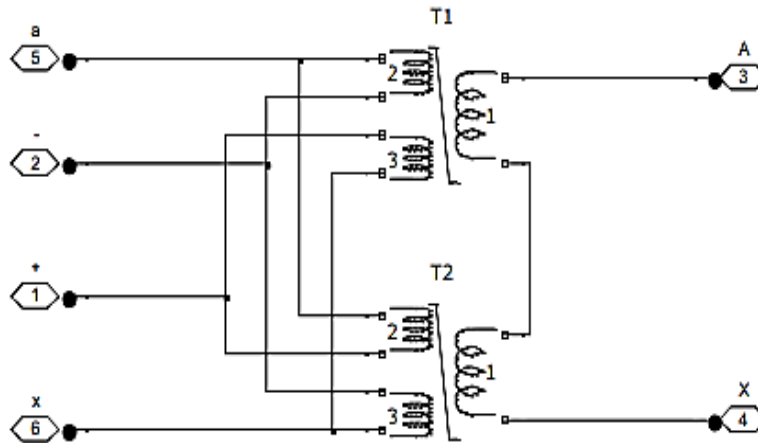
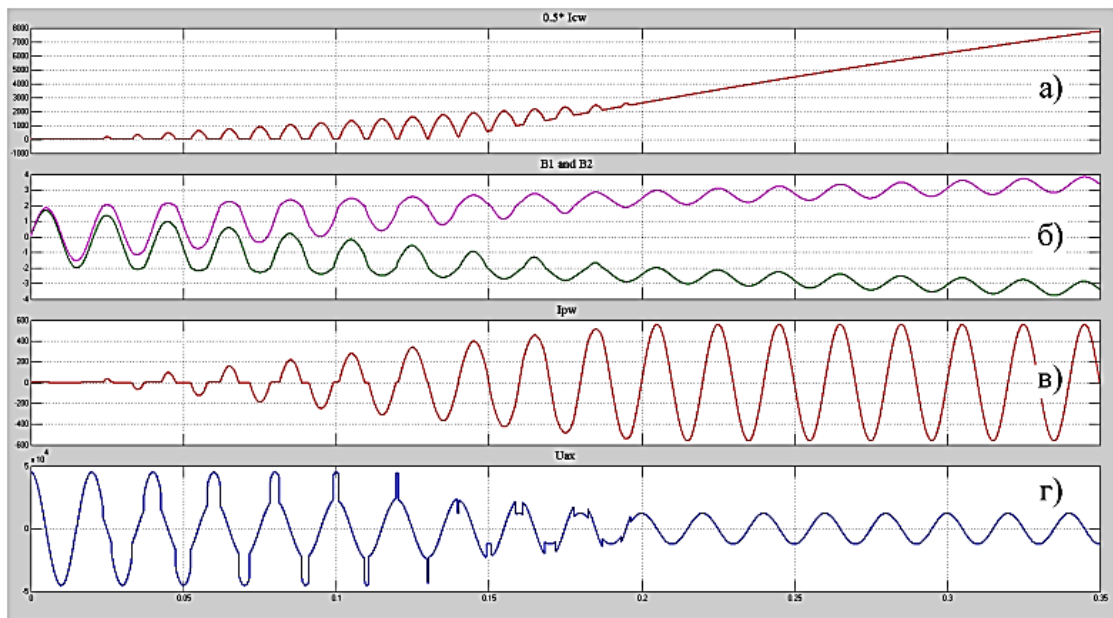


Рисунок 5.8 – Схема ЕТ моделі ЕМЧ реактора виконання А



а) струм у ОК; б) індукції у напівстрижнях; в) струм у МО; г) напруга на КО.

Рисунок 5.9 – Результати моделювання ЕТ моделі реактора виконання А при подачі на МО змінної, а на ОК постійної напруги [29]

На рисунку 5.10 наведено функціональну схему моделі вимірювання втрат реактора виконання А у режимі холостого ходу (ХХ). На рисунку 5.11 – схема моделі вимірювання втрат реактора режим короткого замикання (КЗ). На рисунку 5.13 – схема моделі випробувань для перевірки потужності реактора. Результати моделювання та результати наведені у таблицях 5.1 та 5.2.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних дозволяє зробити висновок про достатню точність розробленої моделі електромагнітної частини реактора РОДУ-60000/500-У1 виконання А [29, 72].

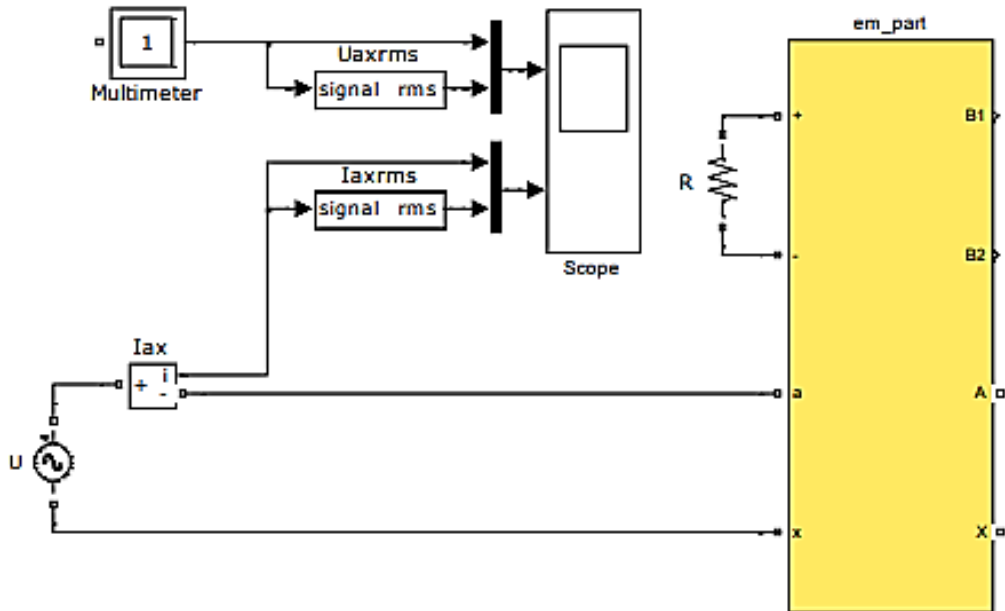


Рисунок 5.10 – Модель вимірювання втрат реактора виконання А у режимі холостого ходу [29]

Таблиця 5.1 – Результати моделювання та вимірювання втрат реактора РОДУ-60000/500 [29, 72]

Найменування об'єкту РОДУ-60000/500	U_{ax} , кВ	I_{ax} , А
Режим ХХ	31,8	3,90
Режим КЗ	36,96	49,5

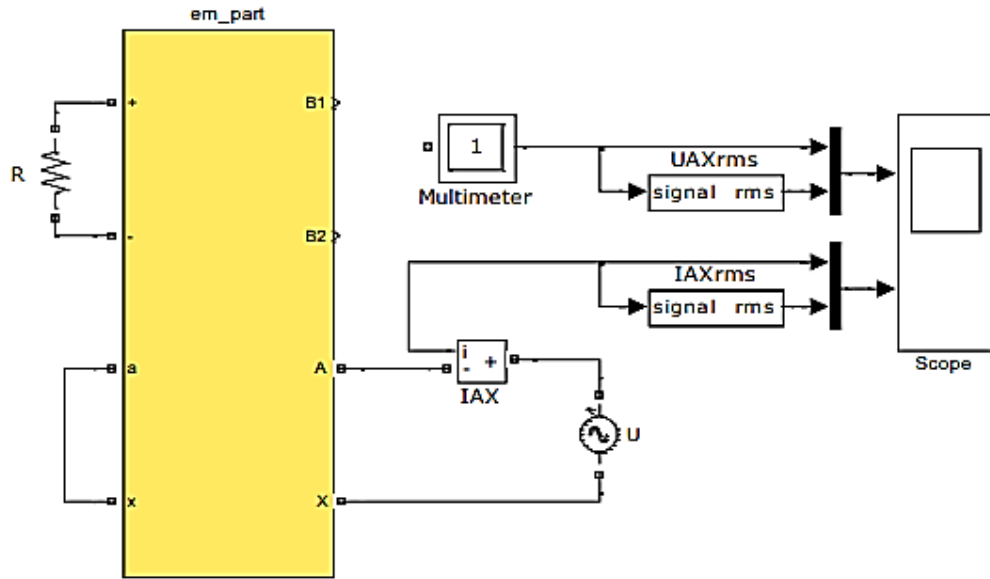


Рисунок 5.11 – Модель вимірювання втрат реактора виконання А у режимі короткого замикання [29]

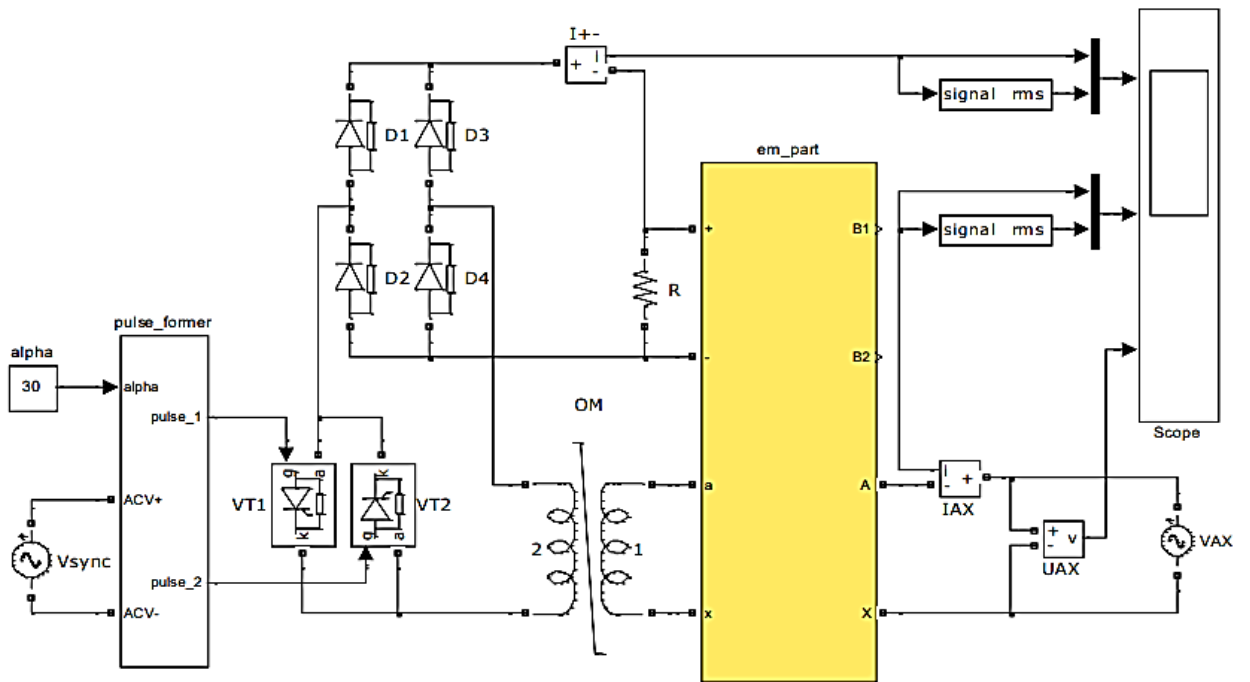


Рисунок 5.12 – Модель випробувань реактора виконання А для перевірки потужності реактора [29]

Таблиця 5.2 – Результати моделювання та перевірки потужності реактора

Найменування об'єкту РОДУ-60000/500	U_{ax} , кВ	I_{ax} , А	I_{+} , А
Модель (розрахунок)	304	201,6	1682,5

Схема ЕТ моделі електромагнітної частини реактора РОДУ-60000/500 виконання Б наведено на рисунку 5.13, а результати розрахунку ЕТ моделі при подачі на МО змінного, а на ОК постійного напруги – на рисунку 5.14.

Схеми функціональних моделей, що імітують заводські випробування реактора виконання Б аналогічні наведеним вище для реактора виконання А. Результати моделювання реактора РОДУ-60000/500-УХЛ1 виконання Б наведено у таблицях 5.3...5.4.

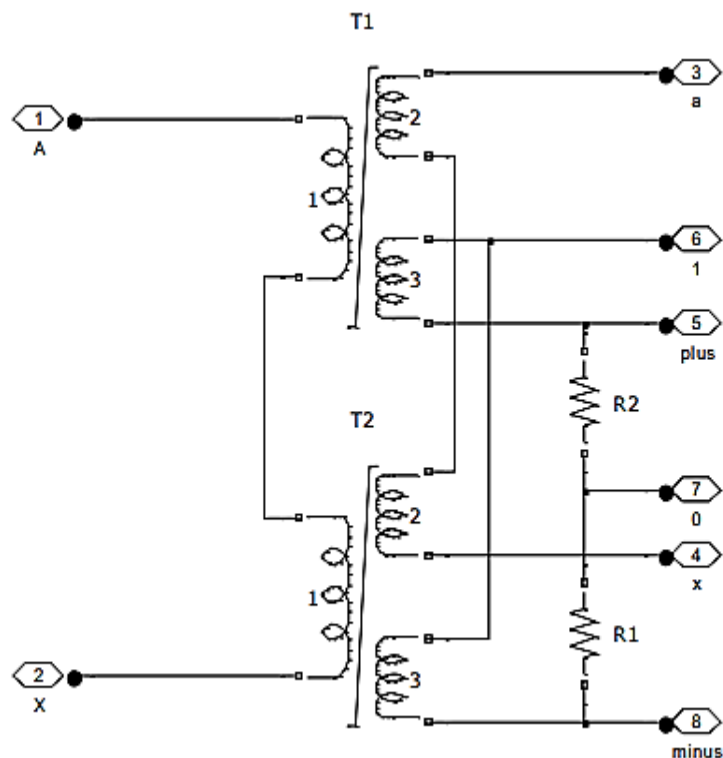


Рисунок 5.13 – Схема функціональна ЕТ моделі ЕМЧ реактора виконання Б

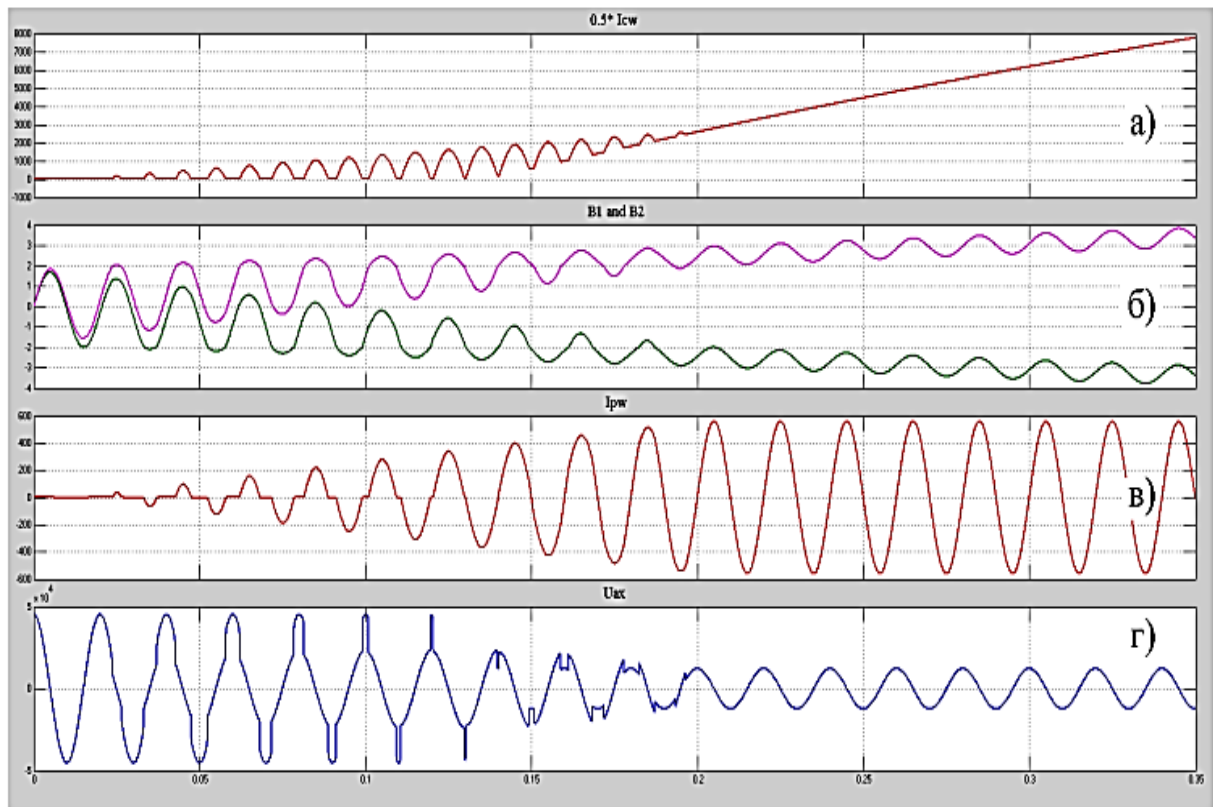


Рисунок 5.14 – Результати розрахунку ЕТ моделі реактора виконання Б:

а) струм у ОК; б) індукції у напівстрижнях; в) струм у МО; г) напруга на КО.

Таблиця 5.3 – Результати моделювання втрат ХХ виконання Б за номінальною напругою, що подаються на обмотку КО та МО

Найменування реактору	Параметр		
	$U_{ко}$, кВ	$I_{ко}$, А	$P_{ко}$, кВт
РОДУ-60000/500 Модель КО (розрахунок)	10,705	6,1200	33,485
РОДУ-60000/500	$I_{мохх}$, А	$P_{мохх}$, кВт	$Q_{мохх}$, кВАр
Модель МО (розрахунок)	0,2090	32,432	54,501

Таблиця 5.4 – Результати моделювання втрат КЗ виконання Б за номінальною напругою, що подаються на обмотку КО та МО

Найменування реактору	Параметр		
	U _{мо} , кВ	I _{мо} , А	P _{мо} , кВт
РОДУ-60000/500	U _{мо} , кВ	I _{мо} , А	P _{мо} , кВт
Модель КО-КО (розрахунок)	15,087	17,875	2,972
РОДУ-60000/500	U _{мо} , кВ	I _{мо} , А	P _{мо} , кВт
Модель КО-ОК (розрахунок)	33,279	52,149	37,694

Таблиця 5.5 – Результати моделювання та номінальні значення параметрів виконання Б

Параметр	Q _{мо} , МВАр	I _{мо} , А	I _{оК} , А
Номінальне значення	60,00	198,0	745,0
Модель	60,13	198,9	747,9

Порівняння розрахункових та експериментальних даних, які наведені в джерелах [29], дозволяє зробити висновок про достатню точність розробленої моделі електромагнітної частини реактора РОДУ-60000/500.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розроблено шунтувальний реактор типу РОДУ-60000/500 з обмоткою з мідного дроту. Реактор призначений для тривалої роботи при стаціонарній установці на відкритому повітрі на висоті не більше ніж 1000 м над рівнем моря. Кліматичне виконання та умови експлуатації за ГОСТ Р 52719 і ГОСТ 15150-69 для помірного (У) та наближеного до холодного (УХЛ) клімату. Область застосування – компенсація реактивних потужностей у високовольтних лініях електропередавання.

За аналогом та індуктивністю, а також ряду ефективних перерізів стрижня на цю потужність визначено лише діаметр стрижня, а всі решта параметрів даного реактора було розраховано.

Зроблений розрахунок відрізняється від аналога моделлю реактора та формою бака. Новий реактор відповідає заданим характеристикам.

В електромагнітному розрахунку обрано індукцію в магнітопроводі, який дорівнює 1.72 Тл, що рекомендовано виробником, кількість витків в обмотках, тип обмоток, розміри обмотувальних проводів. В результаті було отримано наступні результати:

- висота обмотки МО дорівнює $H_{\text{обм}} = 2365,2$ мм;
- напруга короткого замикання становить 1,005%.
- втрати холостого ходу зменшилися і склали 22886 Вт;
- струм холостого ходу зменшився і склав 10 А.

Розрахунок обмоток на загальний перегрів та на перегрів найбільш нагрітих точок показав, що температура не перевищує допустимих значень.

У динамічному розрахунку обмоток перевірено стійкість останніх на розтягування та стискання при короткому замиканні.

Розроблено комп'ютерну модель електромагнітної частини однофазного реактора, що дозволяє на стадії проектування проаналізувати його поведінку в симетричних та несиметричних перехідних та усталених режимах роботи, оцінити швидкодію, виявити особливості проведення комутаційних операцій

спільно з лініями електропередавання, знайти оптимальні алгоритми керування потужністю ШР.

З використанням розроблених моделей обладнання КШР створено модель для дослідження режимів роботи електромагнітної частини однофазного реактора за умов експлуатації.

Розробка та розрахунок подібних моделей для різних режимів роботи (регулювання, комутаційних, аварійних) дозволить оптимізувати параметри та алгоритми роботи обладнання ШР, що дозволить призвести до підвищення їхньої надійності при експлуатації.

Керовані шунтувальні реактори використовуються для плавної автоматичної стабілізації напруги та регульованого споживання реактивної потужності у точці підключення до електричних мереж. Завдяки даним пристроям може досягатися точність регулювання напруги до 0,2 % від заданої установки, враховуючи особливості обладнання витримувати навантаження, досягати суттєвого скорочення чисельності комутацій РПН силових трансформаторів та автотрансформаторів.

Поряд з освоєнням та промисловим впровадженням нових типів керованих реакторів не менш актуальними є проблеми дослідження їх режимів у реальних електричних мережах та розробки на цій основі засобів керування, захисту, а також способів та пристроїв покращення динамічних характеристик. Якщо електромагнітні частини реакторів різних потужностей та класів напруги вже випускаються заводами України та світових виробників, то питання створення систем керування, комплексів захисту від аварійних режимів, спеціальних засобів підвищення швидкодії реакторів різного призначення дотепер не мали теоретичного обґрунтування та відповідних технічних рішень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. АТ Український науково-дослідний проектно-конструкторський та технологічний інститут трансформаторобудування «ВІТ» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.vit.zp.ua/>
2. Афанасьєв О.І. Електричні апарати високої напруги / О.І. Афанасьєв, Л.Б. Жорняк, В.М. Щусь. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 356 с.
3. Афанасьєв О.І. Е50 Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О. І. Афанасьєв, Л. Б. Жорняк, О. В. Немикіна, В. М. Щусь; за заг. ред. П. Д. Андрієнко. – Запоріжжя : НУ Запорізька політехніка, 2023. – 432 с.
4. Вибір електроустаткування під час проектування трансформаторних підстанцій середньої/низької напруги [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://new.abb.com/>
5. Вибір струмопровідних частин та апаратів. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/9kulyk_modelyuvannya_zadachah_rozvytku_elektrsystem/5_1.htm
6. ГОСТ 1516.2-97 Електроустаткування і електроустановки змінного струму на напругу 3 кВ і вище. Загальні методи випробувань електричної міцності ізоляції. З поправкою [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://online.budstandart.com>
7. Дмитрієв, М. В. Керовані підмагнічуванням шунтувальні реактори / М. В. Дмитрієв, А. С. Карпов, Є. Б. Шескін, А. Г. Долгополов, Д. В. Кондратенко. За ред. Г. А. Євдокуніна. – СПб.: Рідна Ладога, 2013. – 280 с.
8. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. Чинний від 1995-01-01. [Текст]. – Київ: Держспоживстандарт України, 1995. – 65 с.
9. ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні. Терміни та визначення [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://online.budstandart.com>

10. ДСТУ EN 50160-2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.loe.ant.lviv.ua/>

11. Електричні мережі та системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. П. Шевчук, О. В. Мейта. – Електронні текстові данні (1 файл: 4,46 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.– 167 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48808/1/Elektrychni_merezhi_ta_systemy.

12. Жорняк, Л.Б. Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму [Текст] / Л.Б. Жорняк, О. І. Афанасьєв, Р.С. Леонов , А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. - № 34(1256). - С. 14-18.

13. Кирик, В. В. Електричні мережі та системи. Режим роботи розімкнених мереж. Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» [Текст] / В. В. Кирик. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 130 с.

14. КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zva.zp.ua>

15. Малогулко, Ю. В. Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник [Текст] / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 200 с.

16. Моделювання електромагнітних перехідних процесів керованих підмагнічуванням шунтувальних реакторів виробництва ПАТ «Запоріжтрансформатор» в умовах заводських випробувань та в умовах

експлуатації Л.М. Конторович, технічний директор ПрАТ "ЗТР", к.т.н.; І.А. Широков, начальник бюро розробки систем керування реакторів ПАТ «ЗТР»

17. Новіков, В. О. Аналіз конструктивних методів підвищення роботоздатності високовольтних вводів вимірювальних трансформаторів [Електронний ресурс] / Є. М. Гавріков, В. О. Новіков, О. І. Сьотка, І. М. Чабан // Тиждень науки-2023. Електротехнічний факультет Тези доповідей науково-технічної конференції, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р. [Електронний ресурс] / Редкол.: Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – С. 160 – 162. – Режим доступу: https://zr.edu.ua/uploads/dept_s&r/2023/conf/4.1/TN-2023-ETF.pdf.

18. Орлович, А. Ю. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання [Текст] / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський, О. В. Співак, А. І. Котиш, Т. В. Величко. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

19. Орлович, А. Ю. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання. Навчальний посібник для напряму підготовки 6.050701 «Електроенергетика та електротехнології» [Текст] / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, Т. В. Величко. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2009. – 334 с.

20. Півняк Г.Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання [Текст] / Г. Г. Півняк, Г. А. Кігель, Н. С. Волотковська. – Дніпропетровськ: Національний технічний університет, 2002. – 219 с.

21. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ: Основа, 1998. – 381 с.

22. Правила улаштування електроустановок: / Міненерговугілля України. – Київ: 2017. – 617 с.

23. Релеекспорт RITZ & EGE [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://Анонс_Relayexport%20-%20electrical%20equipment.pdf

24. Сухі трансформатори з литою ізоляцією // Zucchini [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.legrand/liblocal/.../DC079_Zucchini

25. ТОВ "Високовольтний Союз – РЗВА" (Рівненський завод високовольтної апаратури) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.rzva.ua>

26. ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ua.eliz.zp.ua>

27. https://energyservisvp.kr.ua/ua/product_list

28. ТОВ «Науковий інноваційно-технологічний трансформаторний завод "НІТТЗ"» [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://youcontrol.com.ua/ru/catalog/company_details/

29. Трансформатори та шунтувальні реактори - ЧАО «ЗТР» (ztr.ua) www.ztr.ua/ru/photo?g_id=3 www.ztr.ua/ru/shuntiruushie-reaktori

30. Шунтувальний реактор ЗТР, Запоріжтрансформатор (ztr.ua)

31. ЧП «ЕЛТІЗ» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.eltiz.ua>

32. Шестеренко, В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник [Текст] / В. Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова книга, 2011. – 656 с.

33. [HF RU Brochure 28092012_1TFC902037N1101.pdf \(abb.com\)](http://www.abb.com)

34. <https://asenergi.com/catalog/predohraniteli/smd-chip.html>

35. <http://electricalschool.info/main/elsnabg/>

36. <http://eliz.zp.ua/catalog-eliz/conductor/234-tokoprovod-zakrytyy-serii-tzk-kruglogo-secheniya.html>

37. <https://new.siemens.com/ua/uk/produkty/enerhetyka/topics/tsyfrovi-pidstantsiyi.html>

38. <http://ntt-trafo.ru/wp-content/uploads/2018/05/Catalog-Tokoprovod-Duresca.pdf>

39. <http://relayexport.com.ua/>

40. <https://ua.bizorg.su/kremenchug-rg/c476965-avm-amper-ooo/ustroystva-komplektnye-raspreditelnye>

41. <http://smartenergo.net/products/vysokovoltnoe-oborudovanie-dlya-oru/186.html> Сименс
42. http://www.tekhar.com/Production/Compensation/index_filter_comp_vv_SVC.htm
43. https://bussfuse.ru/articles/kak_pravilno_podobrat_bystrodejstvuyuwij_pr_edohranitel/
44. <https://electroinfo.net/transformatory/chto-takoe-transformatornaja-podstancija.html>
45. <https://eltiz.ua/product/reaktor-filtrovyi>
46. <https://eltron.com.ua/predohraniteli-plavkie-modulnye>
47. https://energobelarus.by/market/komplektnye_tokoprovody_i_shinoprovo_dy/
48. <https://enext.ua/uk/services/ustroystva-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti/?gclid>
49. https://itexn.com/13637_reaktory-vidy-ustrojstvo-oboznachenie-i-vybor-reaktorov.html
50. <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/elektricheskie-seti-energoemkih-predpriyatiy-14.html>
51. <https://n-tel.com.ua/frako.html>
52. <https://shinoprovod.pro>
53. <https://sitemasters.com.ua/elektroobladnannja/vidi-i-sistemi-zazemlennja-tn-s-tn-c-tn-c-s-it-v/>
54. <https://www.alstom.com/>
55. <https://studfile.net/preview/>
56. https://studme.org/32691/bzhd/sistemy_zazemleniya_elektricheskikh_setey
57. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електростанція>
58. https://web.archive.org/web/20111106060738/http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/digital_substation_and_its_main_fragments/
59. https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feem/9kulyk_modelyuvannya_zadach_ah_rozvytku_elektrsystem/5_1.htm

60. https://wikipedia.org/wiki/Ємнісна_компенсація
61. <https://www.dacpol.eu/pl/eaton-bussmann>.
62. <https://www.energy-t/catalog/krm/batarei-staticeskix-kondensatorov.html>
63. <https://www.mircond.com/blog/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti-na-promyshlennykh-predpriyatiyakh/>
64. <https://www.ukkz.com/catalog/staticheskie-tiristornye-kompensatory-reaktivnoj-moshchnosti.html#:~:text=Статические%20тиристорные%20компенсаторы%20реактивной%20мощности%20являются%20одним%20из%20устройств%20с%20обеспечивающих,передачи%20и%20распределения%20электрической%20энергии.>
65. <https://relayexport.com/products/HighVoltageGearEquipment/>
66. <https://zprua.com/product/tiristornye-kompensatory-reaktivnoj-moshhnosti-serii-tkrm-novogo-pokoleniya/>
67. [https://Компенсуючі пристрої — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](https://Компенсуючі пристрої — Вікіпедія (wikipedia.org))
68. <http://www.energyland.info/analitic-show-101029>
69. <https://www.cgglobal.com.ua/tms/files/KRUE.pdf>
70. <https://leg.co.ua/info/podstancii/krue-110-800-kv.html>
71. Methodical instructions for the course project on the subject: “High Voltage Apparatus” for the students of the specialty 141 – "Power, Electrical and Electromechanical Engineering" / Comp.: A. Afanasiev, V. Vasilevskij. – Zaporozhye: "Zaporizhzhia Polytechnic" National University, 2020. – 18 p.
72. Simulink. Model-Based and System-Based Design. Using Simulink. The Math Works, Inc. USA, 2002
73. Trenchcompany [Електроний ресурс] – Режим доступу: <http://www.trenchgroup.com/en>