

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 керованого підмагнічуванням трифазного шунтувального реактора 63 МВАр, 110 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

ЛУШПАЙ В. В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ЖОРНЯК Л.Б.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент БЕМЗА В. А.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне 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)

ЛУЩПАЙ Владислав Валерійович
(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Моделювання керованого підмагнічуванням трифазного шунтувального реактора 63 МВАр, 110 кВ

керівник проєкту (роботи) к. т. н., доцент ЖОРНЯК Людмила Борисівна
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

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

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 30 листопада 2023 року
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Напруга мережевої обмотки 110 кВ, компенсаційної обмотки 11 кВ, обмотки керування 23,3 кВ. Потужність холостого ходу 1000 кВАр, номінальна 63000 кВАр, максимально допустима 75000 кВАр. Струм мережевої обмотки 300 А, компенсаційної обмотки 380 А, обмотки керування 450 А, обмотки дроселя 380 А
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Огляд існуючих конструкцій пристроїв компенсації реактивної потужності. 2 Електромагнітний розрахунок реактора. 3 Розробка імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтуючого реактора. Висновки. Перелік джерел посилання
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Керований шунтувальний реактор 110 кВ Загальний вид – А1, 1 лист
Остов Складальне креслення – А1, 1 лист

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (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 проєкту 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 ЛУШПАЙ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

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

РЕФЕРАТ

ПЗ: 89 с., 32 рисунки, 23 таблиць, 73 джерела.

КЕРОВАНІЙ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУВАЛЬНИЙ РЕАКТОР,
МЕРЕЖА, КЕРУВАННЯ, КОМПЕНСАЦІЯ, ПОТУЖНІСТЬ, ТРАНСФОРМА-
ТОР, ОБМОТКА, МАГНІТОПРОВІД, БАК, ТРАНСФОРМАТОРНА ОЛИВА

Актуальність.

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 високої та надвисокої напруги (ЛЕП ВН та 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 викиачів. КПШР, що встановлені на повітряних лініях електропередавання, забезпечують обмеження вимушеної складової напруги на лінії при її односторонньому включенні. КПШР, 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].

В даний час все більш широке застосування в електричних мережах високої напруги знаходять КПШР 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 для мереж напругою 110 кВ і вище в зв'язку зі спадом промислових навантажень і зростанням надлишків реактивної потужності. Ці завдання все важче вирішувати раніше встановленим обладнанням, що підтверджується відповідними роботами різних дослідників та розробників цих пристроїв стійкості [2, 3, 4, 7, 9, 15, 18, 28].

Об'єкт дослідження – електромагнітні характеристики керованих шунтувальних реакторів в електричних мережах та їх електродинамічні характеристики.

Предмет дослідження – керований підмагнічуванням шунтувальний реактор на номінальну напругу 110 кВ та номінальну потужність 63000 кВАр.

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 КШР 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. Лушпай В. В. Підвищення якості електроенергії за рахунок керованих шунтувальних реакторів [Електронний ресурс] / Л.Б. Жорняк, В.В. Лушпай, І.М. Тищенко // 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. 168 – 169. – Режим доступу: https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2023/conf/4.1/TN-2023-ETF.pdf

2. Лушпай В. В. Підвищення якості електроенергії за рахунок керованих шунтувальних реакторів // Тиждень науки-2023. Електротехнічний факультет, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р.: доповідь. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ.....	2
РЕФЕРАТ.....	4
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КЕРОВАНИХ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ.....	15
1.1 Огляд існуючих конструкцій керованих шунтувальних реакторів.....	15
1.2 Огляд існуючих конструкцій керованих шунтувальних реакторів трансформаторного типу.....	25
1.3 Принцип роботи керованого шунтувального реактора з підмагнічуванням.....	30
1.4 Основні технічні характеристики керованого шунтувального реактора, що досліджується.....	38
1.5 Переваги керованого шунтувального реактора перед іншими альтернативними пристроями.....	38
1.6 Технічне завдання на розробку та дослідження КПШР.....	39
1.6.1 Мета розробки та дослідження.....	39
1.6.2 Основні параметри пристрою компенсації реактивної потужності.....	40
1.6.3 Технічні вимоги.....	40
2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА.....	42
2.1 Розрахунок коефіцієнтів трансформації обмоток керованого підмагнічуванням шунтувального реактора.....	42
2.2 Розрахунок обмоток пристрою компенсації реактивної потужності...43	43
2.2.1 Розрахунок мережевої обмотки.....	47
2.2.2 Розрахунок обмотки керування.....	52
2.2.3 Розрахунок компенсаційної обмотки.....	54
2.3 Розрахунок магнітопроводу.....	58

3 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА.....	62
3.1 Розробка імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтувального реактора.....	66
3.1.1 Головні припущення.....	67
3.1.2 Конструкція фази КШР.....	68
3.2 Розробка моделі КШР в середовищі Simulink (Matlab).....	71
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	84

ВСТУП

Величезна кількість споживачів електроенергії постійно навантажує мережу реактивної складової споживаної потужності, причому це навантаження постійно зростає. Впровадження компенсуючих пристроїв реактивної потужності дозволяє підвищити надійність електроживлячих мереж і збільшити пропускну здатність енергосистеми.

Як зазначають автори в своїх дослідженнях та роботах «на теперішній час в електроенергетиці України та інших країн велике значення надається створенню керованих або гнучких ліній електропередавання, які є складовою частиною «інтелектуальних» (Smart Grid) мереж з пристроями FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems), тобто керовані (гнучкі) системи передавання змінного струму, оснащені пристроями сучасної силової електроніки. Для оптимального ведення режимів таких енергосистем необхідні високоефективні засоби регулювання потоків як активної, так і реактивної потужності» [1, 3, 4, 7, 9, 18, 28]. Причому розробниками пристроїв та досліджувальниками електромагнітних процесів в них відзначається, що для керування режимами по напрузі та реактивній потужності поряд з традиційним застосуванням генераторів, синхронних і статичних компенсаторів, комутованих реакторів і конденсаторних батарей, останнім часом все більш широко використовуються нові пристрої – це керовані шунтувальні реактори (КШР). Трансформаторне виконання для відкритої установки на будь-який клас напруги з можливістю плавного регулювання споживаної реактивної потужності дозволяє встановити КШР в будь-якій частині енергосистеми і забезпечити стабілізацію напруги, оптимізацію перетоків реактивної потужності, підвищення пропускну спроможності електропередавання, зниження втрат, числа комутацій вимикачів і дій РПН трансформаторів. Поєднання КШР з паралельно встановленою батареєю статичних конденсаторів (БСК) дозволяє забезпечити не лише плавно регульовану компенсацію

(споживання) реактивної потужності, але і її видачу відповідно до потужності БСК при розвантаженні КШР до режиму холостого ходу [18, 19, 32].

Наприклад, В.В. Кучанський в своїй роботі відзначає, що «застосування керованих шунтувальних реакторів у лініях електропередавання надвисокої напруги дає змогу підвищити пропускну здатність. Визначено значення індуктивностей керованих шунтувальних реакторів, за яких досягаються максимальні допустимі значення потужності». При аналізі зміни ступеню компенсації зарядної потужності при застосуванні керованих шунтувальних реакторів, він з'ясував, що за певного діапазону індуктивності значення допустимої потужності лінії електропередавання залишаються незмінними. Застосування концепції Smart Grid дало змогу модернізувати лінії електропередавання надвисокої напруги відповідно до вимог гнучких ліній електропередавання змінного струму. Наведені автором результати показують, що керовані шунтувальні реактори є перспективними та затребуваними для керування параметрами режимів об'єднань енергосистем [2, 3, 7].

Всі автори робіт, опублікованих в [9, 18, 28], при розробках нових та аналізі експлуатації існуючих конструкцій таких пристроїв вважають, що керовані шунтувальні реактори відносяться до класу пристроїв, зміна індуктивності в яких здійснюється за рахунок насичення магнітного ланцюга підмагнічуванням. У функціональному відношенні керовані підмагнічуванням реактори є потужними малоінерційними індуктивностями з широким діапазоном регулювання споживаного струму. Вони призначені для підвищення надійності експлуатації електричних мереж, оптимізації режимів роботи і зниження втрат електроенергії в лініях електропередавання [18, 19, 32].

В основу їх створення покладені дві оригінальні ідеї:

— збудження і керування потоками підмагнічування шляхом послідовного, періодично повторюваного замикання частини витків обмоток ректора напівпровідниковими ключами;

— сильне насичення магнітного ланцюга реактора в номінальному режимі, коли робоча точка магнітного потоку не менше половини періоду

частоти мережі знаходиться в області технічного насичення кривої намагнічування.

У пристроях FACTS почали використовувати нові силові електронні прилади (GTO, IGCT, IGBT), які дозволяють використовувати перетворювачі струму і напруги для забезпечення швидкодіючої компенсації реактивної потужності. На основі подальшого розвитку систем керування, вдосконалення напівпровідникових приладів і нових технологій перетворювачів напруги в даний час компенсація реактивної потужності є ключовим фактором для надійної передавання енергії змінного струму [2, 3...7].

Пристрої FACTS дозволяють трансформувати електричну мережу з пасивного пристрою транспортування електроенергії в активний пристрій, за допомогою якого здійснюється керування режимами роботи електроенергетичних мереж (ЕЕМ). Ця технологія надає можливим вирішити широке коло питань [3]:

- збільшення пропускної спроможності ліній високої напруги до заданого рівня, у тому числі до теплової межі нагрівання проводів (наприклад, пропускна здатність для ліній 220 кВ обмежується нагріванням і стійкістю, а для ліній 500 кВ – переважно стійкістю);

- забезпечення примусового розподілу активної потужності між паралельними лініями відповідно до вимог диспетчера електричних мереж (зادля цього здійснюється зміна кута напруги на кінцях лінії, через що досягається витіснення потужності в лінію більше високого класу напруги);

- зниження втрат активної потужності за рахунок оптимізації потоко-розподілу;

- підвищення економічності роботи ЕЕМ;

- підтримання необхідного значення напруги (підвищення або обмеження рівня напруги) у вузлах ЕЕМ;

- зниження струмів коротких замикань при проектуванні та реконструкції підстанцій та електричних мереж;

— у ряді випадків пристрої FACTS можуть слугувати альтернативним варіантом будівництва додаткових паралельних ліній для підвищення надійності та збільшення пропускної спроможності по перерізу в розподільчих та системоутворюючих мережах ЕЕМ;

— забезпечення сталої роботи енергосистеми за різних обурення;

— у разі існування надлишкових енергосистем з нижчими тарифами, можлива передавання електроенергії в дефіцитні системи за умови витіснення з них найменш економічних джерел енергії;

— підвищення генерації активної потужності на електростанціях, за рахунок підвищення максимально допустимих перетікань потужності, що дозволить відкладання терміну введення генеруючих потужностей та будівництва нових ЛЕП з метою збільшення пропускної спроможності ліній, також можлива відмова від таких заходів. При цьому генеруюча компанія може отримати додатковий виторг на електростанціях від продажу електроенергії, а мережева компанія — заощадження витрат на будівництво та експлуатацію нових ЛЕП, а також додатковий виторг за транспортні послуги з передавання електроенергії в дефіцитні райони.

Генерація електричної енергії та її споживачі зазвичай не знаходяться близько один від одного. Великі міста і великі промислові регіони часто отримують електроенергію від джерел, що знаходяться на великій відстані. Складові системи і навантаження включають в себе джерела реактивної потужності (конденсатори і котушки індуктивності), які впливають на профіль напруги мережі і стабільність системи. Лінії передавання високовольтних систем (735 кВ) можуть мати до 200 МВАр ємнісної потужності на довжину 100 км. Кабельні з'єднання можуть давати навіть більшу реактивну потужність. Великі навантаження, що містять електричні дугові печі або потужні приводи, можуть мати до 100 МВАр індуктивної реактивної потужності. Без відповідної компенсації реактивної потужності в довгих лініях передавання можуть наступити критичні умови роботи системи через сильні коливань напруги і проблем зі

стабільністю. Ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою схем паралельної і послідовної компенсації.

Реактивний струм, що циркулює між генератором енергопостачальної компанії і споживачем, перетворюється на теплову енергію в системі розподілу електроенергії, тобто створюється додаткове навантаження на генератори, трансформатори, кабелі та розподільчий пристрій.

Це призводить до втрат електроенергії і падіння напруги. Якщо частка реактивного струму висока, наявні перетини провідників не можуть повністю використовуватися для передавання корисної енергії, можливо, їх потрібно відповідно збільшити.

З точки зору енергопостачальної компанії низький коефіцієнт потужності призводить до збільшення витрат на інвестиції і обслуговування, і ці додаткові витрати перекладаються на тих, хто за них відповідальний, тобто на споживачів з низьким коефіцієнтом потужності. Тому на додаток до лічильника активної енергії встановлюється лічильник реактивної енергії [2, 3, 18, 19].

Серед цілого ряду переваг від застосування пристроїв компенсації реактивної потужності можна виділити п'ять головних:

- економія енергоспоживання, тобто за умови впровадження компенсуючих пристроїв реактивної потужності дає суттєвий економічний ефект. Зниження рівня енергоспоживання може скласти до 40-50% від загального обсягу. При таких обсягах термін окупності систем компенсації потужності складе не більше одного року;

- збільшення терміну служби обладнання, тобто засоби компенсації збільшують термін служби силових трансформаторів, оскільки їх використання знижує навантаження на устаткування. Використання установок компенсації також знижує навантаження на лінії передавання і нагрів проводів, що дозволяє використовувати струмопровідні жили меншого перетину;

- економія витрат на пристрій електромереж, тобто на етапі проектування і будівництва нових будівель монтаж системи компенсації реактивної

потужності дозволяє істотно заощадити на облаштуванні розподільчої електромережі;

— покращення якості енергопостачання, тобто застосування засобів компенсації реактивної потужності дає можливість подавити мережеві перешкоди, уникнути глибокої просадки напруги і мінімізувати несиметрію фаз. Крім того, системи компенсації в складі пасивних фільтрів дозволяють знизити рівень вищих гармонік; тобто пристрій компенсації реактивної потужності дозволяє уникнути штрафних санкцій від постачальника електроенергії за погіршення показників коефіцієнта потужності.

Отже, аналіз тенденцій розвитку сучасних магістральних електричних систем у сучасному світі вказує на зростаючу роль концепції Smart Grid як необхідної складової задля забезпечення ефективності експлуатації об'єднаних енергосистем. Керовані шунтувальні реактори є технічним засобом підвищення ефективності роботи об'єднаної електроенергетичної системи України шляхом збільшення пропускної здатності ЛЕП НВН. Більш повне використання пропускної здатності існуючих електричних мереж, зокрема окремих міжсистемних і міждержавних зв'язків, може забезпечити:

— передавання додаткової електроенергії з надлишкових енергосистем у більш низькі;

— тарифами в дефіцитні з витісненням там менш економічних джерел енергії;

— збільшення видачі активної потужності електростанцій за рахунок підвищення максимально-допустимих перетоків потужності.

Також застосування гнучких (керованих) ліній електропередавання (ГЛЕП) дасть змогу розглянути питання про перенесення термінів введення генеруючих потужностей і будівництва нових високовольтних ліній електропередавання з метою збільшення пропускної здатності електричних мереж, а в окремих випадках, можливо, і відмову від цих заходів [3].

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КЕРОВАНИХ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

За принципом дії трифазні плавно регульовані реактори для компенсації реактивної потужності можна розділити на три класи - керовані підмагнічуванням магнітопроводу, трансформаторного типу і реактори з перемиканням відгалужень (аналогічно РПН трансформаторів) [2, 3, 7, 8, 19, 30, 32, 39]

1.1 Огляд існуючих конструкцій керованих шунтувальних реакторів

З початку промислового виробництва і до теперішнього часу керовані підмагнічуванням шунтувальні реактори (КПШР) користуються стійким попитом на ринку збуту, що постійно розширюється [10]. В електричних мережах України та інших країн експлуатується понад сотню КПШР потужністю від 10 до 180 МВАр напругою від 10 кВ до 500 кВ. Встановлена потужність КПШР всіх типів становить близько 9 ГВАр (таблиця 1.1), зокрема джерел Сьогодні КПШР виготовляють заводи «Запоріжтрансформатор» (Україна), показаний на рисунку 1.1, ETD TRANSFORMATORY (Чехія), показаний на рисунку 1.2, АВВ (шведсько-швейцарська транснаціональна корпорація), показаний на рисунку 1.4, Trench (Австрія), показаний на рисунку 1.3 та інші.

Як за конструкцією, так і за електричною схемою КПШР мають суттєві відмінності. КПШР виробництва Запорізького трансформаторного заводу мають три конструктивні модифікації КШР напругою 35...500 кВ [2, 3, 4]. Завод ETD TRANSFORMATORY виробляє КПШР напругою 6...35 кВ із суміщеною обмоткою змінно-постійного струму [29]. У конструкції та схемі КПШР 180 МВАр 500 кВ виробництва «ЕЛЕКТРОЗАВОД» використано технічні рішення, що відрізняються від конструкцій реакторів «Запоріжтрансформатор» та ETD TRANSFORMATORY [29, 30].

Таблиця 1.1 – Потужність КППР всіх типів [29, 30]

Тип КППР	Напруга	Потужність	КППР у складі ДРМ потужністю МВАр
	кВ	МВАр	МВАр
10 000/10	10	60	60
10 000/35	35	40	40
25 000/35	35	275	125
25 000/110	110	775	250
63 000/110	110	63	–
25 000/220	220	50	25
60 000/220	220	60	60
63 000/220	220	441	–
100 000/220	220	2 000	100
180 000/330	330	720	180
100 000/400	400	700	700
180 000/500	500	3 240	–

Крім КППР останніми роками активно освоюється виробництво та застосування шунтувальних реакторів, керованих тиристорами. Досвід експлуатації КППР обох типів показав, що в певних випадках їх нелінійні параметри можуть негативно позначатися на якості напруги в точці їх підключення та прилеглої мережі.



Рисунок 1.1 – Керований підмагнічуванням реактор на базі РТУ-100000/220 виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор» [29, 30]



Рисунок 1.2 – Керований підмагнічуванням реактор на базі РТУ-100000/10 виробництва ETD TRANSFORMATORY [29, 30]

В своїх роботах автори зазначають, що «...за попередній період в країнах СНД введено в експлуатацію понад шістдесяті керованих реакторів

напругою від 6 кВ до 500 кВ. На підставі проведеного огляду існуючих конструкцій реакторів, їх переваг і недоліків, відповідно до завдання на магістерську роботу, а також аналізу тенденцій, що намітилися в електроапаратобудуванні, можна зробити ряд висновків, що стосуються вибору напрямку дослідження конструкції реактора. Так, на даний час для обмеження струмів при несиметричних КЗ в розподільних пристроях АЕС використовують однофазні оливні реактори з природною циркуляцією масла та повітря. У таких реакторах застосування оливи дозволяє поліпшити охолодження обмотки за рахунок конвекції оливи, а також зменшити ізоляційну відстань між обмоткою і заземленими частинами, що забезпечуватиме зменшення габаритних розмірів реактора» [29, 30].

Існує відмінність за ознакою виконання обмоток реакторів, але найбільше застосування знаходять кабельні та дискові обмотки. Кабельні обмотки здійснюються з гнучкого багатожильного голого або ізольованого проводу, заввишки безперервним намотуванням, навиваються горизонтальними рядами, ряд за рядом, при цьому з проміжками між проводами як по вертикалі, так і по горизонталі (з метою кращого охолодження). Для більш високих напруг (від 20 кВ до 35 кВ), щоб уникнути розряду між крайніми витками, схил обмотки розсовують на великі відстані, тобто виконують похилими рядами. Обмотка з декількох паралельних гілок здійснюється відповідним числом кінців кабелю. Дискові обмотки здійснюються з одного або декількох дисків, розташованих на одній осі і мають вигляд плоских спіралей, виконаних з плоскою міді [29, 30, 32, 69, 75, 90]. Основні типи керованих шунтувальних реакторів (КШР), їх потужність, основні технічні параметри, країна-виробник і інші дані вказані в таблиці 1.2 [29, 30, 33, 73].

Таблиця 1.1 — Характеристики керованих шунтувальних реакторів

Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Країна виробник
Регулювання перемикачів відгалужень	Одна обмотка з РПН	180 МВА, 330 кВ	Західна Європа
Трансформаторного типу (КШРТ) потужність тиристорних ключів для керування дорівнює номінальній потужності пристрою	Трансформатор з напругою КЗ 100% і тиристорні ключі на номінальну потужність КШР	50 МВА, 420 кВ	Індія
		60 МВА, 230кВ	ПАТ Запоріжтрансформатор, Україна Ансольті -ВЕІ
		35 МВАр 145 кВ	Фірма TRENCH, Австрія
		110 МВАр До 800 кВ	ABB, шведсько-швейцарська транснаціональна корпорація
Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Країна виробники
	З двома обмотками, поєднаний. СО і КО	25 МВАр 115 кВ	Фірма TRENCH, Австрія

Закінчення таблиці 1.1

Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Країна виробники
Тип КШР	З декількома обмотками	До 330 МВАр, до 800 кВ	АВВ, шведсько-швейцарська транснаціональна корпорація
	З двома обмотками, поєднаний. ОУ і КО	10-25 МВА, 35-110кВ	ПАТ Запоріжтрансформатор,
	З трьома окремими обмотками	63-180 МВА, 110-500 кВ	ВАТ ЕЛУР, ТОВ Енергія-Т

Керований шунтувальний реактор трансформаторного типу (КШРТ) – це силовий трансформатор з напругою короткого замикання 100%, на вторинній обмотці якого встановлені зустрічно-паралельні тиристорні ключі на повну потужність реактора. Також відома схема статичного тиристорного компенсатора (СТК), в якій повністю відкриті тиристори закорочують вторинну обмотку і цим забезпечують максимальну споживану потужність КШРТ; при закритих тиристорах його потужність відповідає холостому ходу трансформатора, а в проміжних режимах споживана потужність плавно регулюється зміною кута керування вентилів з відповідною появою вищих гармонік в споживаному струмі. Для зниження рівня цих гармонік на стороні нижчої напруги встановлюються фільтри [29, 30, 33, 73]



Рисунок 1.3 – Керований підмагнічуванням реактор виробництва TRENCH [73]



Рисунок 1.4 – Керований підмагнічуванням реактор виробництва АВВ [33]

Отже, схема КШРТ – це зводиться до схеми СТК, в електромагнітній частині якого поєднані індуктивності фаз з трансформатором зв'язку з вищою напругою. Це дозволяє, на відміну від СТК, підключати КШРТ до будь-якого класу напруги, однак тиристорні ключі великої потужності зумовлюють підвищену вартість виготовлення, монтажу та експлуатації. Досвід застосування КШРТ в Україні поки що обмежений реакторами напругою 110 кВ.

Керовані підмагнічуванням реактори типу РТУ напругами від 35 кВ до 500 кВ випускає ВАТ «Запоріжтрансформатор», показаний на рисунку 1.5. Основною відмінністю цих КШР є поєднання в первинній мережевій обмотці функцій споживання реактивної потужності та підмагнічування магнітопроводу. При цьому тиристорний перетворювач випрямленої напруги підключається до нейтралей «зіркою» розщепленої мережевої обмотки реактора, між секціями якої циркулюють постійні складові струму підмагнічування. Наявність в розщеплених гілках мережевої обмотки реактора основного споживаного струму промислової частоти, випрямленого струму підмагнічування і вищих гармонік обумовлює додаткові вимоги до конструкції, джерела підмагнічування, схеми з'єднань трансформаторів струму, алгоритмів релейного захисту та автоматики. До того ж номенклатура КШР, які випускаються заводом «Запоріжтрансформатор», має ряд схемно-технічних виконань залежно від класу напруги, потужності реактора і вимог замовника за складом обладнання, виду охолодження, алгоритмам керування, числу вбудованих трансформаторів струму, функцій моніторингу тощо. При однаковому принципі дії основні відмінності між модифікаціями КШР серії РТУ для різних класів напруги (35 кВ ... 110 кВ, 220 кВ... 330 кВ, 500 кВ...750 кВ) полягають в схемі електромагнітної частини і в складі системи підмагнічування [30, 32, 69, 73].

Для КШР напругою 35 кВ або 110 кВ з порівняно невеликою потужністю (10 МВА...25 МВА) кращим техніко-економічним є виконання електромагнітної частини з двома обмотками – мережевою обмоткою (МО) і обмоткою керування (ОК) за схемою подвійного розімкненого трикутника, що

поєднує в собі функції підмагнічування та компенсації в струмі реактора вищих гармонік, кратних трьом.



Рисунок 1.5 – Керований підмагнічуванням реактор виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор» [29]

Силова частина системи підмагнічування виконується з двох однофазних перетворювачів невеликої потужності, розміщених на загальній рамі з живлячими трансформаторами, підключеними до відводів ОК реактора через високовольтні запобіжники. Як правило, такі КШР працюють паралельно з БСК та можуть на вимогу замовника мати загальну систему автоматичного керування (САУ) реактором і секційною конденсаторною батареєю [29, 30].

Реактори 220 кВ та 330 кВ потужністю 63...180 МВА (як і КШР 110 кВ з потужністю понад 50 МВА) виконуються з трьома обмотками – мережева (МО), компенсаційна (КО) і обмотка керування (ОК), кожна з яких виконує свою функцію відповідно споживання реактивної потужності, компенсації (замикання в «трикутнику») основних вищих гармонік і керування (підмагнічування стрижнів магнітопроводу). У комплект входять два однакових трифазних трансформатора з тиристорним перетворювачем (ТМП), з яких основний

підключається через вимикач 10 кВ до виводів компенсаційної обмотки реактора, а резервний – до розподільних пристроїв підстанції напругою 6 кВ або 10 кВ [29, 30].

КШР напругою 500 кВ і вище, що встановлюються на шини або лінії транзитних електричних мереж супер високої напруги (СВН), мають підвищені вимоги по швидкодії – час повного набору або скидання потужності за час має бути не більше 0,3 с, тобто не більше, ніж за 15 періодів змінного струму (при частоті 50 Гц). Тому, при однаковій схемі і тому ж саме складі обмоток електромагнітної частини, до складу системи підмагнічування входить додатковий третій ТМП, що має збільшену максимальну випрямлену напруга. Цей ТМП підключається до зовнішнього живлення 6 кВ або 10 кВ, забезпечуючи форсовані режими набору або скидання потужності, а також попереднє підмагнічування реактора при включенні. Крім того, виконання електромагнітної частини цих реакторів може бути як трифазним, так і однофазним для зменшення транспортних габаритів і маси [2, 3, 48, 62, 64, 66].

В джерелах [18, 19] зауважується, що застарілі модифікації КШР всіх зазначених вище класів напруги тепер заводом не випускаються. Перші реактори напругою 110 кВ мали електромагнітну частину з трьох однофазних магнітопроводів в загальному баку і підмагнічування без резервування від відокремленого трифазного ТМП із зовнішнім живленням. В сучасних КШР типу РТУ-25000/110 (35) забезпечено самопідмагнічування з резервуванням, а магнітна система виконується трифазною, що призвело до зниження габаритів і маси.

Реактори 220 кВ та 330 кВ також підмагнічувались від єдиного ТМП із зовнішнім живленням, а крім того оснащувались вбудованими струмообмежувальними дроселями (при напрузі к.з. між МО та КО близько 20%) і заземлюючими фільтрами типу ФМЗО на виводах компенсаційної обмотки. Тепер дроселі (при напрузі КЗ більше за 50%) і фільтри відсутні, а основне підмагнічування забезпечується безпосередньо від реактора з повним резервуванням ТМП [2, 3, 23, 28, 39]. Тепер всі реактори цього класу напруги, як трифазного,

так і однофазного виконання, мають описану вище триобмоткову електромагнітну частину і систему підмагнічування з трьох трифазних ТМП однакової потужності (1 МВА) і габаритів.

1.2 Огляд існуючих конструкцій керованих шунтувальних реакторів трансформаторного типу

Керований шунтувальний реактор трансформаторного типу (КШРТ) є одним з видів керованих реакторів і призначений для встановлення на підстанціях ліній електропередавання надвисокої напруги 110...500 кВ для реалізації наступних функцій:

- плавного швидкодіючого регулювання реактивної потужності з метою розвантаження обладнання мереж і підстанцій від реактивної потужності та зниження втрат у них;

- стабілізації напруги на шинах підстанції;
- демпфування коливань активної потужності по лінії;
- підвищення статичної та динамічної стійкості енергосистеми.

Як стверджують автори публікацій [23, 28, 39], керований реактор типу КШРТ може забезпечувати зниження коливань напруги, а також балансування (симетрування) напруги по фазах, викликаних наявністю потужного несиметричного навантаження (наприклад, при живленні тягових підстанцій РЖД) – у цьому випадку використовується пофазне керування реактивною потужністю КШРТ. Керований шунтувальний реактор трансформаторного типу (КШРТ) є різновидом СТК і поєднує в собі понижувальний трансформатор і компенсуючий реактор. КШРТ має такі переваги перед традиційними мережевими СТК:

- можливість виконання будь-який необхідний клас напруги;
- зниження габаритів, вартості та втрат у СТК, загалом за рахунок відсутності компенсуючого реактора;
- високу надійність схеми, оскільки режим КЗ для КШРТ є номінальним.

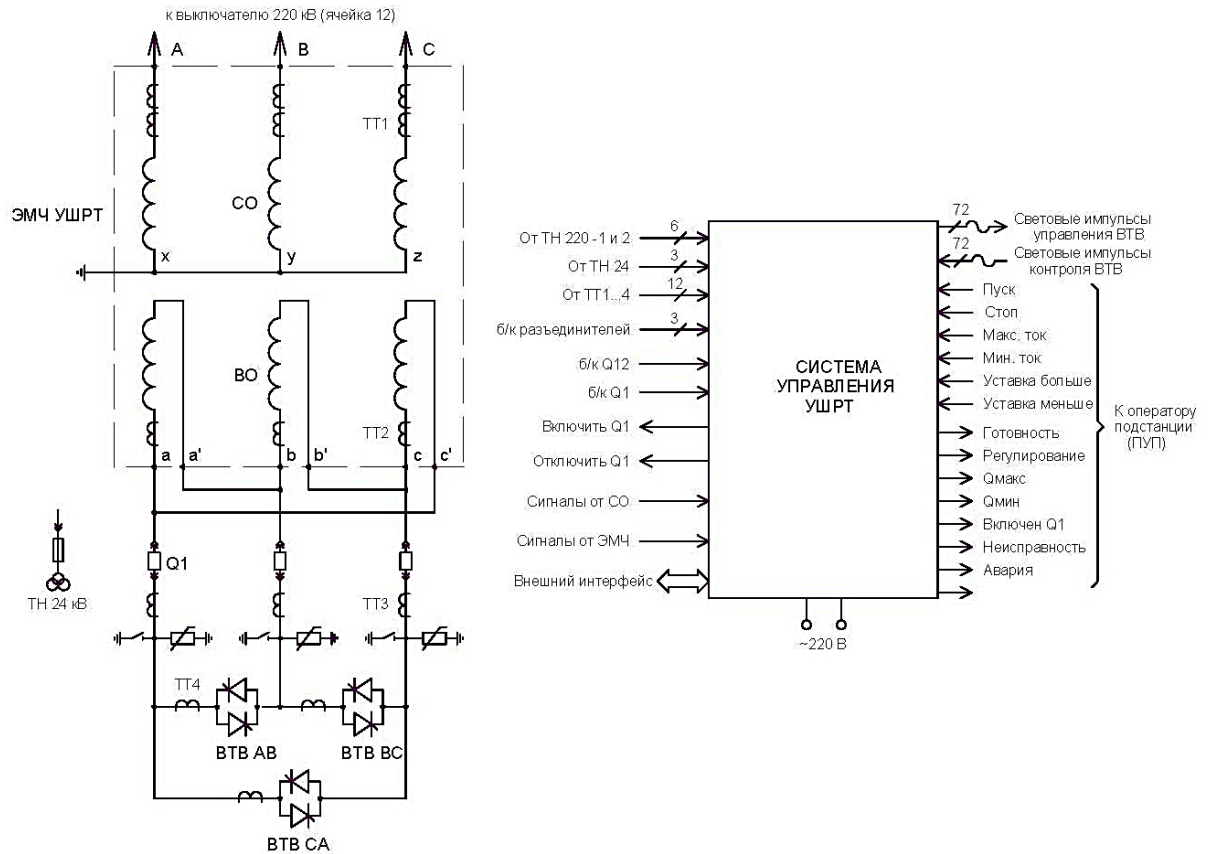


Рисунок 1.6 – Однолінійна схема КШРТ ЕМЧ [23, 28, 39]

До складу КШРТ входять:

- електромагнітна частина КШРТ (ЕМЧ);
- тиристорний регулятор у складі:
- трифазний високовольтний тиристорний вентиль (ВТВ), підключений до вентильної обмотки (ВО) ЕМЧ, з'єднаної в трикутник, через вимикач Q1;
- цифрова система автоматичного управління та захисту КШРТ (САУ), що забезпечує управління ВТВ і комутацію вимикача Q1 відповідно до заданих алгоритмів у складі: шафа керування (ШК) і шафа релейних захистів (ШРЗ).
- система рідинного охолодження тиристорних вентилів (СО), що складається з шафи системи охолодження (ШСО) та апарату повітряного охолодження (АВО).

КШРТ підключається до обраної секції шин ВН підстанції. Управління КШРТ проводиться ШУ в автоматичному режимі за командами оператора ПС від пульта дистанційного управління (ПДУ) або АРМ оператора і не вимагає присутності оперативного персоналу. Передбачено режим ручного керування КШРТ із лицьової панелі ШК ЕМЧ [23, 28, 29, 30, 39].

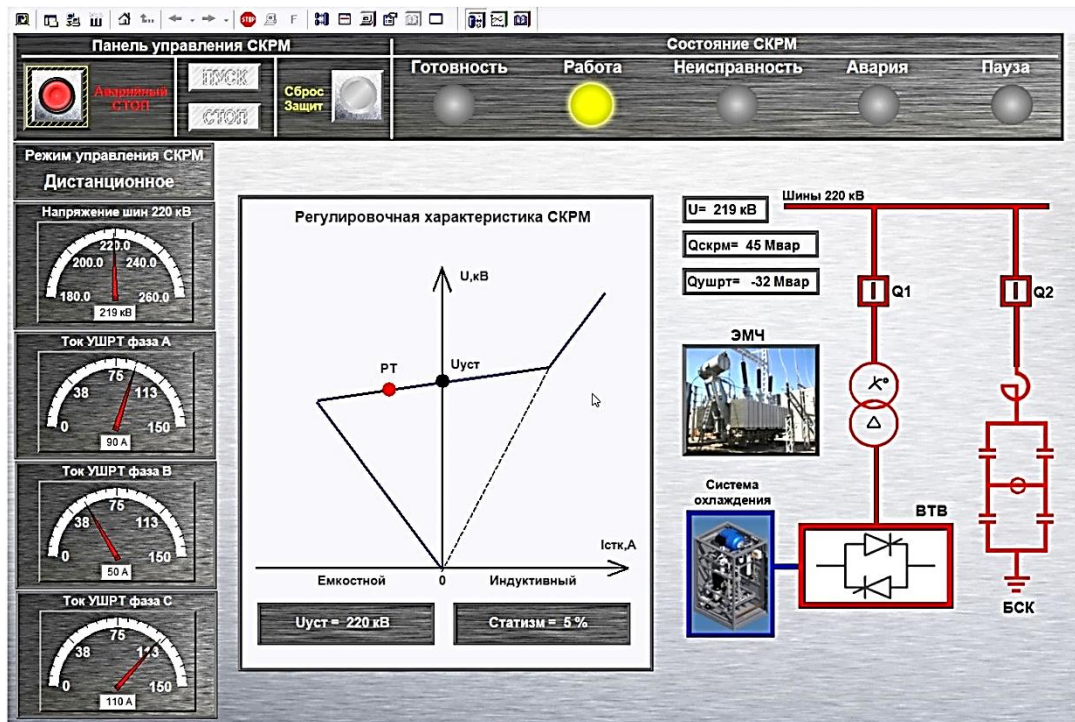


Рисунок 1.7 – Головний монітор SCADA КШРТ

КШРТ підключається до обраної секції шин ВН підстанції. Керування КШРТ проводиться ШК в автоматичному режимі за командами оператора ПС від пульта дистанційного керування (ПДК) або АРМ оператора і не вимагає присутності оперативного персоналу. Передбачено режим ручного керування КШРТ із лицьової панелі ШК.

Електромагнітна частина (ЕМЧ) УШРТ є трифазним двообмотковим реактором з обмоткою високої напруги (мережевою – МО), з'єднаною в зірку з глухозаземленою нейтраллю і підключається до шин ВН підстанції, і обмоткою низької напруги (вентильною – ВО) з номінальною напругою, значення якої залежить від потужності КШРТ і лежить в межах від 10 кВ до 35 кВ.

Схема з'єднання обмоток УН/Д-11 передбачає, що для забезпечення можливості з'єднання "трикутник" фаз обмотки ВО кожна фаза обмотки забезпечена двома вводами, розміщеними на кришці бака реактора.

Відмінною особливістю ЕМЧ КШРТ є 100-відсотковий магнітний зв'язок між обмотками МО та ВО, що дозволяє регулювати струм первинної обмотки шляхом зміни кута запалювання тиристорного вентиля, підключеного паралельно до обмоток ВО [29, 30].

Спеціальна конструкція ЕМЧ забезпечує:

- низькі втрати за рахунок повної локалізації магнітного поля всередині магнітної структури;
- компенсацію струмів вищих гармонік, що виникають при регулюванні струму в обмотці ВО, всередині магнітної структури;
- можливість незалежного пофазного регулювання струму в кожній з обмоток ВО і, відповідно, МО.



Рисунок 1.8 – Керований підмагнічуванням реактор трансформаторного типу виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор» [29]

Таблиця 1.2 – Основні параметри КШРТ [29]

Найменування параметра	Значення
Номінальна напруга, кВ	110, 220, 330, 500
Випробувальна напруга	по ГОСТ 1516.3-96
Номінальна реактивна потужність (споживана) при номінальній напрузі, МВАр	25...160
Швидкодія КШРТ: – час змінення потужності КШРТ в межах плавного діапазону регулювання, не більше, с – відпрацювання стрибка напруги уставки, не більше, с до рівня 0,9 до усталеного значення с точністю 0,05	0,03 0,03 0,12
Діапазон зміни уставки по напрузі	$\pm 10\% U_{\text{ном}}$
Діапазон зміни статизма характеристики	1...10%
Пофазне регулювання реактивної потужності	можливо
Сумарні втрати в номінальному режимі, % від номінальної потужності, не більше	0,55...0,8
В нормальних режимах роботи КШРТ склад висших гармонік в його струмі в % від значення струму КШРТ в режимах повного споживання, не більше	3,0

ЕМЧ призначена для зовнішньої установки, має примусову циркуляцію повітря і природну циркуляцію олії (Д). У склад ЕМЧ входить система

контролю стану реактора, що забезпечує автоматичний контроль параметрів, на основі інформації від встановлених в ньому аналогових датчиків.

Габаритні розміри ЕМЧ на напругу 220 кВ і потужність 100 МВА в зборі, не більше 9100 x 6500 x 8200 мм, транспортна маса – 102700 кг, маса олії – 38200, повна маса – 113300 кг (для системи охолодження Д).

Устаткування регулятора КШРТ – стандартне обладнання, яке розміщується в контейнері розміром 12,2 x 2,4 x 2,9 м. У відсіках контейнера змонтовані осередок КРУ, трифазний тиристорний вентиль з системою рідинного охолодження і система керування КШРТ. Агрегат повітряного охолодження та вводу напруги від ВО розміщені на даху контейнера виробництва компанії «Norte de Angola».

1.3 Принцип роботи керованого шунтувального реактора з підмагнічуванням

Основним призначенням керованих шунтувальних реакторів є регулювання напруги та реактивної потужності [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]. У КШР з підмагнічуванням для плавного регулювання споживаної реактивної потужності, а значить і напруги в точці підключення, використовується насичення сталі магнітопроводу постійним потоком, створюваним випрямленим струмом в спеціальній обмотці керування. Фактично для потужного високовольтного трансформаторного пристрою використовується принцип магнітного підсилювача, коли в міру насичення стрижнів магнітопроводу знижується індуктивність розташованої на них мережевої обмотки, і також пропорційно знижується її індуктивний опір. У міру зниження або зворотного підвищення індуктивного опору мережевої обмотки реактора пропорційно зростає або зменшується її струм, а значить і споживана потужність КШР в діапазоні від холостого ходу (близько 1%) до номінальної потужності або допустимого перевантаження (100 % ...120 %). Таким чином, використання ділянок сталі магнітопроводу КШР у режимах від ненасиченого стану до глибокого насичення,

близького до граничного, коли магнітна проникність наближається до магнітної проникності повітря, дозволяє отримати діапазон плавного регулювання реактивної потужності з кратністю понад 100 [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33].

З великого числа пропонованих раніше схемотехнічних рішень і конструкцій підмагнічувальних реакторів - з поздовжнім, поперечним, кільцевим підмагнічуванням, з обертовим магнітним полем і т.і., — практичне застосування отримали КШР трансформаторного типу з поздовжнім підмагнічуванням стрижнів, на яких розташовані обмотки реактора. Для того, щоб забезпечити незалежність електромагнітних процесів в обмотках МО і ОК, розташованих на одному магнітопроводі, необхідно дві умови — зустрічне включення секцій цих обмоток (тоді на виводах обмотки керування не буде змінної напруги) і створення окремих шляхів для змінного і постійного потоків, що забезпечується бронестрижневою конструкцією магнітопроводу з розщепленими стрижнями фаз.

На рисунку 1.4 наведена схема однієї фази такого реактора з бронестрижневим магнітопроводом і двома полустрижнями, на яких розташовані секції мережевої обмотки і обмотки керування, до якої в свою чергу підключене джерело постійної або випрямленої напруги для підмагнічування. Постійний потік підмагнічування, створюваний струмом ОК, замикається між центральними полустрижнями, а змінний потік — через верхні і бічні ярма магнітопроводу, складаючись в полустрижнях з постійним.

На рисунку 1.5 розрахункова осцилограма для досліджуваного реактора 110 кВ потужністю 63 МВА показаний струм мережевої обмотки в залежності від струму обмотки керування при наборі потужності від мінімальної (холостий хід) до номінальної, якій відповідають значення струмів 200 А в МО і 1,9 кА в ОК. Залежність між струмами практично лінійна. Струм мережевої обмотки (в горі) реактора в залежності від струму підмагнічування (внизу) при наборі потужності до номінального значення [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33].

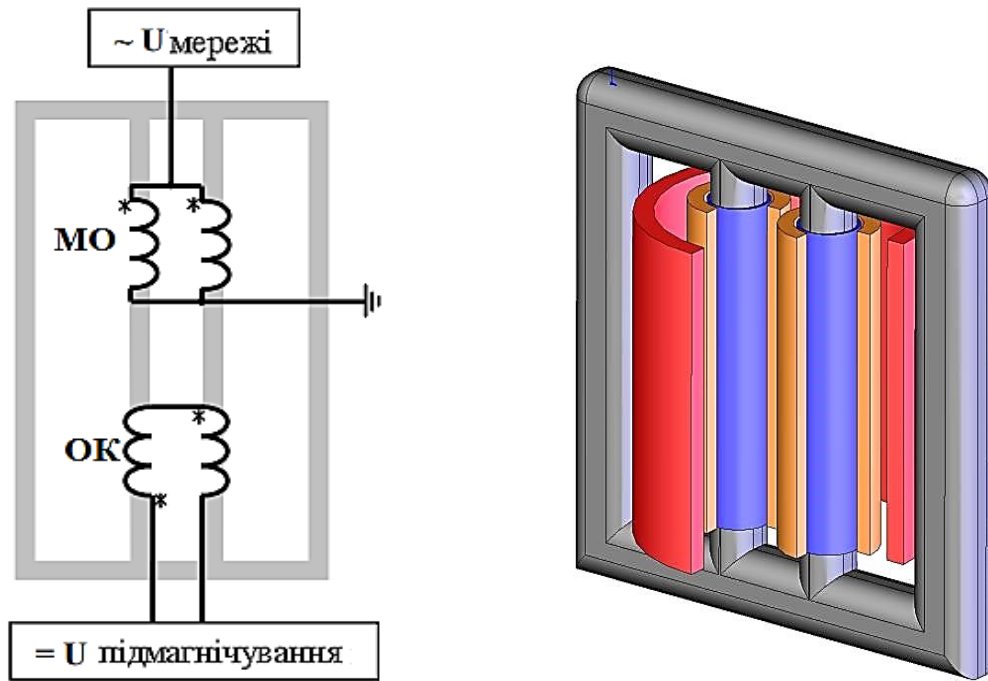
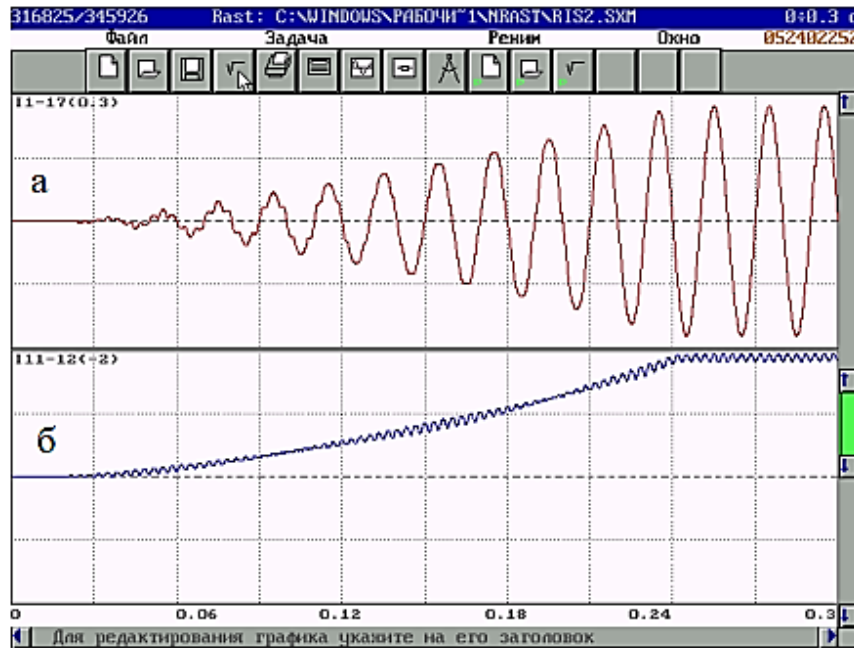


Рисунок 1.4 — Електромагнітна схема однієї фази КШР [16]

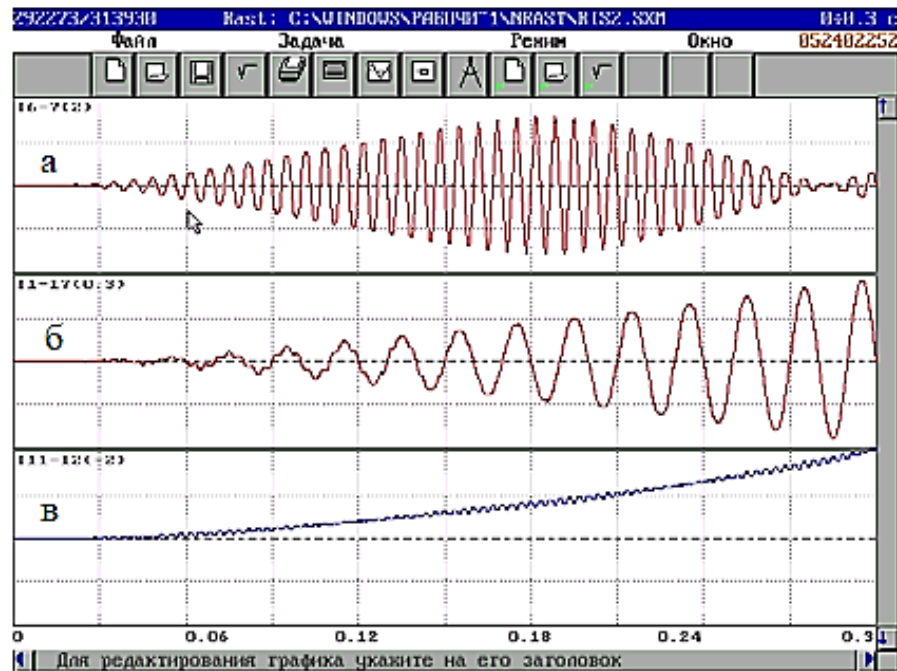
В області мінімальних навантажень в струмі МО (СО) реактора спостерігаються спотворення 5 і 7 гармоніками, при цьому сумарний струм спотворення в самому несприятливому з навантажувальних режимів не перевищує 3,5% від номінального струму КШР, що не робить істотного впливу на синусоїдальність напруги в точці його підключення (не більше 0,1..0,2%). Варто зазначити, що така форма струму МО (СО) КШР забезпечується тільки за умови повної компенсації в споживаному струмі найбільш потужною третьою гармоніки і кратних їй. Для трифазних реакторів це забезпечується наявністю вторинної обмотки, з'єднаної в трикутник, в якій і замикаються, не виходячи в мережу, гармоніки, кратні трьом. Практично це реалізується в конструкціях КШР, що виробляються на теперішній час, за рахунок окремої додаткової компенсаційної обмотки (КЗ) для триобмоткових реакторів, або спеціальними схемами з'єднань вторинної обмотки керування, наприклад, в подвійний розімкнутий трикутник для двообмоткових реакторів напругою від 35 кВ до 110 кВ.



- а — струм мережевої обмотки;
 б — струм обмотки керування (підмагнічування)

Рисунок 1.5 — Осцилограма режиму набору потужності до номінального значення КШР 110 кВ [16]

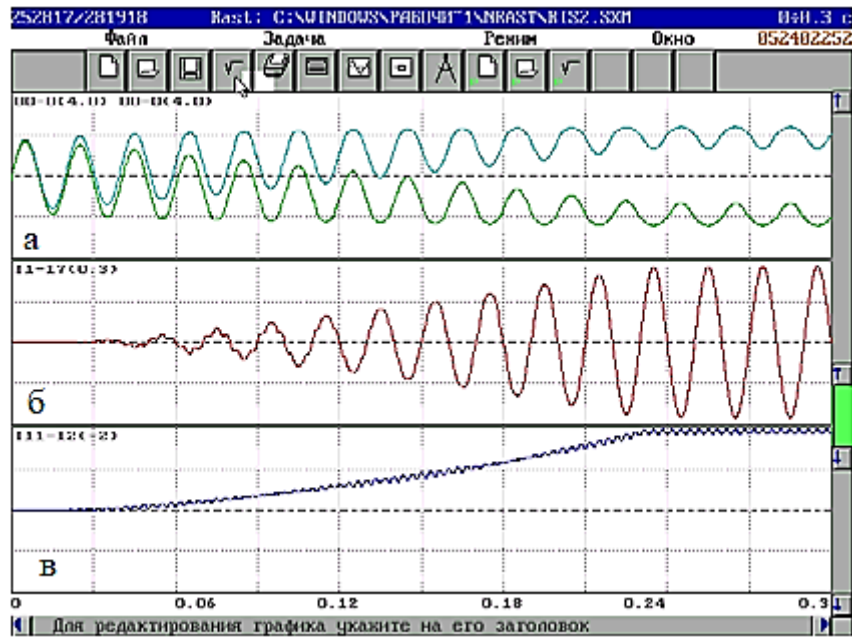
На рисунку 1.6 наведено аналогічний рисунку 1.5 режим набору потужності до номінального значення КШР 110 кВ зі струмом в трикутнику КО на верхній осцилограмі. На відміну від силових трансформаторів, струм навантаження першої гармоніки у вторинній обмотці реактора відсутня. Переважна в трикутнику КО третя гармоніка має максимум (близько 1 кА діючого значення) в області 50 % навантаження КШР, а в режимі номінального навантаження при синусоїдальній напрузі практично дорівнює нулю, як і інші вищі гармоніки в струмі МО. Це пояснюється тим, що реактори серії РТУ проектується з номінальною потужністю в так званому напівмережевому режимі насичення, коли постійний потік номінального підмагнічування по черзі в кожному напівстрижні магнітопроводу витісняє змінний потік рівно на час половини періоду частоти мережі (рисунок 1.7).



а — струм компенсаційної обмотки; б — струм мережевої обмотки;
в — струм обмотки керування.

Рисунок 1.6 — Осцилограми режиму набору потужності КШР 110 кВ [16]

В результаті комбінації послідовності в часі напівполуперіодів синусоїдального струму, викликаних почерговим насиченням напівстрижней, споживаний струм КШР в номінальному режимі також не містить вищих гармонік. При подальшому наборі потужності в області перевантаження (граничного насиченню магнітопроводу) в струмі КО знову з'являється третя, а в МО — інші вищі гармоніки. Осцилограми з сумарними індукціями в напівстрижнях магнітопроводу наведені на рисунку 1.7, з якого видно, що в номінальному напівмережевому режимі навантаження час знаходження індукції кожного напівстрижня за перегином характеристики насичення сталі (близько 2 Тл) становить рівно половину періоду промислової частоти мережі.



- а — індукція в полустрижнях магнітопроводу;
 б — струм мережевої обмотки; в — струм обмотки керування.

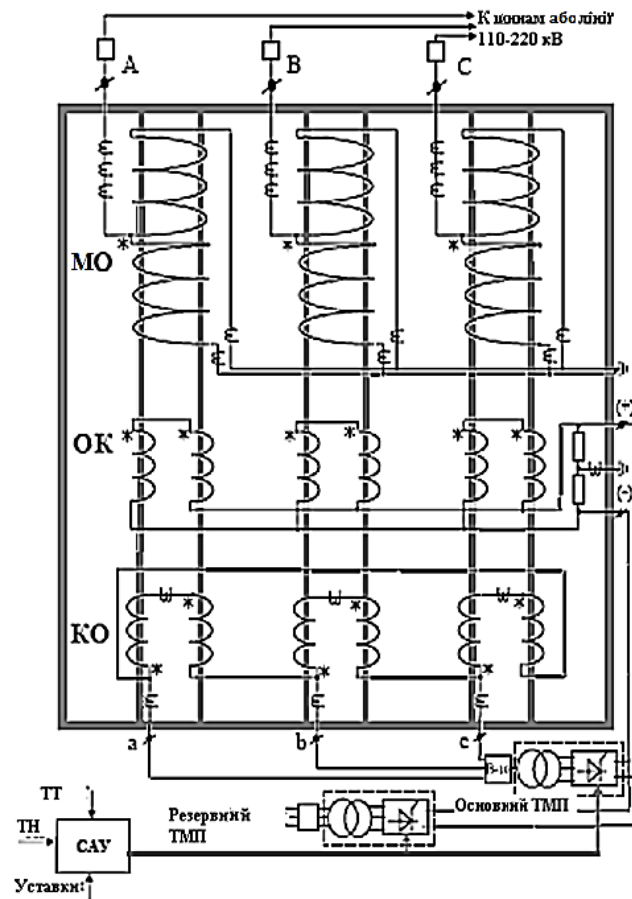
Рисунок 1.7 — Осцилограми при наборі потужності КШР 110 кВ [16]

На рисунку 1.8 наведено магнітну систему трифазного КШР з підмагнічуванням, а на рисунку 1.9 — електромагнітна схема трифазних триобмоткових КШР серії РТУ напругою 110 кВ і вище. Стрижні всіх фаз магнітопроводу розділені на два напівстрижні, на кожному з яких розміщуються секції компенсаційної обмотки, з'єднаної в трикутник. Зверху секцій КО розташовуються секції обмотки керування, включені в кожній фазі послідовно-зустрічно до обмоток МО і ОК (спочатку секцій обмоток відзначені зірочкою). Виводи усіх фаз КО з'єднуються паралельно і підключаються до виводів перетворювачів ТМП. Кожна фаза мережевої обмотки виконується паралельними гілками з введенням в середину і намотується поверх вторинних обмоток з охопленням обох напівстрижней. МО з'єднується в схему «зірка з заземленою нейтраллю», підключається до шин підстанції або до лінії і забезпечує споживання реактивної потужності відповідно до заданого законом регулювання [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33].



Рисунок 1.8 — Магнітна система трифазного КШР з підмагнічуванням [16]

Компенсаційна обмотка з номінальною напругою 10 кВ, з'єднана в трикутник, виконує дві основні функції — виключення зі споживаного мережевого струму гармонік, кратних трьом, і живлення основного трансформатора з перетворювачем, який забезпечує необхідний рівень підмагнічування магнітопроводу через ОК. Оскільки встановлена потужність ТМП становить 1 МВА (номінальний первинний струм менше 60 А), а споживана в сталому номінальному режимі не перевищує 300 кВА, компенсаційна обмотка розраховується на тривалий перебіг максимального струму третьої гармоніки і виконується зі зменшеним перетином (якщо на КО не передбачається іншого додаткового навантаження, наприклад, при можливому підключенні конденсаторної батареї). Завдяки зустрічному включенню своїх секцій обмотка керування має еквіпотенціальні виводи (+) і (—), на яких в нормальних сталих і перехідних режимах відсутня змінна напруга від обмоток МО або КО. При закритих тиристорах основного або резервного ТМП випрямлена напруга на цих висновках ОК також відсутня, відповідно відсутній і струм підмагнічування в ОК, тому магнітна система знаходиться в ненасиченому стані, а КШР — в режимі холостого ходу, як звичайний трансформатор [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33].



САУ — система автоматичного керування;

ТМП — трансформатор з перетворювачем; МО — мережева обмотка;

КО — компенсаційна обмотка; ОК — обмотка керування.

Рисунок 1.9 — Електромагнітна схема трифазного триобмоткового КШР [16]

В продовж відкриття тиристорів і зростання випрямленої напруги наростає струм підмагнічування в секціях обмотки керування, в результаті чого відбувається насичення стрижнів магнітопроводу і зростання споживаного струму реактора. Тиристири основного ТМП (а при його профілактиці або несправності - резервного) керуються від цифрової системи автоматичного керування (САУ) за обраним алгоритмом стабілізації напруги або підтримки заданого значення споживаної реактивної потужності. Для реалізації цих алгоритмів в САУ подаються сигнали від трансформаторів напруги та струму, а також уставки регулювання, що задаються персоналом за вказівкою диспетчера енергосистеми. Після вибору режиму і завдання необхідних уставок втручання персоналу в автоматичну роботу реактора не потрібно.

1.4 Основні технічні характеристики керованого шунтувального реактора, що досліджується

КШР характеризуються такими основними технічними характеристиками:

- діапазон плавного регулювання - понад 100% номінальної потужності;
- потужність керування — 0,5...2 % номінальної потужності КШР;
- гарантована швидкість набору повної потужності — 0,15 ... 3 с (в залежності від виконання і вимог замовника);
- час набору повної потужності з попереднім підмагнічуванням - не більше 0,02 с .;
- питома повна маса від 1,5 до 3 кг / кВАр в залежності від виконання;
- питоми втрати:
 - а) холостого ходу 0,5 — 1,0 Вт / кВАр;
 - б) номінальні 4 - 6 Вт / кВАр;
- допустиме перевантаження по потужності — 130% (не більше 30 хв.);
- допустиме перевантаження по струму — 120% (не більше 30 хв.);
- повністю автоматичний режим експлуатації;
- рівень надійності, умови експлуатації та технічного обслуговування відповідають звичайним шунтувальним реакторам.

1.5 Переваги керованого шунтувального реактора перед іншими альтернативними пристроями

Регулювальний діапазон становить понад 100% від номінальної потужності КШР, при цьому забезпечується плавне регулювання з необмеженим ресурсом можливих змін. Відсутність пристроїв РПН і інших рухомих механічних частин. Можливість нормованої за часом перевантаження КШР до 130% і короткочасної перевантаження до 200 %. Регулювання напруги і реактивної

потужності безпосередньо в точці підключення реактора для будь-якого класу напруги мережі. Використання для регулювання малопотужних вентильних пристроїв з меншими втратами і відсутністю необхідності у водяному охолодженні. Традиційні вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу на підстанції. Більш низький рівень втрат в експлуатаційних режимах. Зовнішня установка основного силового обладнання для будь-якої кліматичної зони. Істотно нижча вартість.

1.6 Технічне завдання на розробку та дослідження КПШР

1.6.1 Мета розробки та дослідження

Як зазначається у джерелах [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33] за результатами експлуатації та системних випробувань низки керованих реакторів було виявлено підвищений вміст у мережевих струмах КПШР гармонійних складових, низька швидкість зміни реактивної потужності, що споживається реакторами в після аварійних режимах роботи мережі, випадки пошкоджень вентильних перетворювачів.

Для визначення особливостей перебігу електромагнітних процесів в КПШР необхідний докладний аналіз роботи реакторів у різних режимах, що визначаються мережею. Найбільш ефективним інструментом для вирішення таких завдань є математичне моделювання. Точні математичні моделі дозволяють досліджувати різні аварійні збурення, як у мережі, так і у самому пристрої. Метою розробки та дослідження є розрахунок пристрою компенсації реактивної потужності на базі керованого шунтувального реактора, призначеного для включення в лінію електропередавання 110 кВ з заземленою нейтраллю для регулювання і компенсації реактивної потужності лінії. До складу реактора входять електромагнітна частина, трансформатор з вбудованим напівпровідниковим перетворювачем, система керування, регулювання, захисту і

автоматики. Дослідження електродинамічних параметрів щодо механічної стійкості металевої конструкції реактора.

1.6.2 Основні параметри пристрою компенсації реактивної потужності

Основними параметрами керованого шунтувального реактора кліматичного виконання У категорії 1 по [3, 4, 7, 13, 18, 23, 33]. Середньорічна температура повітря не більше 20°C, середньодобова температура повітря не більше 30°C. Висота установки над рівнем моря — не більше 1000 м. Навколишнє середовище не вибухонебезпечне, що не містить струмопровідного пилу, агресивних газів і пари в концентраціях, що руйнують метали і ізоляцію. Нейтраль системи, в яку встановлюється реактор, повинна бути глухозаземлена. Номінальні параметри даного реактора приведені в таблиці 1.2.

1.6.3 Технічні вимоги

Перевищення температури елементів електромагнітної частини над температурою навколишнього середовища мають бути наступними:

- обмотки (виміряні по опору) — не більше 65 °С;
- найбільш нагрітої точки обмотки — не більше 78 °С;
- оливи у верхніх шарах (виміряний термометром) — не більше 60 °С;
- бака (виміряний ультрачервоні термометром) — не більше 70 °С;
- поверхня магнітної системи і металоконструкції — не більше 80 °С.

Корегований рівень звукової потужності в сталому номінальному режимі при номінальній напрузі на відстані 2 м від реактора при включених вентиляторах, не більше 105 дБА.

Подвійна амплітуда вібропереміщення стінки бака в сталому номінальному режимі при номінальній напрузі і номінальній потужності мережевої обмотки, не більше, мкм:

- середнє значення 150;

— максимальне в окремих точках 180.

Таблиця 1.2 — Номінальні параметри керованого шунтувального реактора

Параметр	Значення параметра
Напруга, кВ:	
— мережева обмотка (МО);	110
— компенсаційна обмотка (КО);	11
— обмотка керування (ОК)	23,3
Частота, Гц	50
Потужність, кВАр:	
— холостого ходу;	1000
— номінальна;	63000
— максимально допустима	75000
Струм, А:	
— мережевої обмотки (МО)	300
— компенсаційної обмотки (КО)	380
— обмотки керування (ОК)	450
— дроселя	380
Повна маса КШР, кг	150000
Тип системи охолодження	Д

Аналіз та дослідження електромагнітних параметрів пристроїв компенсації реактивної потужності (КПШР) проведено на основі керованого шунтувального реактора (КШР) типу РТУ, який відноситься до класу пристроїв, в яких зміна індуктивності здійснюється через насичення магнітного кола підмагнічуванням КПШР [29, 72].

2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА

2.1 Розрахунок коефіцієнтів трансформації обмоток керованого підмагнічуванням шунтувального реактора

Розрахунок параметрів реактора проводиться за методикою, що наведена в [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Коефіцієнтом трансформації (K) називається співвідношення напруги обмоток КППР на холостому ході. Електромагнітна частина даного КППР проектується на базі силового триобмоткового трансформатора і відповідно розрахунок коефіцієнта трансформації проводиться серед трьох обмоток МО, ОК та ОК.

Номінальний коефіцієнт трансформації обмоток МО-КО [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$K = \frac{U_{\text{МО}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{КО}}}, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{МО}}$ — напруга мережевої обмотки МО;

$U_{\text{КО}}$ — напруга компенсаційної обмотки КО.

$$K = \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 11,055},$$

$$K = 6,319.$$

Номінальний коефіцієнт трансформації обмоток ОК-КО

$$K = \frac{U_{\text{ОК}}}{U_{\text{КО}}}, \quad (2.2)$$

де $U_{\text{ОК}}$ — напруга обмотки керування ОК.

$$K = \frac{23,285}{11,055} = 2,106,$$

$$K = 2,106.$$

Номинальний коефіцієнт трансформації обмоток МО-ОК

$$K = \frac{U_{MO}}{U_{OK}}, \quad (2.3)$$

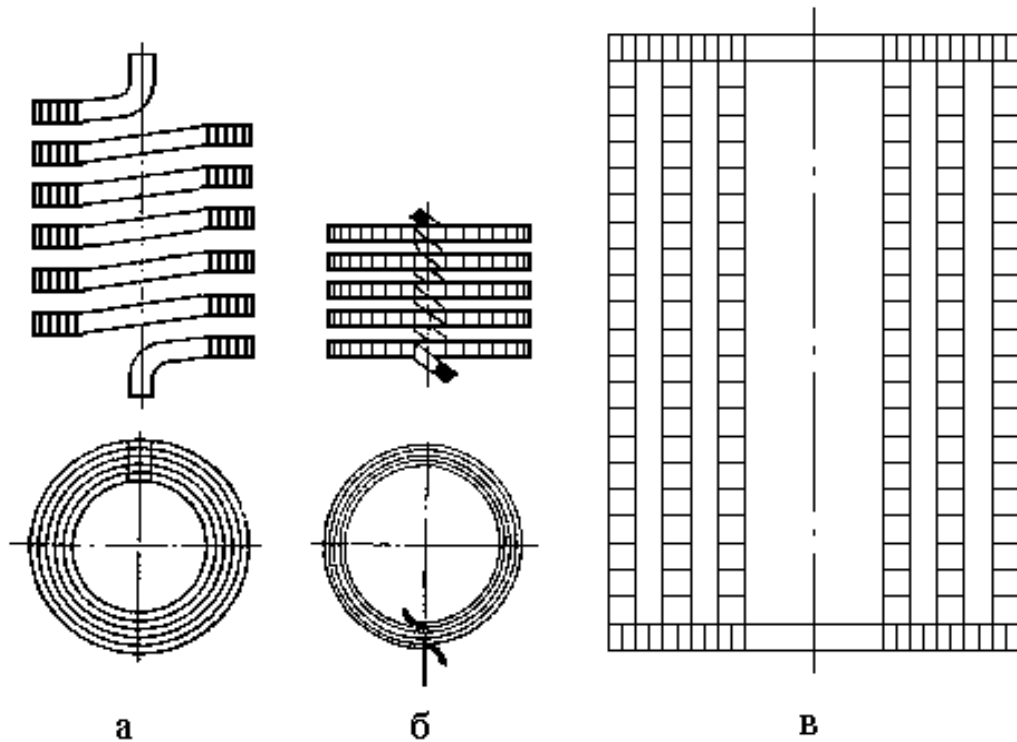
$$K = \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 23,285},$$

$$K = 3,00019.$$

2.2 Розрахунок обмоток пристрою компенсації реактивної потужності

Одним з основних елементів конструкції електромагнітної частини КПШР є обмотка. Всі обмотки оливних реакторів за характером намотування можна поділити на такі типи: циліндричні, гвинтові і котушкові. Циліндрична обмотка являє собою обмотку, перетин витка якої складається з одного або декількох паралельних проводів, а витки і всі їхні паралельні дроти розташовані в один ряд без інтервалів на циліндричній поверхні в осьовому напрямку. Застосування такої обмотки в реакторах обмежена, адже для забезпечення необхідної індуктивності реактора іноді потрібно обмотка неприпустимо великої висоти. У таких випадках обмотка намотується в кілька шарів, з'єднаних між собою послідовно та ізольованих один від одного оливним каналом, який забезпечується установкою між шарами рейок з електроізоляційного картону.

Гвинтова обмотка – це обмотка, витки якої йдуть одна за одною в осьовому напрямку по гвинтовій лінії, а переріз кожного витка утворено перерізами декількох паралельних проводів прямокутного перетину, розташованих в один ряд в радіальному напрямку обмотки згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].



а — гвинтова обмотка; б — котушкова безперервна обмотка;
в — циліндрична сарова обмотка.

Рисунок 2.1 — Ескізи обмоток електромагнітної частини КПШР [27]

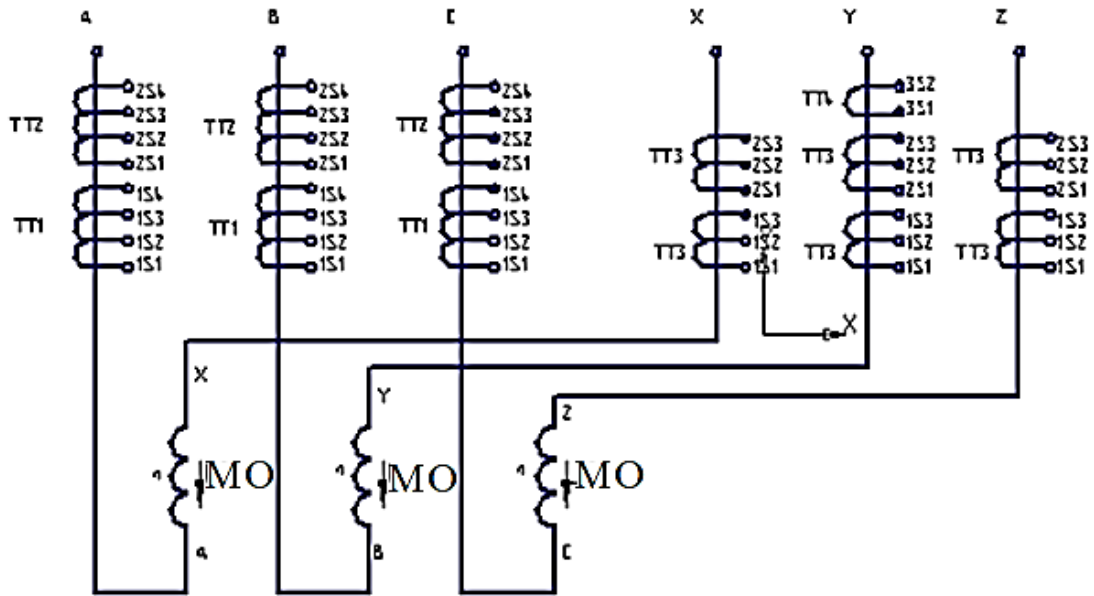
Обмотка, що складається з ряду послідовно з'єднаних котушок, намотаних у вигляді плоских спіралей з одного або більше проводів прямокутного перерізу і розташованих в осьовому напрямку обмотки, з радіальними каналами між всіма або частиною котушок називається котушковою. Якщо котушкова обмотка намотується безперервним або декількома безперервними проводами, вона називається безперервною котушковою обмоткою. Основні властивості різних типів обмоток наведені в таблиці 2.1 згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Принципова електрична схема з'єднання обмоток електромагнітної частини КПШР наведена на рисунку 2.2.

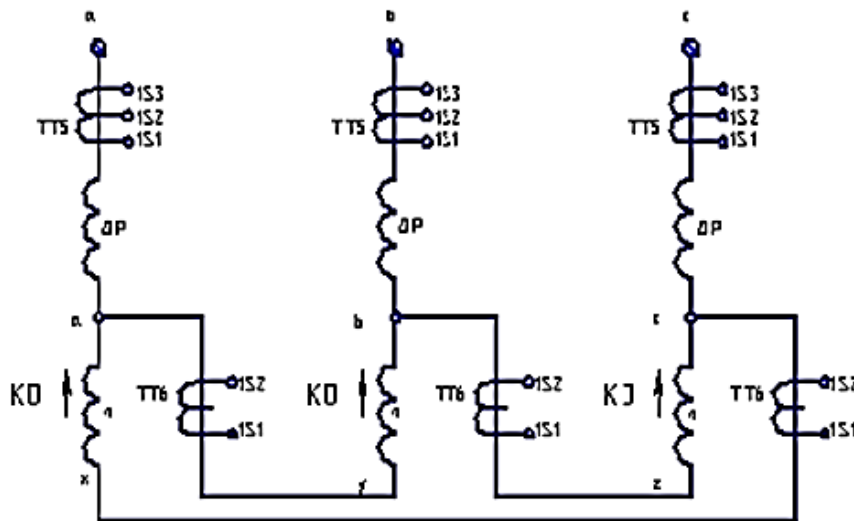
Таблиця 2.1 — Основні властивості різних типів обмоток [34, 35]

Тип обмотки	Переваги	Недоліки	Межі застосування		
			по струму I, A	по напрузі U, kV	по перерізу витка S, mm
Циліндрична багатопшарова	Проста технологія виготовлення, порівняно невелика вартість	Невелика охолоджувальна поверхня в порівнянні з обмотками, що мають радикальні канали	Від 15 до 1200	10 і 35	Від 5,04 до 400
Гвинтові	Висока механічна міцність, надійна ізоляція, гарне охолодження	Більш висока вартість у порівнянні з циліндричною обмоткою	Від 300 і вище	до 35	Від 75 і вище
Безперервна котушкова	Висока механічна і електрична міцність, гарне охолодження	Необхідність перекладки котушок під час намотування	Від 15 і вище	Від 3 до 220	Від 5,04 і вище

Мережеві обмотки



Компенсаційні обмотки



Обмотки керування



Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова КШР

2.2.1 Розрахунок мережевої обмотки

Розрахунок проводиться за методикою, рекомендованою в [4, 5, 18, 19, 20, 71]. Мережева обмотка котушкового типу є безперервною і виконана з мідного дроту прямокутного перерізу з паперовою ізоляцією.

Струм мережевої обмотки розраховується за формулою

$$I_{\text{МО}} = \frac{S_{\text{н}} \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot U_{\text{н}}}, \quad (2.4)$$

де $S_{\text{н}}$ – номінальна потужність 63000 кВАр;

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга 121 кВ.

$$I_{\text{МО}} = \frac{63000 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 121},$$

$$I_{\text{МО}} = 300, \text{ А.}$$

Отже, визначається число витків мережевої обмотки згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$W_{\text{МО}} = \frac{U_{\text{н}}}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{с}} \cdot S_{\text{ст}}}, \quad (2.5)$$

де $B_{\text{с}}$ – індукція в стержні 1,769 Тл;

f – частота мережі 50 Гц;

$S_{\text{ст}}$ – активне перетин стержня 0,361516 м².

$$W_{\text{МО}} = \frac{121000}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,769 \cdot 0,361516 \cdot \sqrt{3}}$$

$$W_{\text{МО}} = 492,06..$$

Конструктивно приймається 492,1 згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71].

Перетин дроту обмотки орієнтовно визначається, виходячи з прийнятої щільності струму при номінальному режимі

$$S_{\text{МО}} = \frac{I_{\text{МО}}}{j}, \quad (2.6)$$

де j – прийнята щільність струму дроти мережевий обмотки 3,35 А / мм².

$$S_{\text{МО}} = \frac{300,6}{3,35},$$

$$S_{\text{МО}} = 89,73 \text{ мм}^2.$$

Виходячи з отриманого перерізу, а також з огляду на рекомендації вибирається провід марки ПБП $\frac{1,7 \times 9}{0,98} \times 2$. Виходячи з прийнятої форми обмотки, попередньо задаються наступні параметри: внутрішній діаметр, зовнішній діаметр, кількість котушок, число витків в кожній котушці.

З огляду на рекомендації вибираються для вищевказаних параметрів числові значення, наведені в таблиці 2.2.

Також визначаються осьові розміри мережевої обмотки, виходячи з отриманих даних і попередньої осьової схеми будови обмотки, яка представлена на рисунку 2.3.

Розраховується висота міді в обмотці за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$h_m = b \cdot N_k, \quad (2.7)$$

де b – висота мідного дроту в обмотці 9 мм;

N_k – кількість котушок в обмотці 66.

$$h_m = 9 \cdot 66,$$

$$h_m = 594 \text{ мм}.$$

Таблиця 2.2 – Числові значення попередніх параметрів

Параметр	Позначення	Значення
Внутрішній діаметр, мм	Д _{вн}	1604
Зовнішній діаметр, мм	Д _н	1850
Число витків в котушці В	W _{кв}	$7\frac{34}{40}$
Число витків в котушці Г	W _{кг}	$6\frac{34}{40}$
Кількість котушок	N _к	66

Визначається товщина ізоляції мідного дроту виходячи з формули згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$h_{i3} = b_{i3} \cdot N_k \cdot K_y, \quad (2.8)$$

де b_{i3} – товщина ізоляції мідного дроту дорівнює 0,98 мм;

K_y – коефіцієнт укладання дорівнює 0,7686.

$$h_{i3} = 0,98 \cdot 66 \cdot 0,7686,$$

$$h_{i3} = 49,71 \text{ мм.}$$

Значення сумарної висоти всіх охолоджуючих каналів визначається з осьової будови обраної конструктивної форми обмотки

$$h_k = 6 \cdot n_i + 4 \cdot n_i, \quad (2.9)$$

де n_i – відповідно кількість охолоджувальних каналів по 6 мм та 4 мм.

$$h_k = 6 \cdot 33 + 4 \cdot 33,$$

$$h_k = 330 \text{ мм.}$$

Висота каналів з урахуванням коефіцієнта укладання картону $K_c = 0,93677$.

$$h_k = h_k \cdot K_c, \quad (2.10)$$

$$h_k = 330 \cdot 0,93677,$$

$$h_k = 309,13 \text{ мм.}$$

Геометрична висота обмотки визначається за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$H_{\text{обм}} = h_m + h_{\text{із}} + h_k + h_{\text{е.к.}}, \quad (2.11)$$

де $h_{\text{е.к.}}$ – висота ємнісного кільця 21,07 мм.

$$H_{\text{обм}} = 594 + 49,71 + 309,13 + 21,07,$$

$$H_{\text{обм}} = 948,37 \text{ мм.}$$

Конструктивно приймається 948,4 мм.

Розраховується індуктивність мережевої обмотки перед насадкою на стрижень зі знайденими геометричними параметрами за формулою

$$L = W^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d_{\text{ср.обм.}}^2}{4} \cdot \frac{1}{H_{\text{обм}}} \cdot K_1, \quad (2.12)$$

де μ_0 – електромагнітна проникність $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$;

$d_{\text{ср.обм.}}$ – середній діаметр обмотки 1,727 м;

K_1 – коефіцієнт індуктивності і розраховується за формулою

$$K_1 = \frac{2H_{обм} - a \cdot \frac{H_{обм}}{d_{ср.обм.}}}{2H_{обм} + d_{ср.обм.} + a'} \quad (2.13)$$

де a – радіальний розмір обмотки 0,123 м.

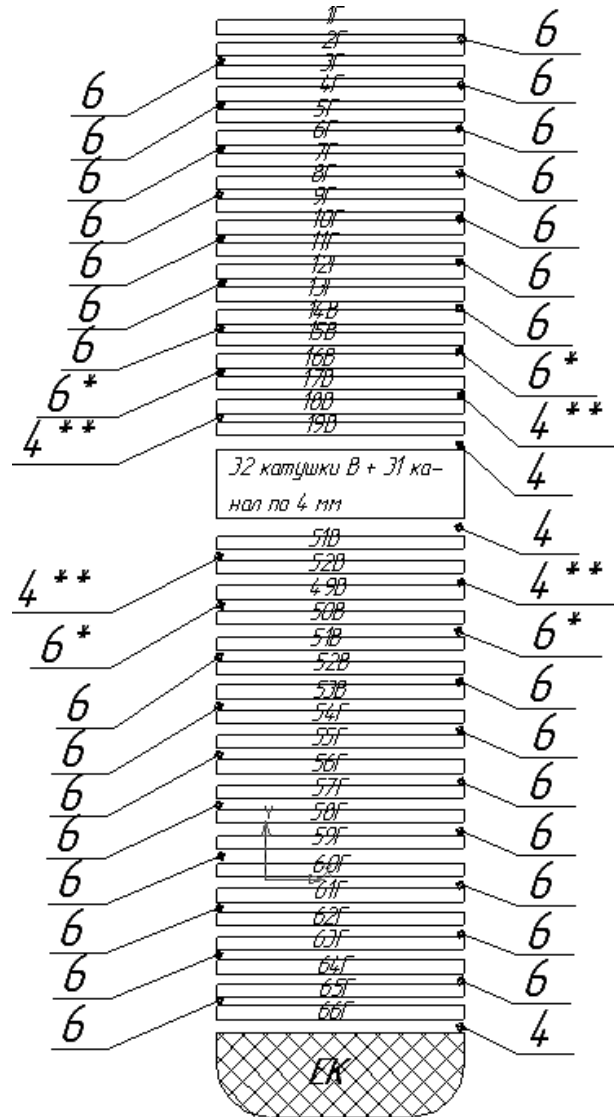


Рисунок 2.3 – Схема осової будови мережевої обмотки

$$K_1 = \frac{2 \cdot 0,9484 - 0,123 \cdot \frac{0,9484}{1,727}}{2 \cdot 0,9484 + 1,727 + 0,123'}$$

$$K_1 = 0,488.$$

$$L = 492,1^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot 1,727^2}{4} \cdot \frac{1}{0,9484} \cdot 0,488,$$

$$L = 0,384 \text{ Гн.}$$

Виходячи з розрахованої індуктивності, знаходиться реактивне опір мережевої обмотки перед насадкою на стрижень за формулою:

$$X = L \cdot 2\pi \cdot f, \quad (2.14)$$

$$X = 0,384 \cdot 2\pi \cdot 50,$$

$$X = 115,3 \text{ Ом.}$$

2.2.2 Розрахунок обмотки керування

Обмотка керування гвинтова чотиришарова, виконана з транспонованого мідного дроту прямокутного перетину з паперовою ізоляцією.

Визначається число витків обмотки керування згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$W_{\text{ок}} = \frac{U_{\text{ок}}}{4,44 \cdot f \cdot B_s \cdot S_{\text{ст}}}, \quad (2.15)$$

де B_s — індукція в стержні 1,769 Тл;

$U_{\text{ок}}$ — номінальна напруга обмотки керування 23285 В;

f — частота мережі 50 Гц;

$S_{\text{ст}}$ — активне перетин стрижня 0,180854 м².

$$W_{\text{ок}} = \frac{23285}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,769 \cdot 0,180854}$$

$$W_{\text{ок}} = 327,8.$$

Конструктивно приймається 328.

Отже струм обмотки керування розраховується за формулою:

$$I_{\text{ок}} = \frac{I_{\text{МО}} \cdot W_{\text{МО}}}{W_{\text{ок}}}, \quad (2.16)$$

$$I_{\text{ок}} = \frac{300,6 \cdot 492,1}{328} = 451 \text{ A.}$$

Виходячи з отриманих параметрів, а також з огляду на рекомендації вибирається провід марки ПТБ $\frac{1,18 \times 4,5}{0,72} \times 13$. Визначаються осьові розміри обмотки керування, виходячи з отриманих даних і попередньої осьової схеми будови обмотки, яка представлена на рисунку 2.4.

Розраховується висота міді в обмотці за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$h_{\text{м}} = b \cdot N_{\text{к}}, \quad (2.17)$$

де b — висота мідного дроту в обмотці 9,2 мм;

$N_{\text{к}}$ — кількість катушок в обмотці 83.

$$h_{\text{м}} = 9,2 \cdot 83,$$

$$h_{\text{м}} = 763,6 \text{ мм.}$$

Визначається товщина ізоляції мідного дроту, виходячи з формули

$$h_{\text{із}} = b_{\text{із}} \cdot N_{\text{к}} \cdot K_{\text{у}}, \quad (2.18)$$

де $b_{\text{із}}$ — товщина ізоляції мідного дроту 0,96 мм;

$K_{\text{у}}$ — коефіцієнт укладання 0,82.

$$h_{\text{із}} = 0,96 \cdot 83 \cdot 0,82,$$

$$h_{\text{із}} = 65,26 \text{ мм.}$$

Значення сумарної висоти всіх охолоджуючих каналів визначається з осьової будови обраної конструктивної форми обмотки

$$h_k = 3,2 \cdot n_i + 1,6 \cdot n_i + 14,4 \cdot n_i, \quad (2.19)$$

де n_i — відповідно кількість охолоджуючих каналів по 3,2; 1,6; 14,4 мм.

$$h_k = 3,2 \cdot 35 + 1,6 \cdot 46 + 14,4 \cdot 1, \\ h_k = 200 \text{ мм.}$$

Висота каналів з урахуванням коефіцієнта укладання картону $K_c = 0,955$

$$h_k = h_k \cdot K_c, \quad (2.20) \\ h_k = 330 \cdot 0,955, \\ h_k = 191 \text{ мм.}$$

Геометрична висота обмотки визначається за формулою:

$$H_{\text{обм.}} = h_m + h_{\text{из}} + h_k, \quad (2.21) \\ H_{\text{обм.}} = 763,6 + 65,26 + 191, \\ H_{\text{обм.}} = 1006,23 \text{ мм.}$$

Конструктивно приймається 1006,2 мм.

2.2.3 Розрахунок компенсаційної обмотки

Компенсаційна обмотка гвинтова, виконана з транспонованого мідного дроту прямокутного перетину з паперовою ізоляцією згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]. В наслідок того, що тип компенсаційної обмотки обраний ідентичний з обмоткою керування, розрахунок проводимо аналогічно до попередньої обмотки. Розраховується струм компенсаційної обмотки згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$I_{\text{ко}} = I_{\text{мо}} \cdot K_T \cdot K_H, \quad (2.22)$$

де K_n — коефіцієнт навантаження 0,2;

K_T — коефіцієнт трансформації мережевий і компенсаційної обмоток 6,319.

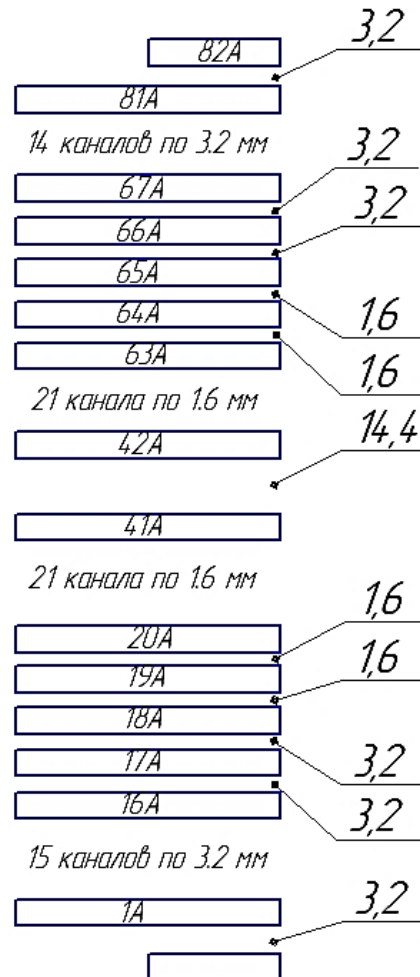


Рисунок 2.4 — Схема осьової будови обмотки керування

$$I_{\text{ко}} = 300,6 \cdot 6,319 \cdot 0,2,$$

$$I_{\text{ко}} = 380 \text{ А.}$$

Число витків визначається за формулою:

$$W_{\text{ко}} = \frac{U_{\text{ко}}}{4,44 \cdot f \cdot B_s \cdot S_{\text{ст}}}, \quad (2.23)$$

де B_s — індукція в стержні 1,769 Тл;

$U_{ко}$ — номінальну напругу компенсаційної обмотки 11055 В;

f — частота мережі 50 Гц;

$S_{ст}$ — активне перетин стрижня 0,361516 м².

$$W_{ко} = \frac{11055}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,769 \cdot 0,361516},$$

$$W_{ко} = 77,87.$$

Конструктивно приймається 78.

Виходячи з отриманих параметрів, а також з огляду на рекомендації вибираємо провід марки ПТБ $\frac{1,25 \times 4,5}{0,72} \times 17$. Визначаються осьові розміри обмотки керування попередньої осьової схеми будови обмотки, яка представлена на рисунку 2.5.

Розраховується висота міді в обмотці за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$h_m = b \cdot N_k, \quad (2.24)$$

де b — висота мідного дроту в обмотці 9,2 мм;

N_k — кількість котушок в обмотці 79.

$$h_m = 9,2 \cdot 79,$$

$$h_m = 726,8 \text{ мм.}$$

Визначаємо товщину ізоляції мідного дроту виходячи з формули:

$$h_{із} = b_{із} \cdot N_k \cdot K_y, \quad (2.25)$$

де $b_{із}$ — товщина ізоляції мідного дроту 0,96 мм;

K_y — коефіцієнт укладання 0,82.

$$h_{i3} = 0,96 \cdot 79 \cdot 0,82,$$

$$h_{i3} = 62,86 \text{ мм.}$$

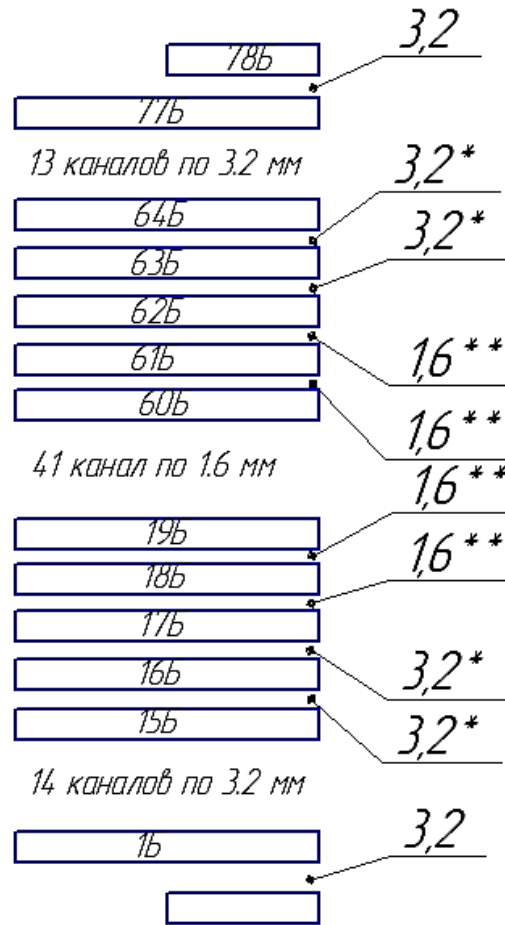


Рисунок 2.5 — Схема осевої будови компенсаційної обмотки

Значення сумарної висоти всіх охолоджуючих каналів визначається з осевого будови обраної конструктивної форми обмотки

$$h_k = 3,2 \cdot n_i + 1,6 \cdot n_i, \quad (2.26)$$

де n_i — відповідно кількість охолоджуючих каналів по 3,2 і 1,6 мм.

$$h_k = 3,2 \cdot 33 + 1,6 \cdot 45,$$

$$h_k = 177,6 \text{ мм.}$$

Висота каналів з урахуванням коефіцієнта укладання картону $K_c = 0,955$

$$h_k = h_k \cdot K_c, \quad (2.27)$$

$$h_k = 177,6 \cdot 0,955,$$

$$h_k = 169,9 \text{ мм.}$$

Геометрична висота обмотки визначається за формулою:

$$H_{\text{обм.}} = h_m + h_{\text{из}} + h_k, \quad (2.28)$$

$$H_{\text{обм.}} = 726,8 + 62,86 + 169,9,$$

$$H_{\text{обм.}} = 945,88 \text{ мм.}$$

Конструктивно приймається 946 мм.

2.3 Розрахунок магнітопроводу

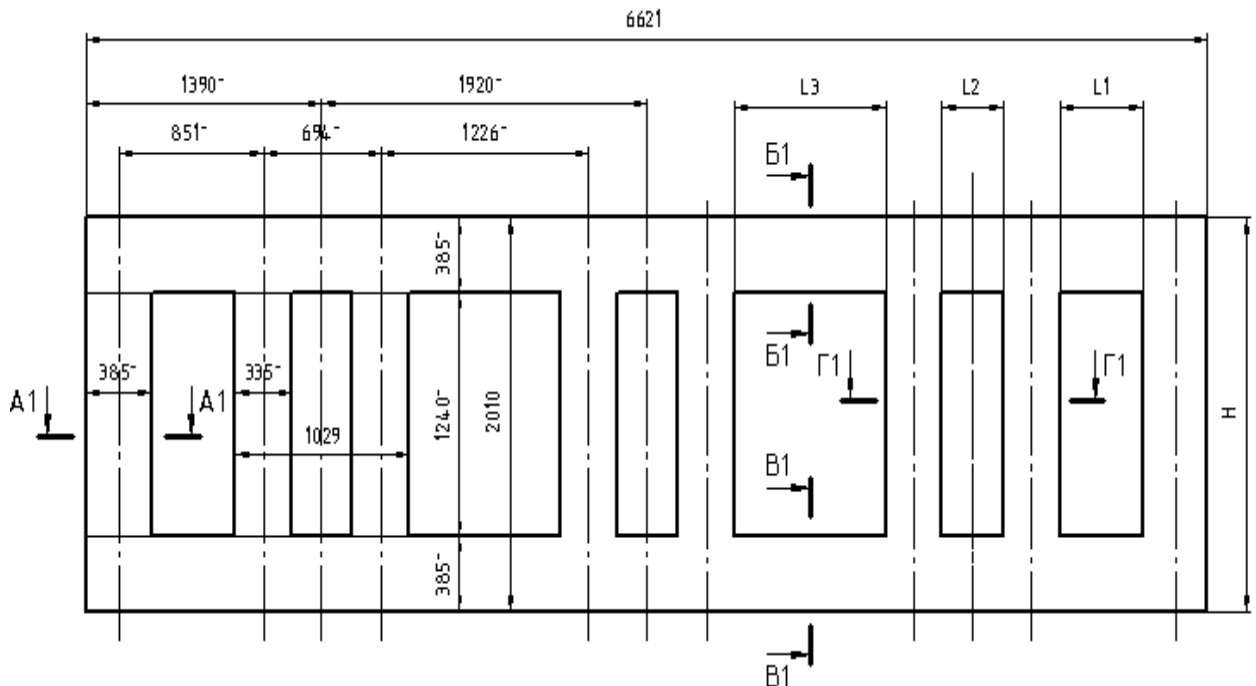


Рисунок 2.6 — Схема міжосьової відстані по центральному пакету магнітопроводу КПШР

Магнітопровід бронестрижневого типу, зібраний з листів холоднокатаної електротехнічної сталі з жаростійким ізоляційним покриттям.

Розрахунок проводиться для магнітопроводів, конструкція яких наведена на рисунках 2.7 і 2.8.

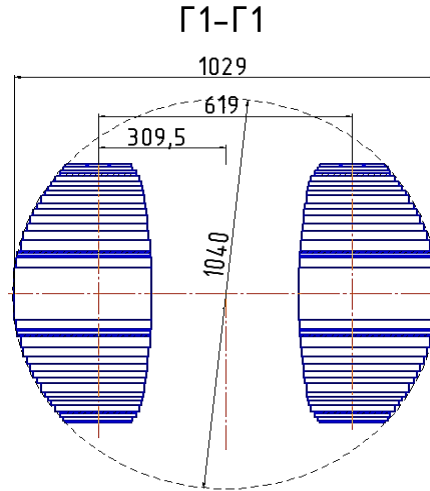


Рисунок 2.7 — Конструкція стрижня КПШР

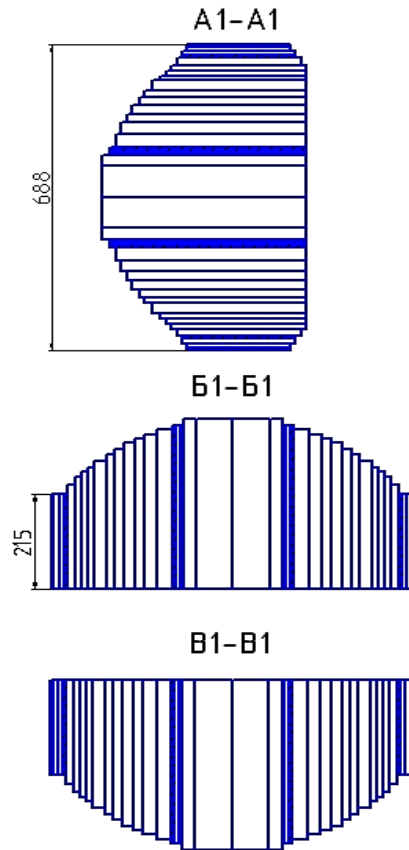


Рисунок 2.8 — Конструкція верхнього, нижнього і бокових ярем КПШР

Переріз магнітопроводу визначається за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$S_M = \frac{E_{1\text{НОМ}}/W_{\text{МО}}}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{СТ}} \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.29)$$

де $E_{1\text{НОМ}}$ – номінальне первинна напруга 121000 В;

$B_{\text{СТ}}$ – індукція сталі магнітопроводу 1,7 Тл.

$$S_M = \frac{121000/492,1}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,7 \cdot \sqrt{3}}$$

$$S_M = 0,3619 \text{ м}^2.$$

Переріз ярма з урахуванням коефіцієнта заповнення

$$S_{\text{яр}} = 1,05 \cdot K_z \cdot S_M, \quad (2.30)$$

$$S_{\text{яр}} = 1,05 \cdot 0,96 \cdot 0,3619,$$

$$S_{\text{яр}} = 0,3648 \text{ м}^2.$$

Матеріал магнітопроводу – сталь 3408, товщиною 0,3 мм ... 0,35 мм.

Розміри пакетів – ширина пластин «а» і товщина пакетів «в» для магнітної системи з пресування стрижнів обмотки вибираються по [42...45].

Площа перетину пакета стержня визначається за формулою

$$S_i = a_{ni} \cdot b_{ni}, \quad (2.31)$$

де a_{ni} – ширина і-го пакета, м;

b_{ni} – товщина і - го пакета, м;

i – номер пакета 1 ... 17.

Площа перерізу стрижня магнітопроводу дорівнює

$$S_{\text{ст}} = 2 \sum_{i=1}^{17} S_i \quad (2.32)$$

$$S_{\text{ст}} = 2 \cdot (335 \cdot 70 + 330 \cdot 25 + 325 \cdot 13 + 315 \cdot 29 + 305 \cdot 25 + 295 \cdot 19 + 285 \cdot 21 + 275 \cdot 17 + 265 \cdot 14 + 250 \cdot 24 + 240 \cdot 11 + 230 \cdot 12 + 205 \cdot 16 + 185 \cdot 9 + 170 \cdot 10 + 50 \cdot 3,5) \cdot 10^{-6},$$

$$S_{\text{ст}} = 0,3765 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт заповнення сталлю згідно [42...45] приймаємо рівним $K_3 = 0,96$. З урахуванням коефіцієнта заповнення площа активного перетину стрижня визначається за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$S_{\text{ст.а}} = S_{\text{ст}} \cdot K_3, \quad (2.33)$$

$$S_{\text{ст.а}} = 0,3765 \cdot 0,96,$$

$$S_{\text{ст.а}} = 0,3615 \text{ м}^2.$$

Розраховується індукція в стрижні за формулою згідно з [4, 5, 18, 19, 20, 71]

$$B_{\text{ст}} = \frac{E_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot W_{\text{мо}} \cdot S_{\text{ст}} \cdot f}, \quad (2.34)$$

$$B_{\text{ст}} = \frac{121000}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 492,1 \cdot 0,361516 \cdot 50},$$

$$B_{\text{ст}} = 1,769 \text{ Тл}.$$

3 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОВОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА

Для дослідження, моделювання та розробки імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтувального реактора КШР 110 кВ в якості основного конструктивного виконання був обраний варіант реактора з двома обмотками – мережевою та обмоткою керування [2, 3, 29, 59, 72]. Конструктивні особливості КШР 110 кВ представлені на рисунку 3.1.

На схемі представлено наступне обладнання, що входить до складу КШР серії РТУ-63000/110-УХЛ1:

- РТДУ – електромагнітна частина реактора типу РТДУ-63000/110 із вбудованими трансформаторами струму (ТТ);
- ПП – напівпровідниковий трифазний перетворювач ППМ-200/750;
- САУ – система автоматичного керування (керування) реактора;
- ОМ - трансформатор перетворювача типу ОМ-200/22 / 0,22;
- ТМО – трансформатор початкового підмагнічування ТМО-2,5 / 0,4 / 0,012;
- запобіжник типу ПКТ 101-10-31,5-12,5;
- УЗП – пристрій захисту від перенапруг;
- ДПТ – датчик постійного струму;
- ДПН – датчик постійної напруги.

Конструкція електромагнітної частини КШР такого виконання досить складна, тому що вона трифазна, і, крім того, схема з'єднання, наприклад, мережевої обмотки, повинна враховувати можливість протікання по ній постійного струму в перехідних режимах і виключати його попадання в мережу, що створює деякі проблеми для релейного захисту КШР [2, 3, 29, 59, 72].

Обмотка керування такого КШР також складна через те, що схема з'єднань ОК є «подвійний розімкнений трикутник» і поєднує в собі декілька функцій, а саме:

— забезпечує підключення до виводів «+» / «-» обмотки малопотужного (приблизно 1% від встановленої потужності КШР) трансформаторно-перетворювального блоку, що здійснює циркуляцію випрямленого струму в обмотці керування (ОК);

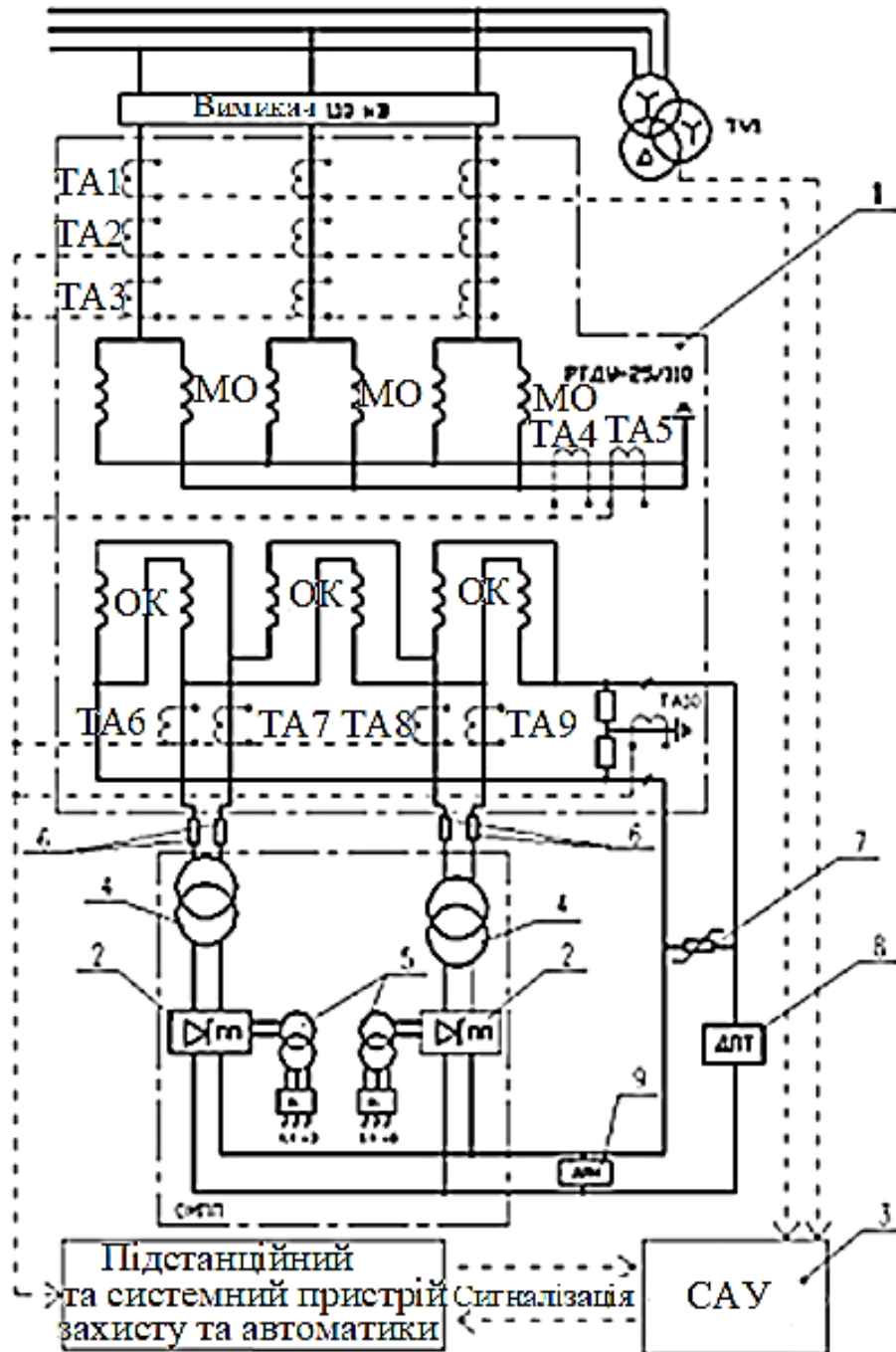


Рисунок 3.1 — Схема з'єднань КШР 110 кВ [29]

- забезпечує компенсацію гармонік, кратних трьом, за рахунок з'єднання обмоток керування в трикутник;

- забезпечує живлення трансформаторно-перетворювальних блоків безпосередніх від обмотки керування за рахунок їх підключення до виводів змінної напруги ОК;

- забезпечує поєднання в одній вторинній обмотці функцій компенсаційної обмотки і обмотки керування, що дозволяє не тільки зменшити число обмоток, але й знизити витрату активних матеріалів.

Устаткування, яке входить до складу РТУ-63000/110-УХЛ1 перераховано нижче:

- електромагнітна частина, що складається з магнітопроводу бронестрижневого типу з шістьма напівстрижнями (по два на фазу). Конструкція фази такого реактора показана на рисунку 3.2. Тут показана крайня ліва з трьох фаз трифазного магнітопроводу, а окрема компенсаційна обмотка відсутня. Магнітна система фази складається з двох напівстрижней (1), верхнього (2) і нижнього (3) горизонтальних ярем і двох бічних ярем (4). На кожному напівстрижні розташовуються секції обмотки керування ОК і мережеві обмотки МО. На відміну від КШР 220...500 кВ, мережева обмотка в КШР 110 кВ має дві секції, кожна з яких розміщена на своєму напівстрижні;

- два однофазних трансформаторно-перетворювальних блоки типу ОМ-200/22/0.22, які підключаються через запобіжники до виводів змінної напруги обмотки керування і забезпечують регулювання споживаної реактором реактивної потужності в повному діапазоні;

- два трансформатора початкового (попереднього) підмагнічування типу ТМО-2,5 / 0.4 / 0.012, які підключаються до трифазної мережі 380 В. Ці трансформатори мають зв'язок по стороні низької напруги з однофазними перетворювачами типу ППМ-200/750 і необхідні для забезпечення початкового підмагнічування реактора перед його включенням;

- цифрова система автоматичного керування, в якій реалізовані алгоритми керування потужністю реактора. Між виводами «+» / «-» обмотки

керування всередині бака реактора встановлюються два резистора, точка з'єднання яких заземлюється. Резистор необхідний на випадок обриву з'єднання між обмоткою керування і полюса перетворювача для забезпечення «гасіння» запасеної в обмотці керування енергії [2, 3, 29, 59, 72].

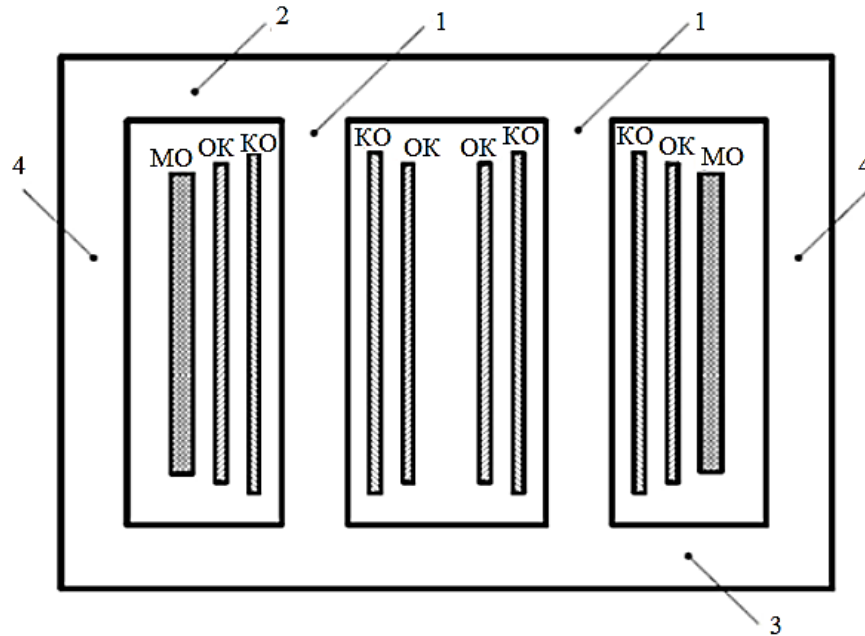


Рисунок 3.2 — Розріз магнітної системи фази КШР 63 МВА 110 кВ [29]

В роботі КШР використовується інформація, що одержується від датчиків постійного струму і напруги (ДПТ і ДПН відповідно). На основі цієї інформації відбувається настройка обмеження випрямленого струму перетворювачів в різних режимах роботи КШР, а так само необхідні обмеження в разі перевантаження перетворювача і трансформатора.

На сьогоднішній день в енергосистемах України експлуатуються понад 30 одиниць КШР 110 кВ описаної вище конструкції. Практика їх експлуатації, а також натурні випробування, що опубліковані авторами робіт [2, 3, 29, 59, 72], показали, що одним з найбільш істотних недоліків КШР 110 кВ є низький час набору і скидання повної потужності реактора, яке становить близько 4 с (для КШР 500 кВ – 0,3 с).

У роботах багатьох авторів [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72]. показані режими роботи електричної мережі, надійне здійснення яких важко при застосуванні

КШР з позначеним швидкодією. У зазначеній роботі проведено аналіз процесів в реакторі, що обмежує можливість збільшення швидкодії КШР 110 кВ, а також запропонований спосіб, що дозволяє значно знизити час набору і скидання потужності без конструктивних доопрацювань реактора.

Істотним режимним обмеженням для підстанцій з одностороннім живленням є неможливість одночасного включення лінії, підстанції і керованого реактора 110 кВ в мережу без його попереднього підмагнічування, що пов'язано з можливістю появи на виводах перетворювача небезпечної перенапруги. У даному розділі магістерської роботи проведено дослідження роботи реактора в зазначеному режимі і доведена можливість його експлуатації без визначеного обмеження.

3.1 Розробка імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтувального реактора

На даний час в Україні та за кордоном існує безліч різних програм для розрахунку електромагнітних перехідних процесів (ЕМПП) в схемах різної складності. До основних програм таких розрахунків можна віднести MathLab з можливістю моделювання в середовищі Simulink і програмний комплекс ЕМТР/АТР, які в ряді західних країн вважаються основними ін-струмент для розрахунку перехідних процесів [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72]. Розрахунки ЕМПП в обраному сучасному програмному комплексі ґрунтуються на імітаційному моделюванні магнітно пов'язаного кола, який є методом математичного моделювання, при якому запис і рішення системи рівнянь, що описують електромагнітну систему, здійснюється з використанням стандартних елементів (блоків). Застосування методу імітаційного моделювання дозволяє розраховувати перехідні процеси в магнітно пов'язаних електричних колах з урахуванням реальної конфігурації електричної та магнітної систем пристрою, для якого розробляється модель. Він видається більш простим і наочним порівняно з

методами, заснованими на чисельному розв'язанні систем рівнянь, що описують перехідні процеси в електромагнітній системі.

Застосування імітаційного моделювання виключає необхідність запису системи рівнянь великої розмірності для розрахункових перехідних процесів в розгалужених магнітно пов'язаних електричних колах. Як приклад розробленої моделі КШР, заснованої на чисельному рішенні системи рівнянь, що описують перехідні процеси в електромагнітній системі можна навести роботи [29, 72]. Крім відмінності методів і підходів до створення моделі КШР в зазначеній роботі, варто відзначити суттєві відмінності конструкцій модельованих реакторів, а також відмінності вирішуваних завдань.

Через те, що керований підмагнічуванням реактор є складним електротехнічним пристроєм, який характеризується нелінійними властивостями електротехнічної сталі, то облік всіх фізичних явищ, що є в магнітній системі реактора, неминуче призводить до погіршення чисельного розрахунку моделі, а це викликає неприпустимо велику тривалість обрахунку. Дуже важливо на початковому етапі створення моделі визначити ряд основних припущень, які з одного боку призведуть до зниження часу розрахунку, а з іншого – не призведуть до спотворення результатів розрахунку [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72].

3.1.1 Головні припущення

Основні припущення, прийняті при моделюванні керованого реактора є такими:

— ярма магнітопроводу, що служать для замикання магнітного потоку обмоток і як наслідок запобігання його виходу за межі муздраттеатру, що не насичуються, у всіх розглянутих режимах їх магнітна проникність нескінченна ($\mu = 0$). Практика виготовлення КШР показує, що конструкцією реактора передбачено застосування приставних до бічних ярм шунтів, спроектованих таким чином, щоб навіть подвійний номінальний магнітний потік не призводив до насичення ярм;

- магнітна індукція у всіх точках стрижня до його насичення однакова, тобто весь стрижень насичується одночасно;
- пласкі поверхні широких ненасичених ярем прилягають до торців стрижнів і концентричних рівномірних рівно високих обмоток. Це припущення, дозволяє звести польову задачу до розрахунку кола [29];
- обмотки є тонкими, таким чином при розрахунку обмоток і потокозчеплення враховується одна і та сама площа, охоплена еквівалентним середнім витком обмотки;
- не враховуються втрати в сталі від вихрових струмів і явище гістерезису;
- не враховується модель перетворювального блоку, який в інших моделях замінюється регульованим джерелом постійної напруги. Дане припущення не позначатиметься на результатах моделювання, проте значно знижуватиме час розрахунку;
- довжина шляху потоків розсіювання обмоток приймається рівною висоті вікна магнітної системи автотрансформатора (тобто довжині стрижня).

3.1.2 Конструкція фази КШР

Повне описання особливостей конструкції керованого підмагнічування реактора КШР 110 кВ було викладено раніше, але має сенс детальніше зупинитися на розгляді тих моментів, які грають принципову роль при створенні комп'ютерної моделі [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72].

Магнітна система однієї фази керованого реактора (рисунок 3.3) являє собою бронестрижневу конструкцію з двома магнітними стрижнями, розташованими в центрі, на яких в свою чергу розташовані три обмотки — компенсаційна, керування і мережева обмотки.

Два центральних стрижня пов'язані між собою центральними ярмами, які виконані потовщеними і при роботі КШР не наситились, що призводить до поліпшення гармонійного складу струмів мережевої обмотки. Також є два

бічних ярма, через які може замикатися магнітний потік, утворений змінним струмом мережевої обмотки.

Мережева обмотка (МО) має тільки одну частину, що охоплює обидва стрижня, що дозволяє обійтися без складних з'єднань, скорочує витрату матеріалів і спрощує конструкцію. В трифазного групі однофазних реакторів МО різних фаз з'єднуються в зірку з заземлюється нейтраллю.

Обмотка керування (ОК) має дві частини, кожна з яких охоплює один зі стрижнів. Дві частини ОК включені зустрічно, щоб магніторушійна сила (МРС), що утворена струмом, що протікає по ним, була спрямована в різні боки.

Компенсаційна обмотка (КО) має дві частини, кожна з котрих охоплюється одним зі стрижнів. Дві частини КО включені на зустріч. В трифазній групі однофазних реакторів КО різних фаз з'єднуються в трикутник.

На підставі описаних вище особливостей конструкції КШР, а також зроблених припущень (п.3.1.1) створена схема заміщення магнітної системи однієї фази КШР 110 кВ (рисунок 3.5).

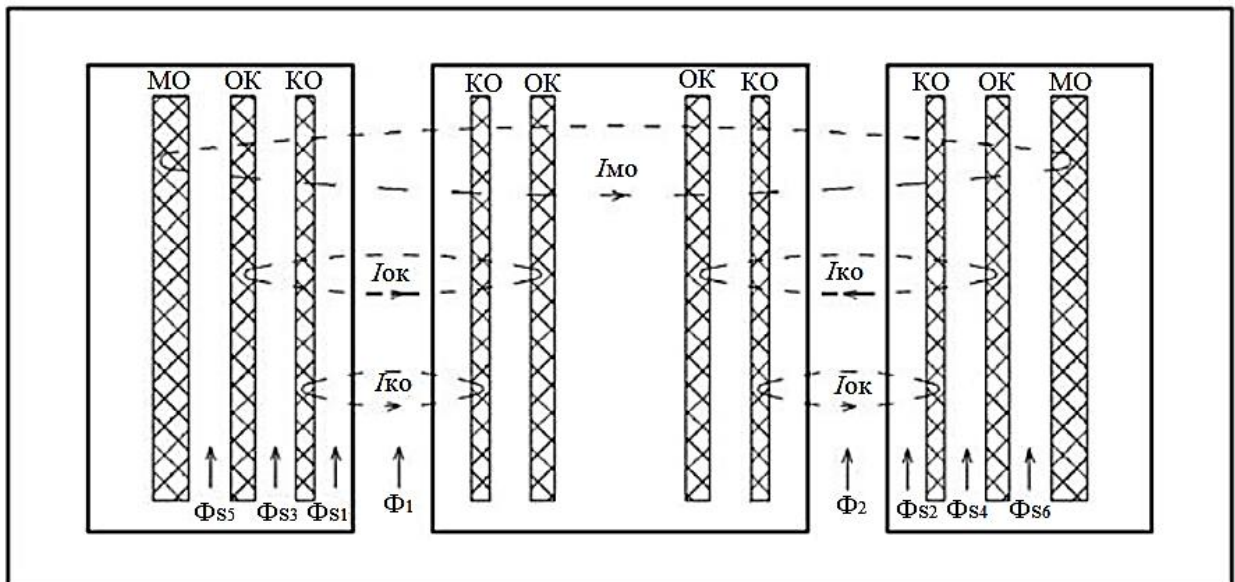


Рисунок 3.3 — Магнітна система однієї фази КШР [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72].

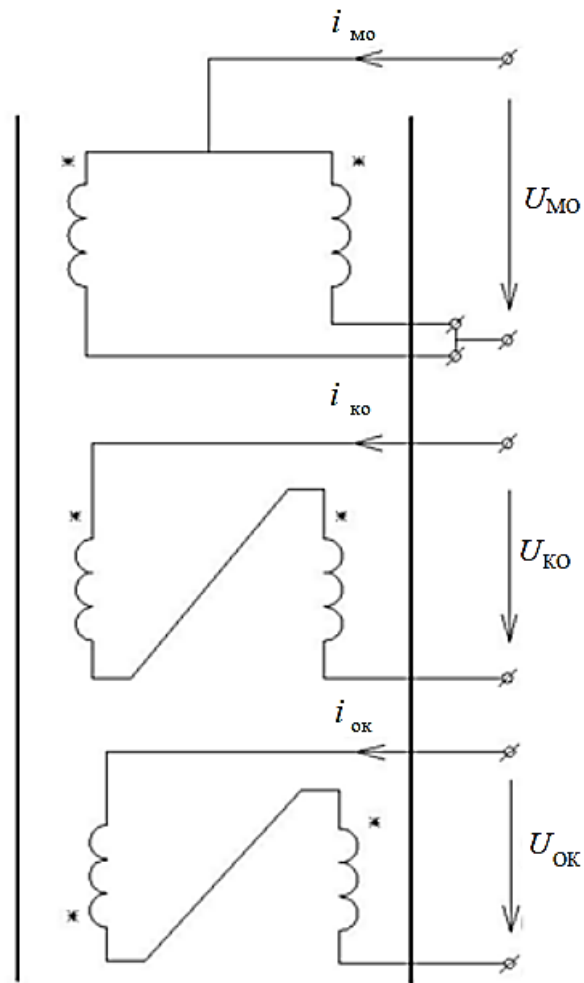


Рисунок 3.4 — Електрична схема з'єднань обмоток однієї фази реактора [29]

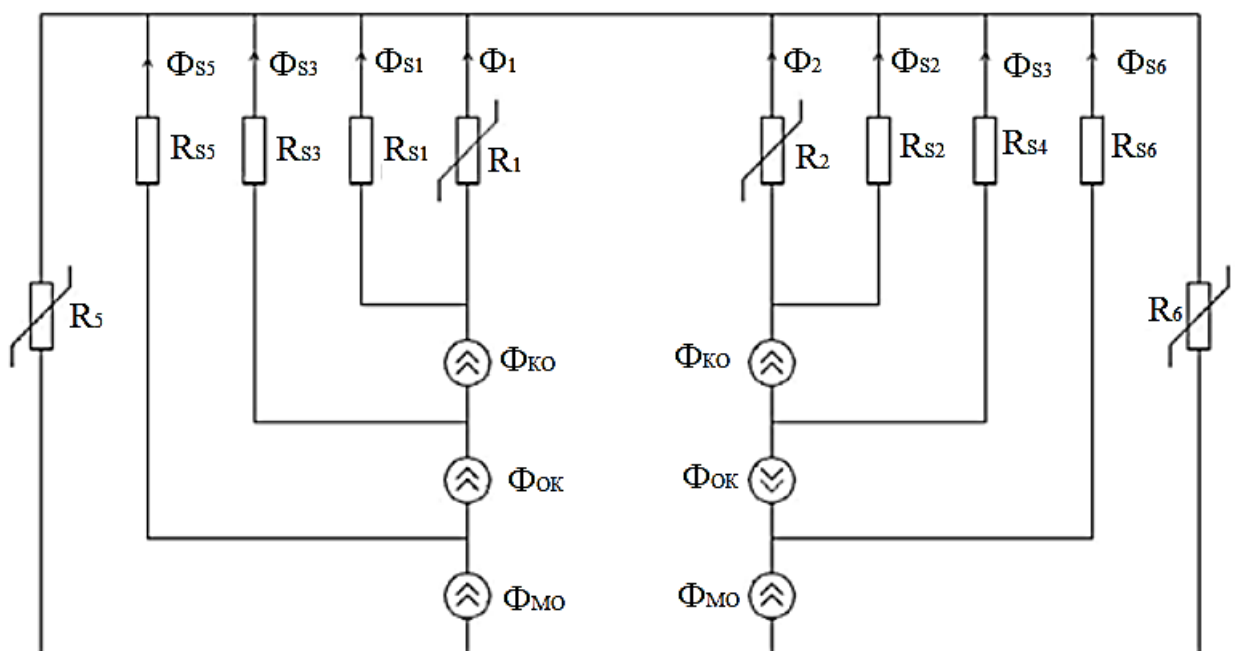


Рисунок 3.5 — Схема заміщення магнітного кола однієї фази КШР 110 кВ [29]

3.2 Розробка моделі КШР в середовищі Simulink (Matlab)

Програмне середовище Simulink є однією з найбільш широко використовуваних імітаційних середовищ моделювання на сьогоднішній день, що дозволяють за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні, нелінійні та інші системи. Як безперечну перевагу Simulink можна відзначити відсутність необхідності видозмінення системи диференціальних рівнянь при будь-якій зміні електричної схеми або схеми заміщення магнітної системи КШР, що значно спрощує створення моделей та знижує ймовірність «механічної» помилки при моделюванні. Даний факт обумовлений особливістю математичного пакета Simulink, в основу якого, закладений принцип візуального програмування з використанням блок-діаграм у вигляді направлених графів [72].

Основною бібліотекою Simulink, яка використовується при створенні моделей електротехнічних пристроїв, є SimPowerSystem (SPS) [72]. Дана бібліотека має великий набір елементів, проте в ній відсутні елементи, що дозволяють наочно моделювати магнітозв'язання ланцюга [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72]..

Розглянемо найпростіше нерозгалужене замкнене магнітне коло, що повністю складається з феромагнітних матеріалів, на які намотана обмотка з числом витків W (рисунок 3.6, а). Прикладене до обмотки змінна ЕРС (E) викликає протікання струму I в обмотці з числом витків W , який в свою чергу створює магнітний потік Φ , який циркулює в осерді. Таким чином, найпростіше нерозгалужене магнітне коло можна представити у вигляді двох схем заміщення — електричної (рисунок 3.6, б) і магнітної (рисунок 3.6, в).

Електрична схема заміщення даного кола містить послідовно з'єднані джерело ЕРС, індуктивність обмотки L і опір R , який враховує активні втрати в обмотці. Тоді для електричної схеми заміщення рисунка 3.6, б можна записати диференціальне рівняння [64] (3.1)

$$E = R \cdot I + L \frac{d\psi}{dt} = R_t \cdot I + W \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.1)$$

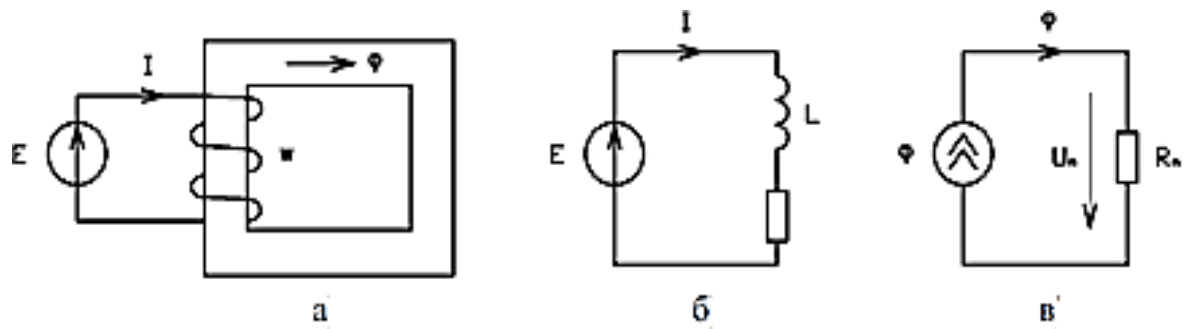


Рисунок 3.6 — Найпростіше магнітне коло та її схеми заміщення [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72]

На підставі електричної схеми заміщення рисунку 3.6, б і рівняння (3.1) може бути визначено значення потоку Φ , що протікає в магнітному колі:

$$\Phi = \frac{1}{W} \cdot \int (E - R \cdot I) di, \quad (3.2)$$

Для схеми заміщення магнітного кола (рисунок 3.6, в), яка складається з однієї ділянки феромагнітного матеріалу, де магнітний потік утворюється декількома обмотками з числами витків W і струмом I розраховується як [29]:

$$U_m = I \cdot W = \Phi \cdot R_m, \quad (3.3)$$

де U_m — магнітна напруга;

Φ — потік, що протікає магнітною системою;

R_m — магнітний опір феромагнітного матеріалу.

Основний сенс моделювання магнітопов'язаних кіл в середовищі Simulink зводиться до створення моделей електричного та магнітного кіл, які пов'язані один з одним за допомогою джерела потоку Φ . На рисунку 3.7 представлена структурна схема розрахунку електричного та магнітного кола за допомогою джерела потоку.

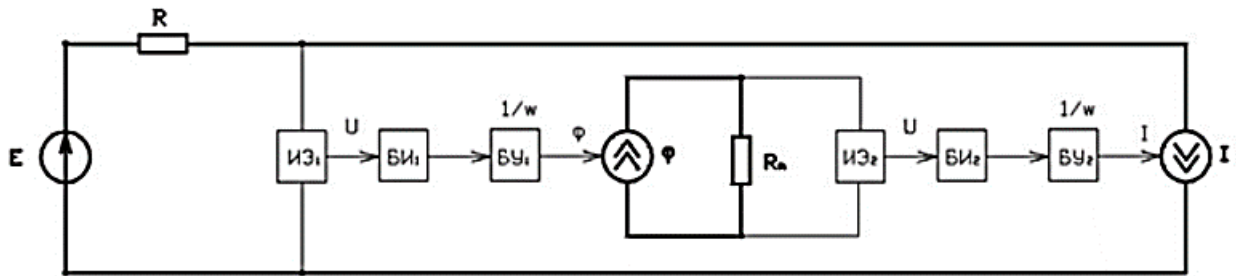


Рисунок 3.7 — Структурна схема розрахунку електричного та магнітного кола за допомогою джерела потоку [72]

В електричній частині схеми розрахунку електромагнітних процесів (рисунок 3.7) за допомогою вимірювального елемента $ИЭ_1$ відбувається вимір напруги та індуктивності, які інтегруються в блоці інтегрування $БИ_1$, отримане значення потокозчеплення ділиться на число витків W в блоці посилення $БУ_1$. Далі відбувається перехід до розрахунку процесів в магнітному колі для чого сигнал, сформований на виході $БУ_1$ за допомогою керованого джерела струму, формує магнітний потік, що протікає в магнітному колі R_m . Падіння магнітної напруги на елементі R_m , викликане протіканням потоку Φ в магнітному колі, вимірюється за допомогою вимірювального елемента $ИЭ_2$, інтегрується в блоці $БИ_2$ та поділяється на кількість витків W . Через це виконується зворотній перехід від розрахунку магнітного кола до електричного. Отриманий сигнал на виході $БУ_2$ подається на кероване джерело струму, що забезпечує протікання струму I в котушці індуктивності [2, 3, 7, 18, 19, 29, 59, 72].

На рисунку 3.8 представлена структура моделі електротехнічного блока зв'язку електричного та магнітного кіл шляхом використання джерела потоку в середовищі Simulink.

Варто зазначити наявність в моделі додаткових елементів, таких як співспротиву $R1$ і фільтра з малою сталою часу 10^{-8} . Необхідність в схемі $R1$ обумовлена тим, що при створенні моделей магнітопов'язаних ланцюгів з декількома обмотками, джерела струму, які в даному випадку моделюють магнітний потік, виявляються включеними послідовно, що неприпустимо. Таким чином, ввівши в схему опір $R1$, значення якого в 1000 разів більше магнітного

опору R_m , дозволить з'єднати послідовно необхідну кількість джерел струму (поток).

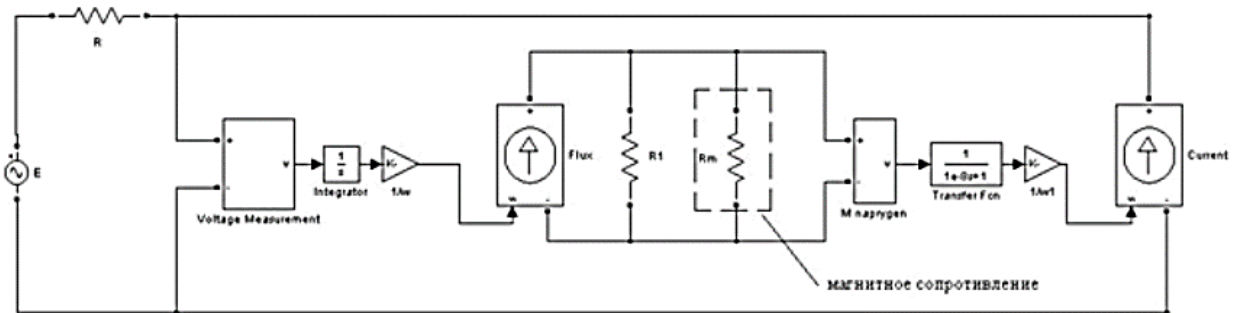


Рисунок 3.8 — Структура моделі розрахунку електричного та магнітного ланцюга за допомогою джерела потоку в середовищі Simulink [29, 72]

До недоліків моделі можна віднести наявність замкненого алгебраїчного контуру, який створюється джерелом струму і блоком вимірювання магнітної напруги. Алгебраїчні контури розраховуються в Simulink за допомогою ітераційної процедури на кожному кроці розрахунку, що уповільнює загальний час розрахунку. Для виключення алгебраїчного контуру запропоновано в схему ввести фільтр з малою сталою часу. Її значення має бути таким, щоб наявність фільтра не приводило до зміни динамічних властивостей моделі.

Залежно від поставленого завдання, а також від схеми магнітної системи досліджуваного пристрою, опір R_m може представляти собою як еквівалентний валентний опір ділянки магнітного кола, так і ділянки повітряного зазору, які в більшості випадків задаються геометричними розмірами - площею поперечного перерізу S і довжиною ділянки L . Варто зазначити, що підхід до визначення еквівалентних опорів R_m для магнітного і немагнітного (повітряний зазор) ділянок відрізняються. Даний факт обумовлений тим, що характеристика феромагнітного матеріалу носить нелінійний характер і залежить від кривої намагнічування стали $B(H)$, в той час як опір повітряного ділянки лінійно.

Відомо [29, 72], що для визначення магнітного опору повітряного проміжку можна скористатися наступним виразом:

$$R_m = \frac{L_B}{\mu_0 \cdot S_B},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнітна проникність повітря.

Тоді для схеми заміщення магнітного кола (рисунок 3.6, в) справедливе рівняння (3.4) відповідно до якого може бути знайдено падіння напруги U_m на магнітному опорі R_m .

$$U_m = \Phi \cdot R_m = \Phi \cdot \frac{L_B}{\mu_0 \cdot S_B}. \quad (3.4)$$

На рисунку 3.9 наведена структурна схема лінійного магнітної ділянки (повітряного проміжку), котра реалізує закон Ома для магнітного кола. У представленій схемі реалізований механізм визначення падіння магнітної напруги на еквівалентному лінійному магнітному опорі, що характеризує повітряний зазор, для чого за допомогою вимірювального елемента ІЕ відбувається вимір значення магнітного потоку з послідовним перетворенням отриманого сигналу Φ в блоках посилення БУ₁, БУ₂, БУ₃ в магнітна напруга U_m відповідно с рівнянням (3.4).

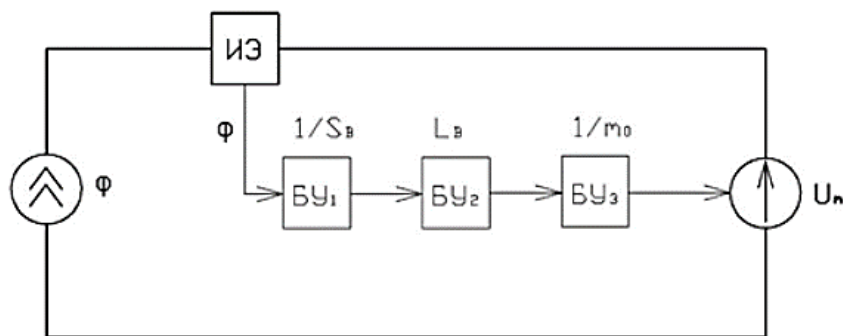


Рисунок 3.9 — Структурна схема лінійного магнітної ділянки [72]

Аналогічно може бути створена модель нелінійної ділянки магнітного кола. Як було зазначено раніше, основною відмінністю моделей лінійного та нелінійного кола є необхідність урахування кривої намагнічування сталі, яка характеризується залежністю $B(H)$. З урахуванням цього фактору, залежність для визначення падіння магнітної напруги на нелінійному опорі R_m може бути записано таким чином:

$$U_m = \Phi R_m = H(B) \cdot L_C = H \left(\left(\frac{\Phi}{S_c} \right)_T \right) \cdot L_C, \quad (3.5)$$

Для визначення напруги U_m , наведеної на рисунку 3.10 криву намагнічування сталі 3408, представлену залежністю $B = f(H)$, необхідно перетворити в $H = f(B)$ (рисунок 3.11).

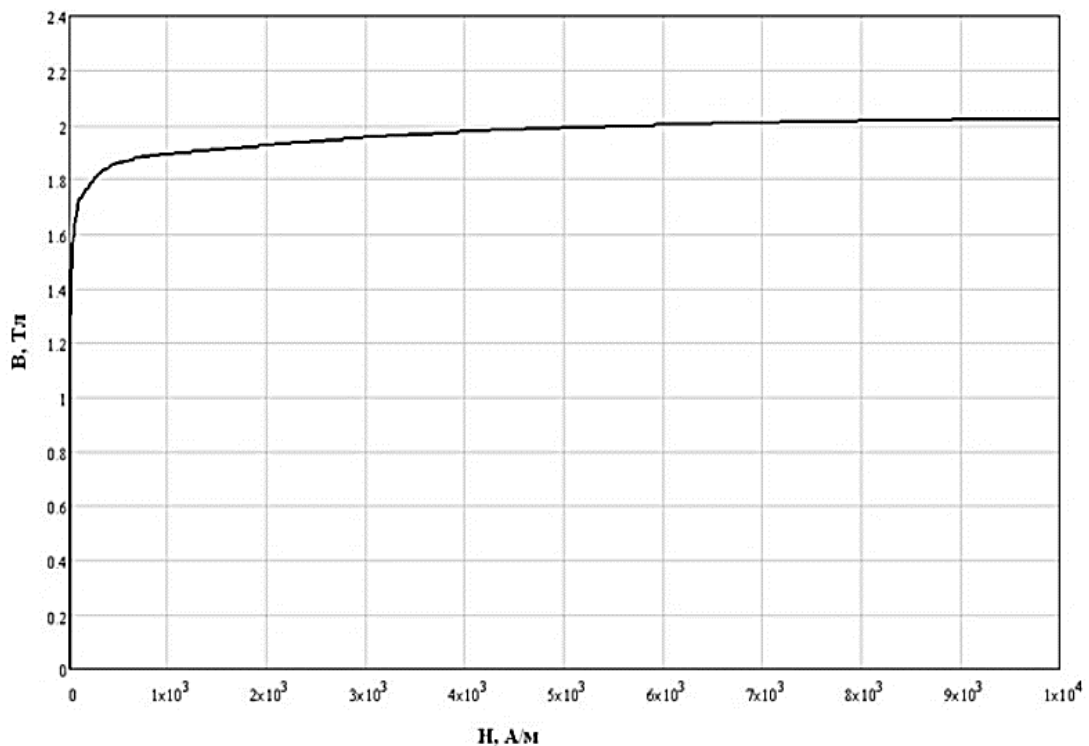


Рисунок 3.10 — Крива намагнічування сталі 3408 [29]

За аналогією з описаним вище механізмом визначення магнітної напруги на еквівалентному лінійному магнітному опорі, U_m на нелінійному R_m може бути знайдено шляхом вимірювання значення магнітного потоку в вимірювальному

елементі ІЕ з подальшим перетворенням отриманого сигналу Φ в індукцію B у блоці посилення БУ₁. Далі сигнал, який характеризує B , подається в блок вибору значення БВЗ, в якому відбувається вибір значення напруженості магнітного поля H відповідно до кривої $H(B)$, зображеної на рисунку 3.11, з подальшим її перетворенням в U_m в блоці посилення БУ₂, де значення H помножується на довжину магнітної ділянки $L_{ст}$.

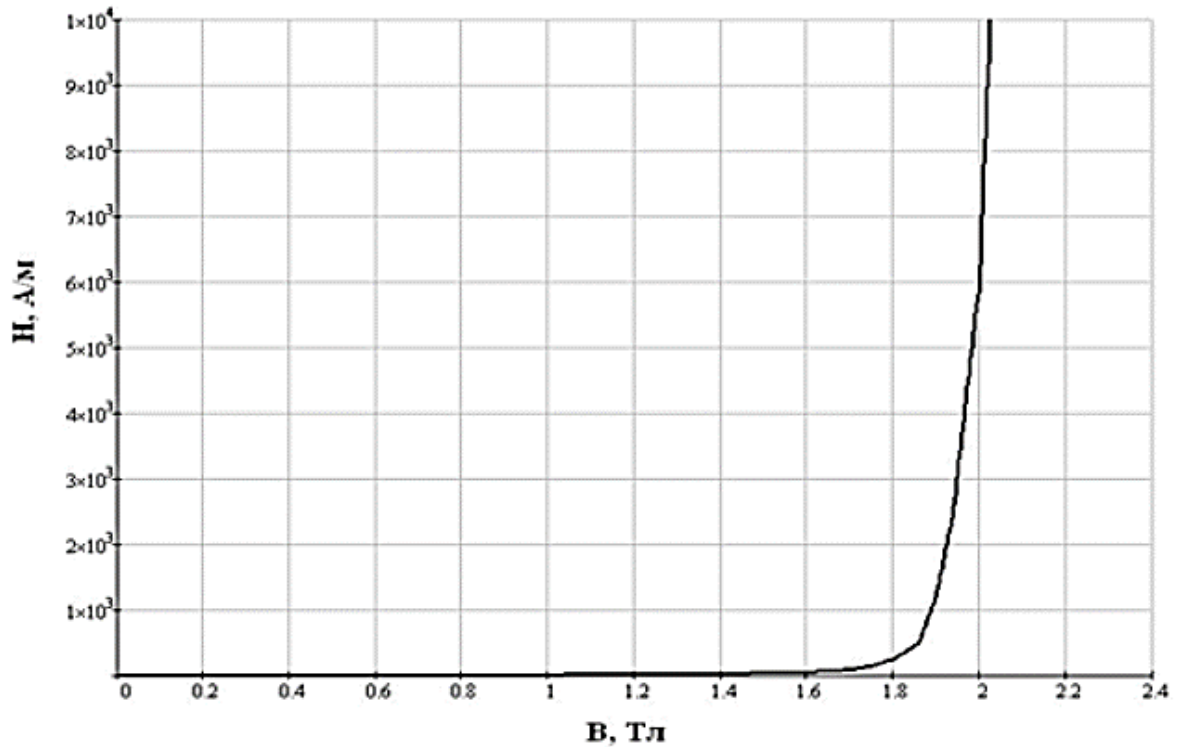


Рисунок 3.11 — Характеристика $H = f(B)$ сталі 3408 [29]

З огляду на вищезазначене, структурна схема нелінійної магнітної ділянки (феромагнітного матеріалу) представлена відповідно на рисунку 3.12.

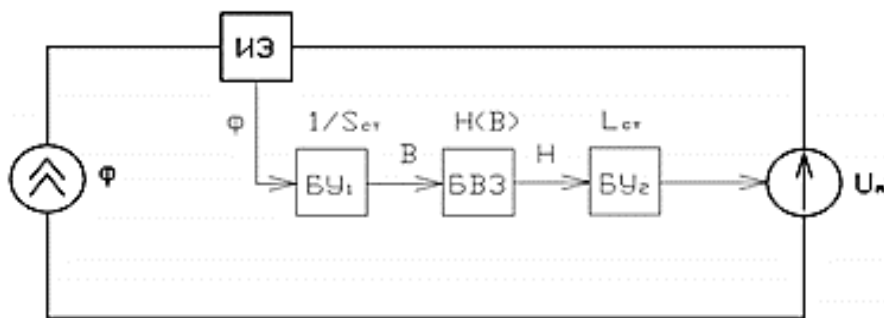


Рисунок 3.12 — Структурна схема нелінійної магнітної ділянки [29]

Значення U_m , отримане на виході БУ₂, подається на кероване джерело напруги, яке формує значення падіння напруги в магнітному колі на нелінійному опорі R_m .

Блок БВЗ містить інформацію про криву $H(B)$, яка задається у вигляді вектору вхідних значень відповідного значення вектору B та вектору H .

Правила, за якими працює блок, описуються наступним чином:

— якщо вхідне значення B дорівнює одному з елементів вектору вихідних значень H , то вихідне значення блоку дорівнюватиме відповідно елементу вектору H ;

— якщо вхідне значення B не збігається з жодним з елементів вектору вхідних значень, то блок виконує лінійну інтерполяцію між двома найближчими до нього елементами;

— якщо вхідне значення B виходить за межі вектору вхідних значень, то блок виконує лінійну екстраполяцію по двох крайніх елементах.

На рисунках 3.13 та 3.14 наведені розрахункові моделі блоків лінійного та нелінійного блоків магнітних опорів відповідно.

Використовуючи блоки лінійних і нелінійних магнітних опираючись-ний (рисунки 3.13 та 3.14), блок спільного розрахунку електричного та магнітного кола (рисунок 3.8), а також з огляду на схеми з'єднання обмоток і магнітної системи, можуть бути розроблені будь-які моделі електротехнічних пристроїв (трансформатор, реактор, керований реактор і інші).

Розроблена імітаційна модель (ІМ) фази КШР 63000/110 показана на рисунку 3.15, де позначені нелінійні магнітні опори стрижнів та ярем (R_1 — R_4), лінійні опори каналів розсіювання магнітного потоку:

— між секціями КО і стрижнем — R_{s1} - R_{s2} ;

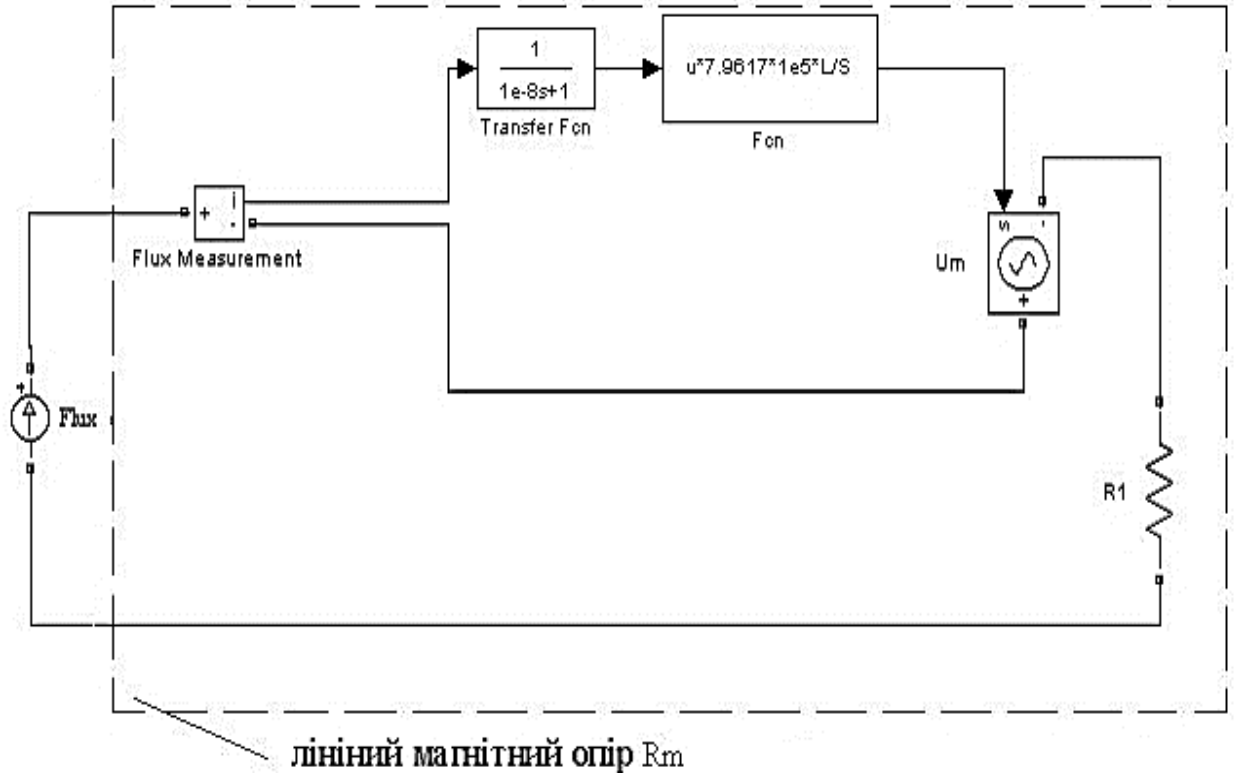


Рисунок 3.13 — Модель лінійного магнітного опору R_m в середовищі Simulink

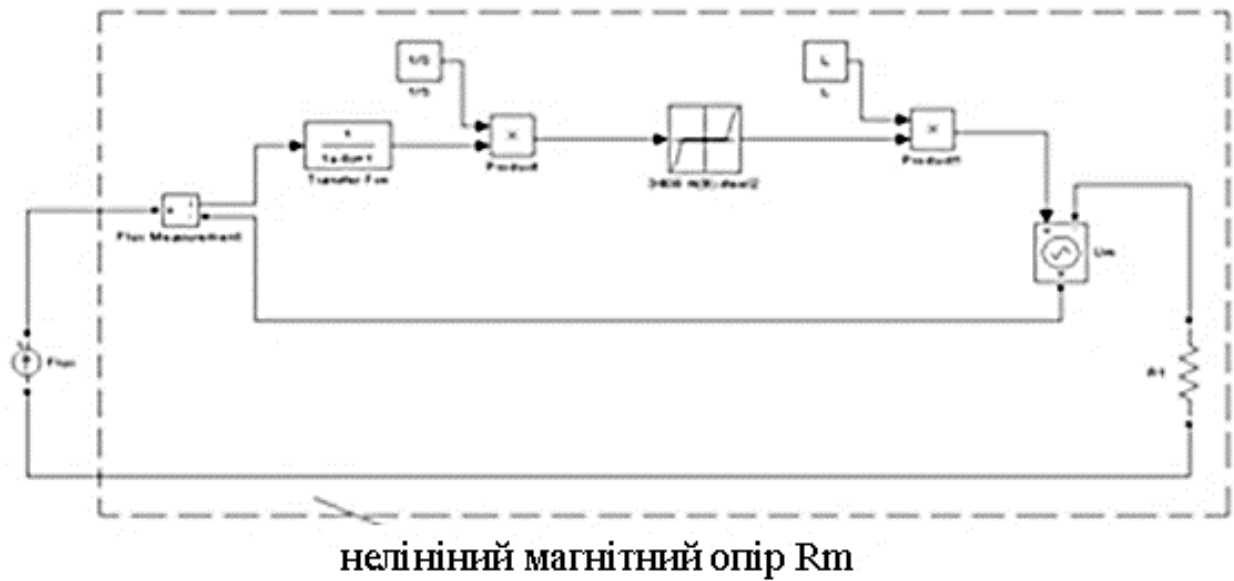


Рисунок 3.14 — Модель нелінійного магнітного опору R_m в середовищі Simulink [72]

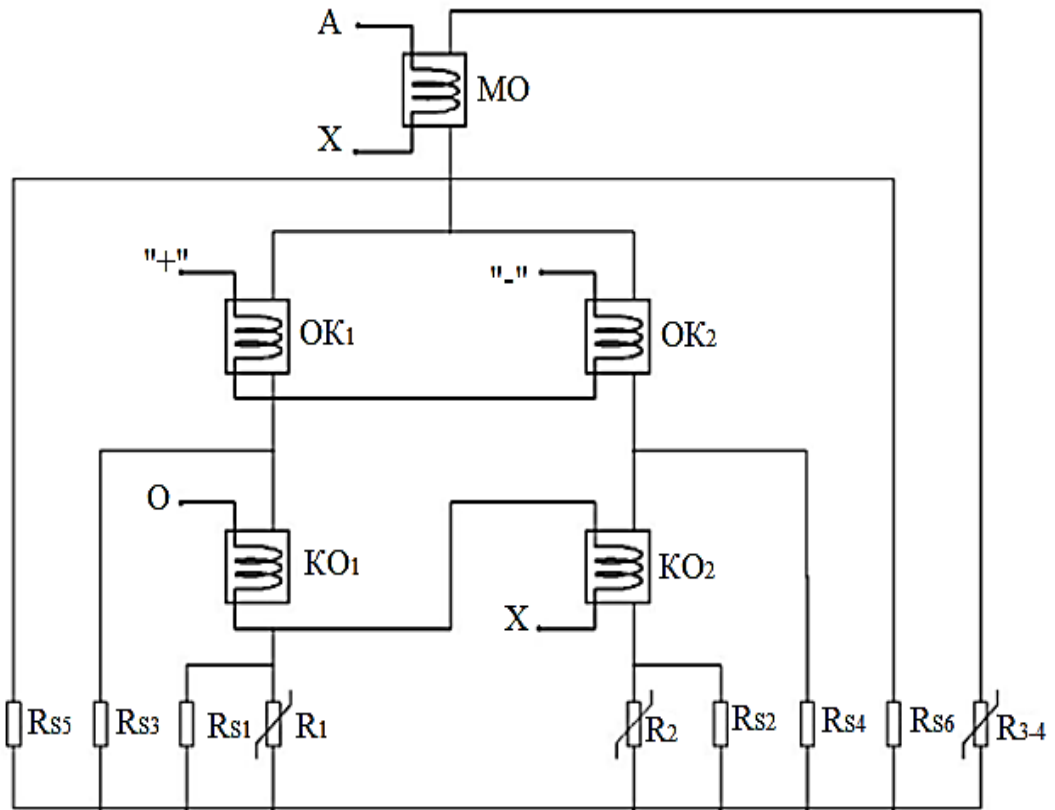


Рисунок 3.15 — Імітаційна модель фази КШР 63000/110

- між секціями обмоткою КО і ОК — R_{S3} - R_{S4} ;
- між обмоткою МО і ОК — R_{S5} - R_{S6} .

На рисунку 3.16 показана програмна реалізація імітаційної моделі фази КШР в середовищі Simulink.

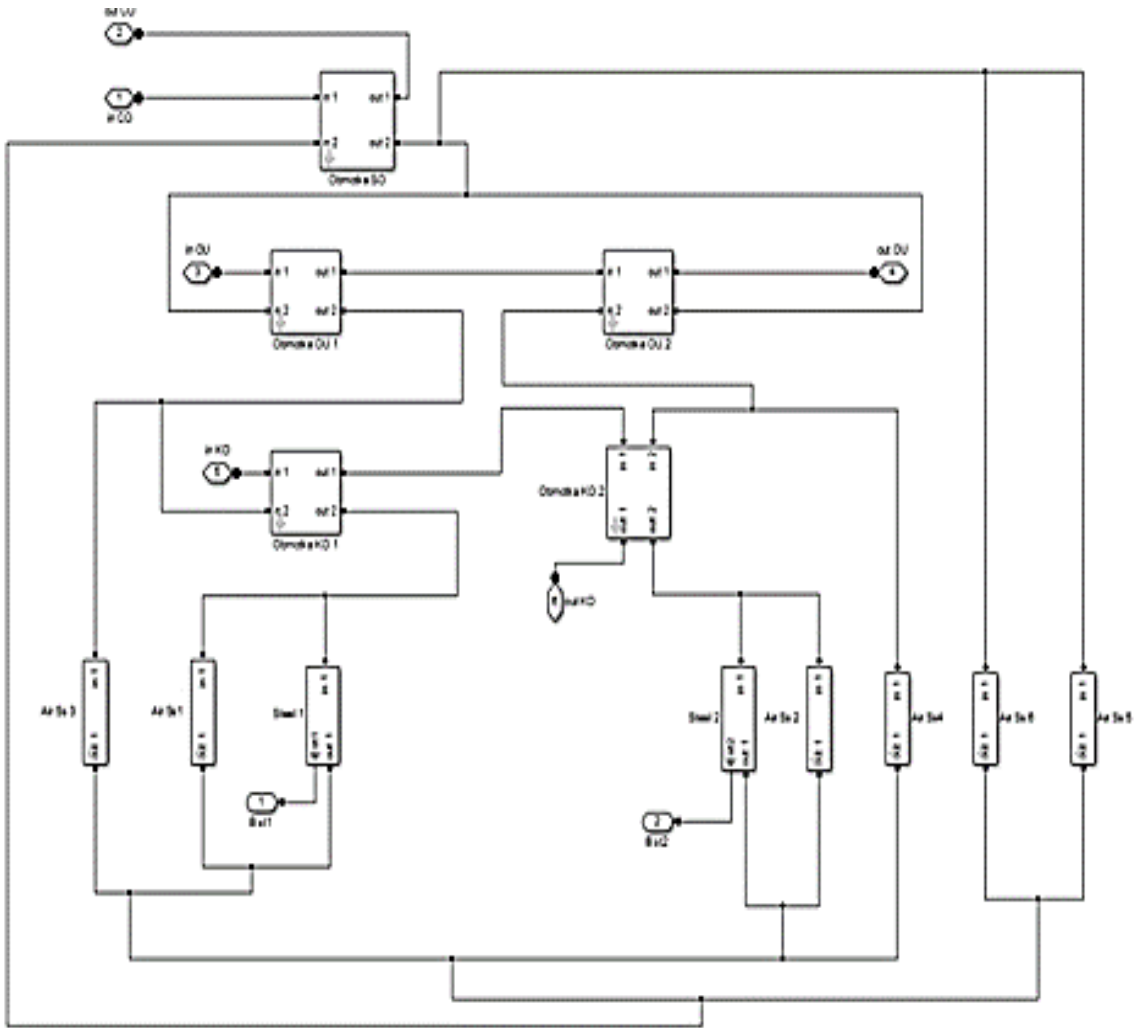


Рисунок 3.16 — Модель фази КШР 63000/110 в середовищі Simulink (Matlab)

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розроблено шунтувальний реактор має параметри, що задовольняють заданим технічним умовам: номінальна напруга 110 кВ, номінальна реактивна потужність 63 МВАр. Реактор призначений для тривалої роботи при стаціонарній установці на відкритому повітрі на висоті не більше ніж 1000 м над рівнем моря. Область застосування – компенсація реактивних потужностей у високовольтних лініях електропередавання.

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.

Визначено габаритні розміри складальних одиниць і всього пристрою в цілому, основні технічні характеристики і відповідності їх стандартам.

Визначено геометричні розміри всіх обмоток ПКРП, а також геометричні розміри магнітопроводу, що відповідають технічним завданням.

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;
- втрати короткого замикання зменшилися та становили 76037 кВт.

Розроблено комп'ютерну модель керованого 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 КШР.

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

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

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. 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/feem/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 дані (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 газогарячих 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 ШАЛОМЄСВ (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](http://www.ztr.ua/ru/photo?g_id=3) www.ztr.ua/ru/shuntiruushie-reaktori
30. [Шунтувальний реактор ЗТР, Запоріжтрансформатор \(ztr.ua\)](http://www.ztr.ua/ru/photo?g_id=3)
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-raspredelitelnye>
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/feeem/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%20обеспечивающих,передачи%20и%20распределения%20электрической%20энергии.>
65. <https://relayexport.com/products/HighVoltageGearEquipment/>
66. <https://zprua.com/product/tiristornye-kompensatory-reaktivnoj-moshchnosti-serii-tkrm-novogo-pokoleniya/>
67. https://uk.wikipedia.org/wiki/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>