

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**Іщук Олександр Валентинович**

УДК 621.359.4

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Обґрунтування можливості використання шунтуючого реактора з  
регульованою потужністю для покращення збалансованості енергосистеми  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Іщук О. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,  
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

## АНОТАЦІЯ

Іщук О. В. Обґрунтування можливості використання шунтуючого реактора з регульованою потужністю для покращення збалансованості енергосистеми. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Робота присвячена дослідженню впливу спільного застосування керованих пристроїв подовжньої компенсації і шунтуючих реакторів на режими і стійкість роботи електричних мереж в порівнянні з нерегульованою передачею електроенергії.

У роботі розглянуті принцип дії та особливості побудови шунтуючих реакторів та їх вплив на покращення роботи енергосистеми за рахунок регулювання реактивної потужності.

**Ключові слова:** повітряна лінія, шунтуючий реактор, пристрій подовжньої компенсації реактивної потужності.

## SUMMARY

Ishchuk O. V. Justification of the possibility of using a shunting reactor with an adjustable power to improve the balance of the power system. Qualifying work for the master's degree in specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The work is devoted to the investigation of the effect of the joint use of controlled devices of longitudinal compensation and shunt reactors on the regimes and the stability of the operation of electric networks in comparison with unregulated transmission of electricity.

The paper examines the principle of action and features of construction of shunt reactors and their influence on improving the energy system by regulating reactive power.

**Keywords:** air line, shunt reactor, device of longitudinal compensation of reactive power.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПОКРАЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА РАХУНОК РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ШУНТУЮЧИХ РЕАКТОРІВ	7
1.1. Принципи дії керованих шунтуючих реакторів	7
1.2. Конструкційні особливості роботи КШР для електричних мереж 35 – 110 кВ та 220 кВ	11
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КШР	18
2.1. Моделювання схеми заміщення фази КШР	19
2.2. Розробка моделі КШР в середовищі Simulink	21
Висновки по розділу 2	30
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КШР НА ПРОЦЕСИ ЯКІ ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ	31
3.1. Вплив КШР на величину переданої потужності та напругу в електричній мережі	32
3.2. Дослідження впливу КШР на процеси, що протікають в циклі однофазного автоматичного повторного включення лінії	35
Висновки по розділу 3	40
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

## ВСТУП

В даний час в електроенергетиці багатьох держав надається велика увага створенню керованих або гнучких ліній електро передач, які в свою чергу входять в склад так званих «інтелектуальних» (Smart Grid) мереж з пристроями FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [1]. Для оптимального ведення режимів таких енергосистем необхідне використання високоефективних засобів регулювання потоків активної і реактивної потужності.

Управління режимами по напрузі і реактивної потужності можна виконувати застосуванням як традиційних пристроїв, до яких відносяться генератори, синхронні і статичні компенсатори, комутовані реактори і конденсаторні батареї, так і за рахунок нових пристроїв, до яких відносяться керовані шунтуючі реактори (КШР) [2]. 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 стабільну напругу, оптимальні перетоки реактивної потужності, підвищення пропускної спроможності електропередачі електроенергії, зменшення втрат, кількості комутацій вимикачів і спрацювань РПН трансформаторів [3]. Поєднання КШР з паралельно встановленою батареєю статичних конденсаторів (БСК) дозволяє забезпечити не тільки плавно регулюючу компенсацію (споживання) реактивної потужності, але і її видачу відповідно до потужності БСК при розвантаженні КШР до режиму холостого ходу.

Застосування пристроїв поздовжньої компенсації (ППК) при всіх своїх перевагах по збільшенню кількості переданої потужності і стійкості системи [1, 2] має суттєвий недолік у вигляді великого перепаду напруги на виводах ППК, що в ряді режимів роботи енергосистеми призводить до неприпустимих перенапруг.

Для вирішення даної проблеми на виводах ППК встановлюють шунтуючі реактори. Однак їх включення в основному негативно позначається на стійкість, в порівнянні з режимами роботи при їх відсутності. Тому **метою даної роботи** є необхідність дослідити, як впливає спільне застосування керованих ППК і шунтуючих реакторів (ШР) на режими і стійкість роботи електричних мереж, порівняно з нерегульованою передачею, по скільки включення подібних пристроїв в роботу перерозподіляє потоки реактивної потужності по мережі, що позначається на режимах і стійкості системи в цілому.

**Об'єктом дослідження** відповідно являється керовані шунтуючі реактори, особливості їх роботи та конструктивне виконання.

В роботі використовувались **методи досліджень**: аналіз роботи та конструктивні особливості, розробка імітаційної моделі та метод первинного наближення А. М. Ляпунова.

Гончаренко Ю.П., Буяльський В. П., Іщук О. В. ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ САМОКОМПЕСУЮЧИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

V МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 2. С.96-102 . «Біоенергетичні системи». 27-28 травня 2021 Житомир, Україна.

Гончаренко Ю.П., Іщук О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КЕРОВАНИХ ШР НА ПРОЦЕСИ ЯКІ ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

V МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 3. С.89-93 . «Біоенергетичні системи». 27-28 травня 2021 Житомир, Україна.

Іщук О.В КОНСТРУКЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КЕРОВАНИХ ШУНТУЮЧИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 35-110 КВ ТА 220 КВ

Студентські читання – 2021: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2021». 26 жовтня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021.- 400 с.

## РОЗДІЛ 1

### ПОКРАЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА РАХУНОК РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ШУНТУЮЧИХ РЕАКТОРІВ

Зосереджені керовані пристрої поздовжньої компенсації дозволяють підвищити межу переданої потужності і стійкість мережі в цілому, однак результати досліджень таких вчених, як В. А. Віниківа, В.А. Строева, Ю.Г. Шакар'яна, В.К. Фокіна, свідчать про те, що застосування даних пристроїв може призводити до неприпустимих перенапруг на їх виводах і коливальним порушенням динамічної стійкості енергосистеми. Для стабілізації рівнів напруги встановлюються шунтуючі реактори без можливості регулювання, що негативно позначається на межах переданої потужності. Таким чином, необхідно оцінити ефективність застосування шунтуючих реакторів як в дискретному, так і в керованому виконанні для стабілізації рівнів напруги, та їх вплив на стійкість системи.

#### 1.1 Принципи дії керованих шунтуючих реакторів

Основним призначенням керованих шунтуючих реакторів є регулювання напруги і реактивної потужності. Для плавного регулювання споживаної реактивної потужності напруги в точці підключення, у КШР з підмагнічуванням використовується насичення сталі магнітопроводу постійним потоком, який створюється випрямленим струмом у спеціальній обмотці управління. 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 в режимах від ненасиченого стану до глибокого насичення, близького до граничного, коли магнітна проникність наближається до магнітної проникності повітря, дозволяє одержати діапазон плавного регулювання реактивної потужності з кратністю більше 100.

З великого числа пропонованих раніше схемотехнічних рішень конструkcій підмагнічуючих реакторів - з поздовжнім, поперечним, кільцевим підмагнічуванням, з обертовим магнітним полем і т.п., - 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 ОУ, розташованих на одному магнітопроводі, необхідно щоб виконувались 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 рис.1.1,а наведена схема однієї фази керованого реактора з бронестрижневим магнітопроводом і двома напівстрижнями, на яких розташовані секції мережевої обмотки і обмотки управління, до якої в свою чергу підключене джерело постійного або випрямленої напруги для підмагнічування. Постійний потік підмагнічування, створюваний струмом ОУ, замикається між центральними напівстрижнями, а змінний потік - через верхнє і бокове ярма магнітопроводу, складаючись в напівстрижнях з постійним.

На рис.1.1,б на розрахункових осцилограмах для реактора 220 кВ потужністю 180 МВА показаний струм мережевої обмотки в залежності від струму обмотки управління при наборі потужності від мінімальної (холостий хід) до номінальної, якій відповідають значення струмів 200 А в МО і 1,9 кА в ОУ. Залежність між струмами практично лінійна



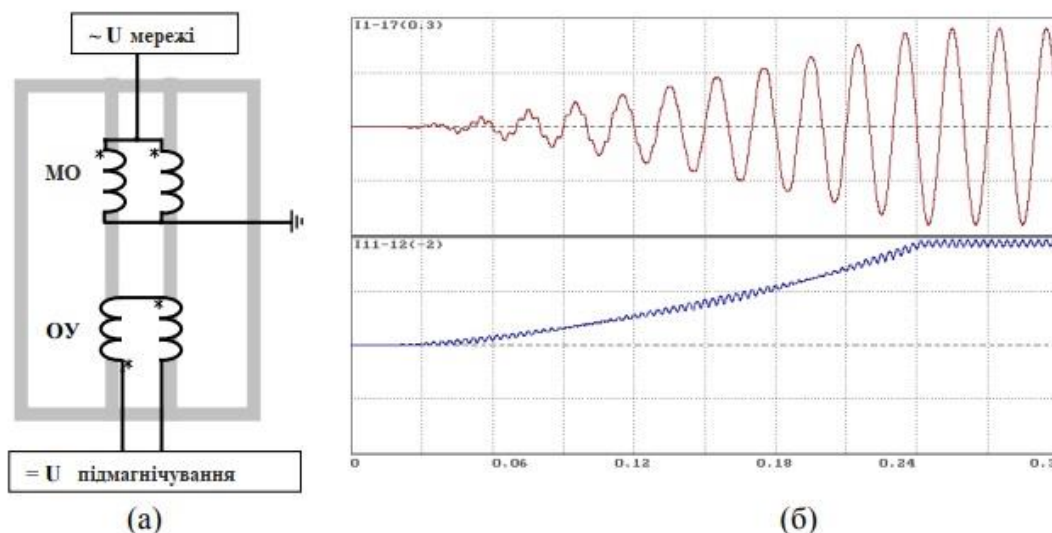


Рисунок 1.1. Електромагнітна схема фази КШР (а) і розрахункова осцилограма набору потужності для КШР потужністю 180 МВА 220 кВ (б)

В області мінімальних навантажень в струмі МО реактора спостерігаються спотворення викликані 5-ю і 7-ю 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%).

Слід зазначити, що така форма струму МО КШР забезпечується тільки за умови повної компенсації в споживаному струмі найбільш потужної третьої 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 використовуваних конструкціях КШР додаванням окремої додаткової компенсаційної обмотки (КО) для трьох обмоткових реакторів, або спеціальними схемами з'єднань вторинної обмотки управління, наприклад, в подвійний розімкнутий трикутник для двообмоткових реакторів напругою 35 ... 110 кВ.

На рис. 1.2, а наведено режим набору потужності КШР 220 кВ зі струмом в трикутнику КО на верхній осцилограмі. На відміну від силових

трансформаторів, струм навантаження першої гармоніки у вторинній обмотці реактора відсутня. Переважаюча в трикутнику КО третя гармоніка має максимум (близько 1кА діючого значення) в області 50% навантаження КШР, в режимі номінального навантаження при синусоїдальній напрузі живлення, як і інші вищі гармоніки в струмі МО. Це пояснюється тим, що реактори серії РТУ проектується з номінальною потужністю в так званому напів межовому режимі насичення, коли постійний потік номінального підмагнічування по черзі в кожному напівстрижні магнітопроводу витісняє змінний потік рівно на час половини періоду частоти мережі (рис. 1.2 , б). В наслідок комбінації послідовності в часі напівперіодів синусоїдального струму, викликаних почерговим насиченням напівстрижнів, споживаний струм КШР в номінальному режимі також не містить вищих гармонік.

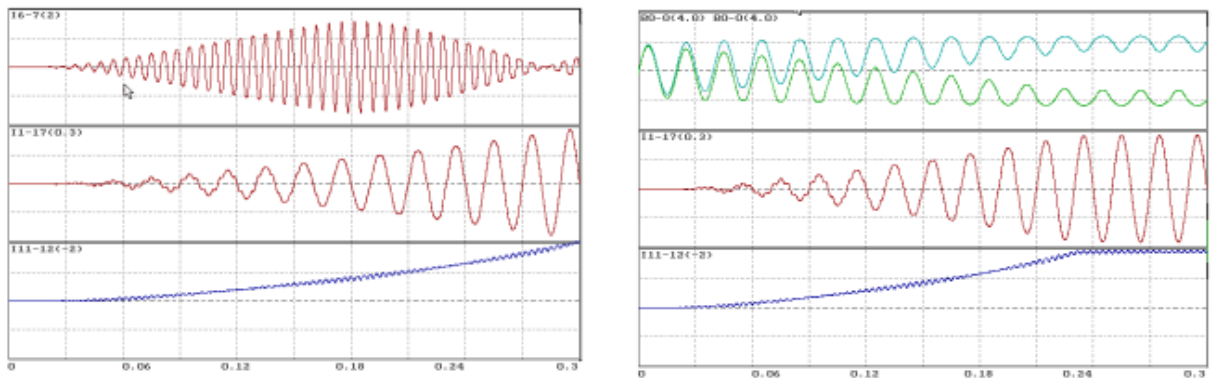


Рисунок 1.2 . Зміна струму в КО (а) і зміна індукції в напівстрижнях магнітопроводу (б) реактора при наборі потужності КШР

При подальшому наборі потужності в область перевантаження (і граничного насичення магнітопроводу) в струмі КО знову з'являється третя, а в МО – інші вищі гармоніки. Осцилограми з сумарними індукціями в напівстрижнях магнітопроводу наведені на рис.1.2 б, з якого видно, що в номінальному напів межовому режимі навантаження час знаходження індукції кожного напівстрижня за перегином характеристики насичення стали (близько 2 Тл) становить рівно половину періоду промислової частоти мережі.

З'єднання компенсаційної обмотки в трикутник, що, як було позначено раніше, необхідно з точки зору компенсації гармонік кратних трьом, в випадку установки КШР в лінію призводить до підживлення струму дуги в разі однофазного короткого замикання (КЗ) на лінії. Дана обставина істотно позначається на виборі варіанти, що забезпечує успішну реалізацію циклу однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) ПЛ з урахуванням керованого реактора. З відомою дослідження, присвячені участі шунтуючих реакторів в циклі

## 1.2 Конструкційні особливості роботи КШР для електричних мереж 35 – 110 кВ та 220 кВ

На рис. 1.3 показана магнітна система трифазного КШР, а на рис.1.4 приведена електромагнітна схема трифазних триобмоткових КШР серії РТУ напругою 220 кВ і вище. Стрижні всіх фаз магнітопроводу розділені на два напівстрижня, на кожному з яких розміщуються секції компенсаційної обмотки, з'єднаної в трикутник. Зверху секцій КО розташовуються секції обмотки управління, включені в кожній фазі послідовно-зустрічно до обмотки МО і КО (початку секцій обмоток відзначені зірочкою). Виводи всіх фаз ОУ з'єднуються паралельно і підключаються до виводів перетворювачів ТМП.



Рисунок 1.3. Магнітна система трифазного КШР підмагнічуванням

Кожна фаза мережевої обмотки виконується паралельними гілками з введенням в середину і намотується поверх вторинних обмоток з охопленням обох напівстрижнів. Мережева обмотка з'єднується в схему «зірка з заземленою нейтраллю», підключається до шин підстанції або до лінії і забезпечує споживання реактивної потужності відповідно до заданого закону регулювання.

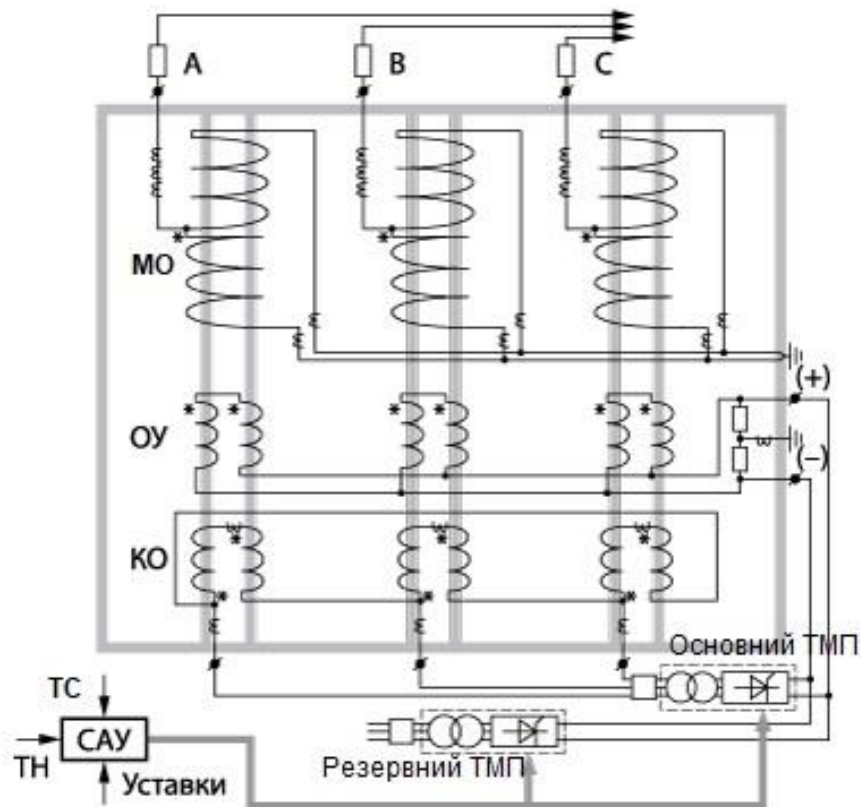


Рисунок 1.4. Електромагнітна схема трифазного триобмоткового КШР. САУ – система автоматичного управління; ТМП – трансформатор з перетворювачем; МО – мережева обмотка, ОУ – обмотка управління, КО – компенсаційна обмотка, ТН – трансформатор струму, ТН – трансформатор напруги.

Поперечний розріз магнітної системи КШР напруги 220кВ та 500 кВ показаний на рис.1.5.

Компенсаційна обмотка з номінальною напругою 10 кВ, яка з'єднана в трикутник, виконує дві основні функції - виключення з споживаного

мережевого струму гармонік, кратних трьом, і живлення основного трансформатора з перетворювачем, що забезпечує необхідний рівень підмагнічування магнітопроводу через ОУ. Оскільки встановлена потужність ТМП становить близько 1МВА (номінальний первинний струм менше 60 А), а споживана в усталеному номінальному режимі не перевищує 300 кВА, компенсаційна обмотка розраховується на тривалий перебіг максимального струму третьої гармоніки і виконується зменшеного перетину (якщо на КО не передбачається інше додаткове навантаження, наприклад, при можливому підключенні конденсаторної батареї).

Завдяки зустрічному включенню своїх секцій обмотка управління має еквіпотенціальні виводи (+) і (-), на яких в нормальних сталих і перехідних режимах відсутня змінна напруга від обмоток МО або КО.

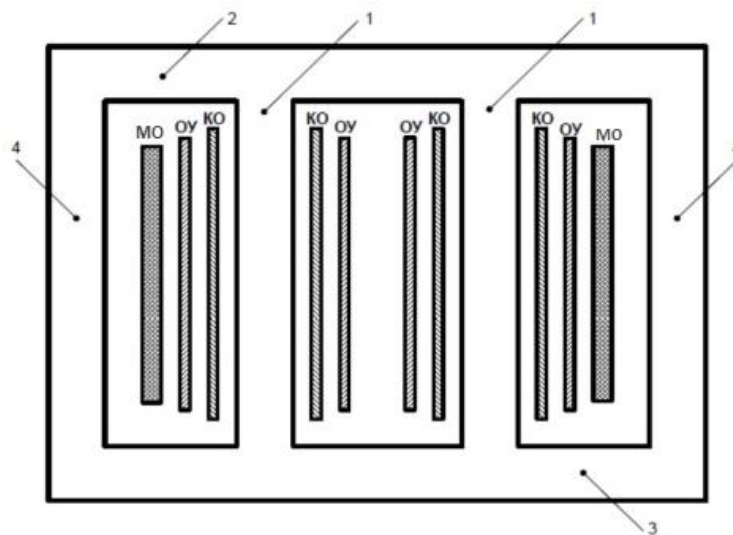


Рисунок 1.5. Розріз магнітної системи однієї фази КШР 220 кВ:  
1 – напівстрижні; 2 – верхнє ядро; 3 – нижнє ядро; 4 – бокове ядро.

При закритих тиристорах основного або резервного ТМП випрямлена напруга на цих висновках ОУ також відсутня, відповідно відсутній і струм підмагнічування в ОУ, тому магнітна система знаходиться в ненасиченому стані, а КШР - в режимі холостого ходу, як звичайний трансформатор.

У міру відкриття тиристорів і зростання випрямленої напруги наростає струм підмагнічування в секціях обмотки управління, в результаті чого

відбувається насичення стрижнів магнітопроводу і зростання споживаного струму реактора. Тиристри основного ТМП (а при його профілактиці або несправності - резервного) управляються від цифрової системи автоматичного управління (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.

Реактори напругою 500 кВ і вище відрізняються від реакторів 220 кВ по суті тільки кількістю ТМП (розміщений форсуєчий перетворювач динамічних режимів для забезпечення при необхідності прискореного набору і скидання потужності за час не більше 0,3 сек.) і можливістю однофазного виконання електромагнітної частини. В останньому випадку зменшуються транспортні габарити і є можливість замовлення резервної фази. Однак загальна площа, яку займає на підстанції чотирма фазами типу РОДУ-60000/500, як і їх вартість, суттєво вище, ніж для електромагнітної частини реактора 500 кВ трифазного виконання типу РТДУ-180000/500.

Для зниження потоків розсіювання і втрат бронестрижева магнітна система реактора містить додаткові приставні ярма з двох сторін по периметру магнітної системи, які при насиченні стрижнів збирають вихідний з них змінний магнітний потік і перенаправляють його в ярма. У початкових конструкціях для цього використовувалися верхні і нижні додаткові пресуючі магнітні кільця для обмоток кожної фази реактора.

Аналогічні кільцеві магнітні шунти застосовують і в конструкції електромагнітної частини УШРТ, оскільки в міру закорочення тиристорами його вторинної обмотки магнітний потік також витісняється зі стрижнів в простір між обмотками [5].

Для КШР 35-110 кВ в якості основного конструктивного виконання був обраний варіант з двома обмотками - мережевою і обмоткою управління (рис. 1.6) серії РТУ-25000/110-УХЛ1.

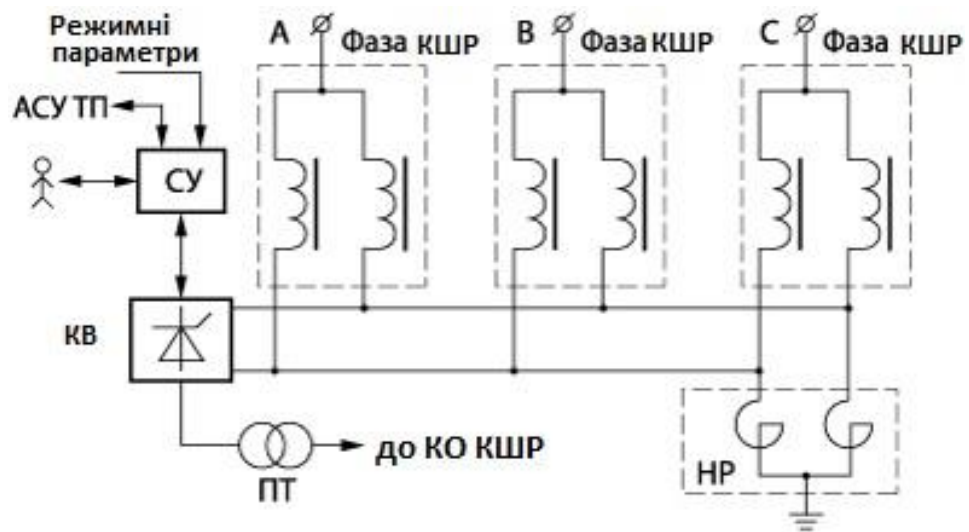


Рисунок 1.6. Схема двобмоткового керованого реактора 110 кВ:  
 КВ – керований випрямляч; СУ – система управління; НР – нейтральний реактор; ПТ – претворювальний трансформатор; КО – компенсаційна обмотка (на рисунку не показана)

Конструкція електромагнітної частини КШР (рис.1.7) 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

Обмотка управління такого КШР також складна: схема з'єднань ОУ представляє собою «подвійний розімкнутий трикутник» і поєднує в собі декілька функцій:

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

- забезпечує компенсацію гармонік кратних трьом за рахунок з'єднання обмоток управління в трикутник;
- забезпечує живлення трансформаторно-перетворювальних блоків безпосередньо від обмотки управління за рахунок їх підключення до виводів змінної напруги ОУ;
- забезпечує поєднання в одній вторинній обмотці функцій компенсаційної обмотки і обмотки управління, що дозволяє не тільки зменшити число обмоток, а й знизити витрату активних матеріалів.

Однолінійні КШРТ також мають різні модифікації по виконанню електромагнітної частини і тиристорної групи [4]. Перші з них виконувалися трьохобмотковими, при цьому компенсаційна обмотка також з'єднувалася в «трикутник» і містила додаткові фільтри 5-й і 7-й гармонік (рис. 1.7)

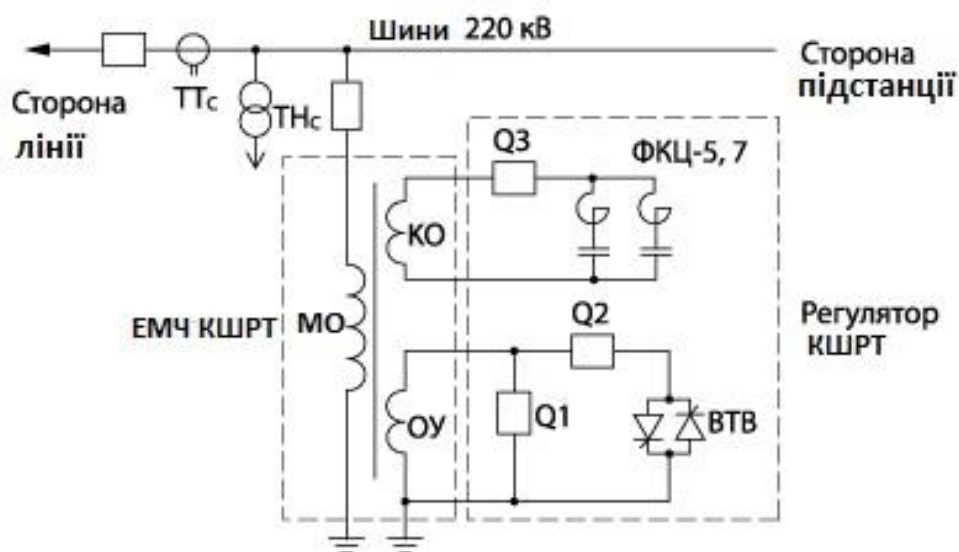


Рисунок 1.7. Однолінійна схема КШРТ:

ВТВ – високовольтний тиристорний вентиль; Q1, Q2 и Q3 – високовольтні комутаційні апарати; ФКЦ – фільтрокомпенсуючий ланцюг.

Для ілюстрації конструктивних особливостей і причин виникнення на рис. 1.8 показана електромагнітна частина КШР для однофазного виконання з двома обмотками. На схемі видно співвісне



розташування напівстрижня магнітопроводу відповідних секцій МО і ОУ.

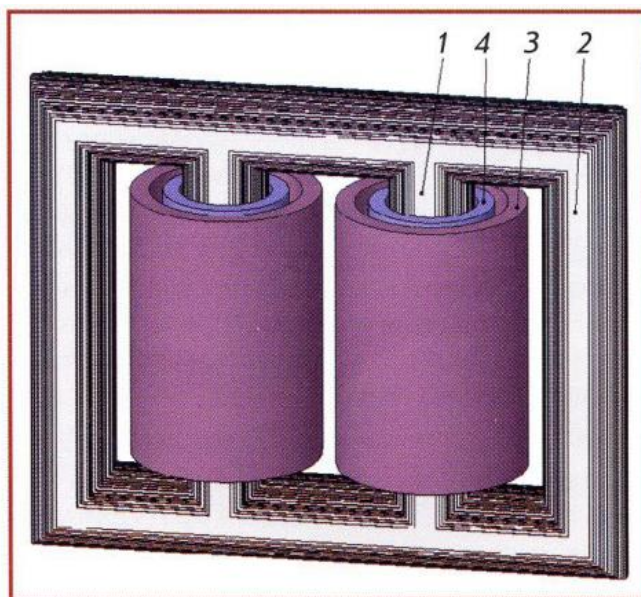


Рисунок 1.8. Конструкція фази КШР 110 кВ: 1 – основний (робочий стрижень); 2 – бокове ярмо; 3 – мережева (реакторна) обмотка.

### **Висновки по першому розділу**

В цілому керовані реактори як новий вид обладнання для інтелектуальних електричних мереж вже підтвердили свою надійність і ефективність за останні роки їх промислової експлуатації, а впровадження КШР в енергосистеми різних країн активно продовжується.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КШР

Розрахунки електромагнітних перехідних процесів (ЕМПП) в обраному сучасному програмному комплексі базуються на імітаційному моделюванні магнітних зв'язків ланцюга, який являється 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 магнітозв'язаних електричних ланцюгів з урахуванням реальної конфігурації електричної і магнітної систем модельованого пристрою. Він являється більш простим і наочним порівняно з методами, заснованими на чисельному рішенні 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 магнітозв'язаних електричних ланцюгах. В якості прикладу розробленої моделі КШР, оснований на чисельному рішенні системи рівнянь, що описують перехідні процеси в електромагнітній системі можна привести роботу [6].

В силу того, що керований підмагнічуванням реактор є складним електротехнічним пристроєм, який характеризується нелінійними властивостями електротехнічної сталі, то аналіз всіх фізичних явищ, які проходять в магнітній системі реактора, неминуче призведе до погіршення чисельного розрахунку моделі, що викличе неприпустимо велику тривалість обчислень.

Дуже важливо на початковому етапі створення моделі визначити ряд основних допущень, які з одного боку приведуть до зниження часу розрахунку, а з іншого - не приведуть до спотворення результатів розрахунку.

## 2.1 Моделювання схеми заміщення фази КШР

При моделюванні керованого ректора наступні можна прийняти наступні допущення :

1. Ярма магнітопроводу, які служать для замикання магнітного потоку обмоток і як наслідок запобігають його виходу за межі магнітопроводу, не насичуються, і 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 приводив до насичення ярм.

2. Магнітна індукція в усіх точках стрижня до його насичення однаково, тобто весь стрижень насичується одночасно.

3. Плоскі поверхні широких ненасичених ярм прилягають до торців стрижнів і концентричних рівномірних рівновисоких обмоток. Це до пущений, включаючи п.1 і 2, зводить розрахункову задачу до розрахунку ланцюга [8].

4. Обмотки тонкі. При розрахунку обмоток і потокозчеплення враховується одна і та ж площа, охоплена еквівалентним середнім витком обмотки.

5. Не враховуються втрати в сталі від вихрових струмів і явище гістерезиса.

6. Не враховується модель перетворювального блоку, який в представлених моделях замінюється регульованим джерелом постійної напруги. Дане припущення не позначається на результатах моделювання, проте значно знижує час розрахунку.

7. Довжина шляху потоків розсіювання обмоток приймається рівною висоті вікна магнітної системи автотрансформатора (довжині стрижня).

Магнітна система однієї фази керованого реактора (рис.2.1) представляє собою бронестрижневу конструкцію з двома магнітними стрижнями,

розташованими в центрі, на яких розташовуються три обмотки – компенсаційна обмотка, обмотка управління і мережева обмотка.

Два центральних стрижня пов'язані між собою центральними ярмами, які виконані більш товстими і при роботі КШР не насичаються, що призводить до поліпшення гармонійного складу струмів мережевий обмотки. Також є два бічних ярма, які є шляхами для замикання магнітного потоку, який створюється змінним струмом мережевий 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 трифазний групі однофазних реакторів МО різних фаз з'єднуються в зірку з заземлюється нейтраллю.

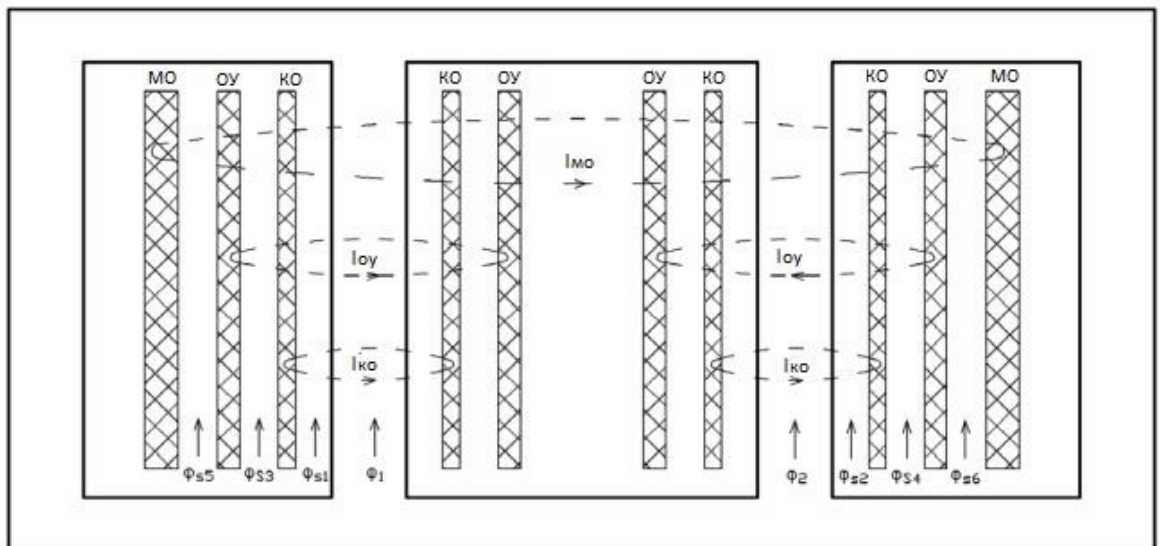


Рисунок 2.1. Магнітна система однієї фази КШР.

Обмотка управління (ОУ) має дві частини, кожна з яких охоплює один зі стрижнів. Дві частини ОУ включені зустрічно, так щоб магніторушійна сила (МРС), яка створювана протікаючим по ним струмом, була спрямована в різні сторони.

Компенсаційна обмотка (КО) має дві частини, кожна з яких охоплює один зі стрижнів. Дві частини КО включені згідно. В трифазного групі однофазних

реакторів КО різних фаз з'єднуються в трикутник. Електрична схема з'єднання обмоток однієї фази реактора показана на рис. 2.2.

На підставі описаних вище особливостей конструкції КШР, а також зроблених вище припущень створена схема заміщення магнітної системи однієї фази КШР 220 – 500 кВ (рис.2.3)

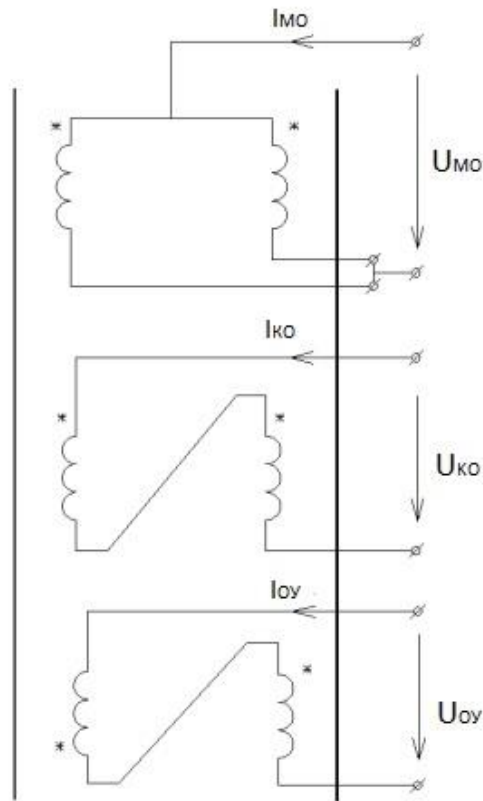


Рисунок 2.2. Електрична схема з'єднання обмоток однієї фази реактора.

## 2.2 Розробка моделі КШР в середовищі Simulink

Графічне середовище Simulink є однією з найбільш широко використовуваних імітаційних середовищ моделювання на сьогоднішній день, що дозволяє при допомозі блок-діаграм у вигляді направлених графів будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні, нелінійні і ін. системи.

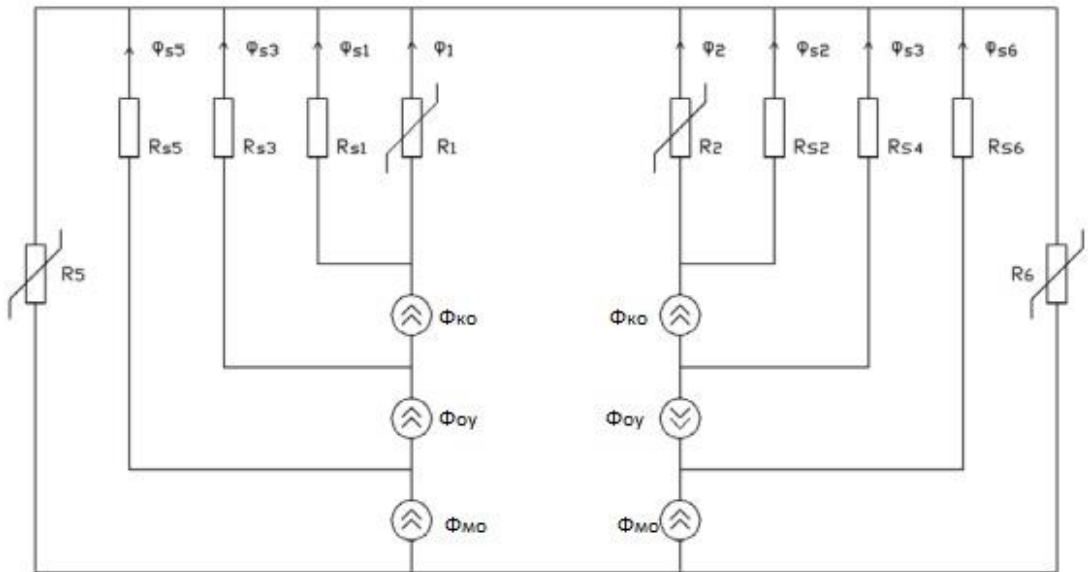


Рисунок 2.3. Схема заміщення магнітного ланцюга однієї фази КШР

Як безперечну перевагу Simulink можна відзначити відсутність необхідності видозміни системи диференціальних рівнянь при будь якій зміні електричної схеми або схеми заміщення магнітної системи КШР, що значно спрощує створення моделей і знижує ймовірність «механічно» помилки при моделюванні. Даний факт обумовлений особливістю математичного пакета Simulink, в основу якого, закладений принцип візуального програмування з використанням блок-діаграм у вигляді спрямованих графів [9-10].

Основною бібліотекою Simulink, яка використовується при створенні моделей електротехнічних пристроїв, є SimPowerSystem (SPS) [11].

Розглянемо найпростіший нерозгалужений замкнутий магнітний ланцюг, який повністю складається з феромагнітних матеріалів, на яку намотана обмотка з числом витків  $w$  (рис.2.4, а). Прикладена до обмотки змінна ЕРС  $E$  викликає протікання струму  $I$  в обмотці з числом витків  $w$ , який в свою чергу створює магнітний потік  $\Phi$ , що циркулює в осерді.

Таким чином, найпростіший нерозгалужений магнітний ланцюг можна представити у вигляді двох схем заміщення - електричної (рис.2.4, б) і магнітної (рис.2.4, в).

Електрична схема заміщення даного ланцюга містить послідовно з'єднані джерело ЕРС, індуктивність обмотки  $L$  і опір  $R$ , яке враховує активні втрати в обмотці.

Тоді для електричної схеми заміщення рис 2.4, б можна записати диференціальне рівняння [12] (2.1)

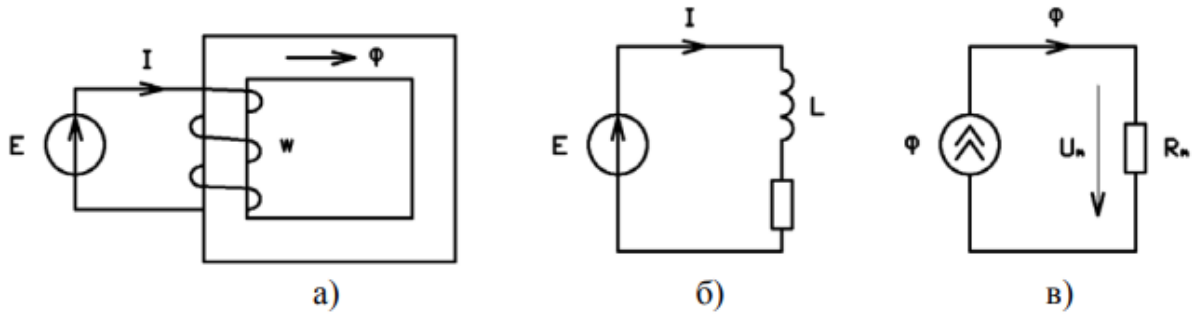


Рисунок 2.4. Найпростіший магнітний ланцюг і його схеми заміщення.

$$E = R \cdot I + L \frac{dI}{dt} = R \cdot I + \frac{d\psi}{dt} = R \cdot I + w \cdot \frac{d\Phi}{dt} . \quad (2.1)$$

На підставі електричної схеми заміщення рис.2.4, б і виразе (2.1) може бути визначено значення потоку  $\Phi$ , що протікає в магнітному колі:

$$\Phi = \frac{1}{w} \cdot \int (E - R) dt . \quad (2.2)$$

Для схеми заміщення магнітного кола рис.2.4 в), яка складається з одної ділянки феромагнітного матеріалу, де магнітний потік створюється однією обмоткою з числами витків  $w$  і струмом  $I$  справедливо записати вираз [65]:

$$U_m = I \cdot w = \Phi \cdot R_m , \quad (2.3)$$

де  $U_m$  - магнітне напруга;

$\Phi$  - потік, що протікає по магнітній системі;

$R_m$  - магнітний опір феромагнітного матеріалу.

Основна суть моделювання магнітосвязаних ланцюгів в середовищі Simulink зводиться до створення моделей електричного і магнітного ланцюгів, які пов'язані один з одним за допомогою джерела потоку  $\Phi$ .

На рис 2.5 представлена структурна схема розрахунку електричного і магнітного ланцюгів за допомогою джерела потоку.

В електричній частині схеми розрахунку електромагнітних процесів (рис.2.5) за допомогою вимірювального елемента  $BE_1$  відбувається вимір напруга на індуктивності, яка інтегрується в блоці інтегрування  $BI_1$ , отримане значення потокозчеплення ділиться на число витків  $w$  в блоці підсилення  $BP_1$ . Далі відбувається перехід до розрахунку процесів в магнітному колі для чого сигнал сформований на виході  $BP_1$  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  $\Phi$  в магнітному ланцюзі, вимірюється за допомогою вимірювального елемента  $BE_2$ , інтегрується в блоці  $BI_2$  і ділиться на число витків  $w$ , тим самим відбувається зворотний перехід від розрахунку магнітного кола до розрахунку електричного. Сигнал, отриманий на виході  $BP_2$  подається на кероване джерело струму, що забезпечує протікання струму  $I$  в катушці індуктивності.

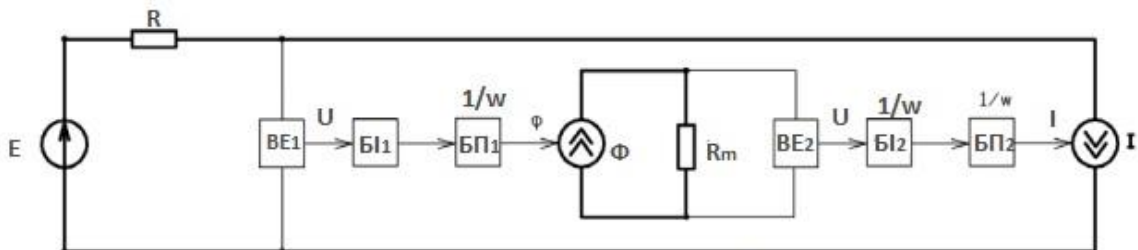


Рисунок 2.5. Структурна схема розрахунку електричного і магнітного ланцюгів за допомогою джерела потоку

На рис.2.6 представлена структура моделі електротехнічного блоку зв'язку електричного та магнітного ланцюга шляхом використання джерела потоку в середовищі Simulink.



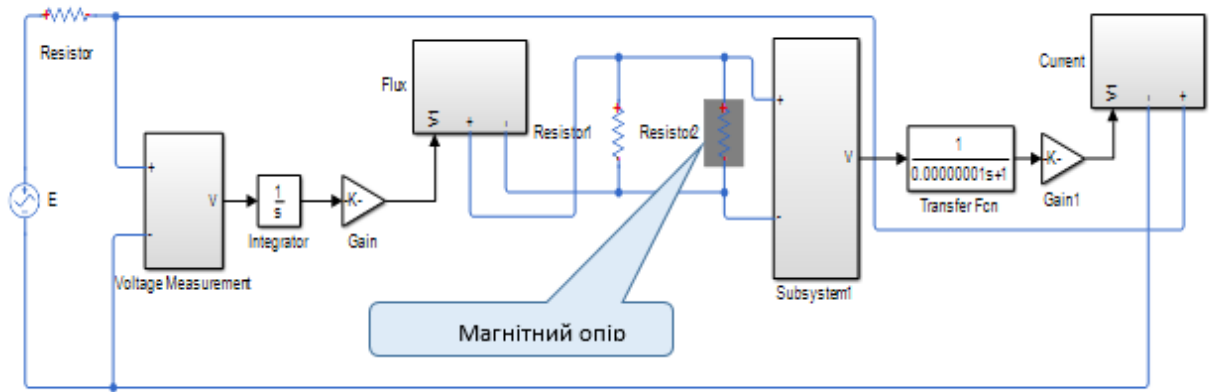


Рисунок 2.6. Структура моделі розрахунку електричного і магнітного ланцюгів за допомогою джерела потоку в середовищі Simulink

Варто відзначити наявність в моделі додаткових елементів, таких як опору  $R_1$  і фільтра з малою постійною часу  $10^{-8}$ . Необхідність в схемі  $R_1$  обумовлена тим, що при створенні моделей магнітосв'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  $R_1$ , значення якого в 1000 разів більше магнітного опору  $R_m$ , дозволить з'єднати послідовно необхідну кількість джерел струму (потіку).

До недоліків моделі можна віднести наявність замкнутого 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 в схему введений фільтр з малою постійною часу. Значення постійної часу має бути таким, щоб наявність фільтра не приводило до зміни динамічних властивостей моделі.

Залежно від поставленого завдання, а також від схеми магнітної системи досліджуваних пристроїв, опір  $R_m$  може являти собою як еквівалентний опір ділянки магнітного ланцюга, так і ділянки повітряного зазору, які в

більшості випадків задаються геометричними розмірами - площею поперечного перерізу  $S$  і довжиною ділянки  $L$ .

Слід зазначити, що підхід до визначення еквівалентних опорів  $R_m$  для магнітного і немагнітного (повітряний зазор) ділянок різниться. Даний факт обумовлений тим, що характеристика феромагнітного матеріалу носить не лінійний характер і залежить від кривої намагнічування стали  $B(H)$ , в той час як опір повітряної ділянки лінійний.

Відомо [13], що для визначення магнітного опору повітряного проміжку можна скористатися наступним виразом:

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

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

Тоді для схеми заміщення магнітного кола (рис. 2.4, в) справедливий вираз (2.4) відповідно до якого може бути знайдено падіння напруга  $U_m$  на магнітному опорі  $R_m$ .

$$U_m = \Phi \cdot R_m = \Phi \cdot \frac{L_B}{\mu_0 \cdot S_B}. \quad (2.4)$$

На рис. 2.7 приведена структурна схема лінійної магнітної ділянки (повітряного проміжку), яка реалізує закон Ома для магнітного кола.

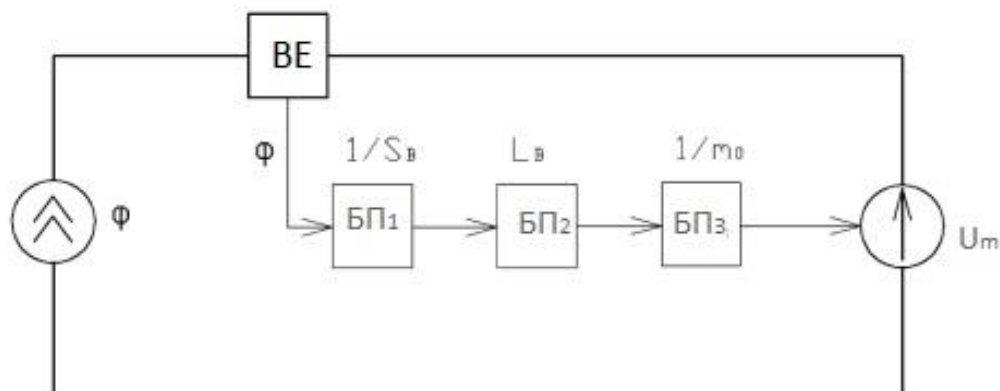


Рисунок 2.7. Структурна схема лінійної магнітної ділянки

У представленій схемі реалізований механізм визначення падіння магнітної напруги на еквівалентному лінійному магнітному опорі, який характеризує повітряний зазор, для чого за допомогою вимірювального елемента ВЕ відбувається вимір значення магнітного потоку з послідовним перетворенням отриманого сигналу  $\Phi$  в блоках підсилення БП<sub>1</sub>, БП<sub>2</sub>, БП<sub>3</sub> в магнітну напругу  $U_m$  відповідно з виразом (2.4).

Подібним чином може бути створена модель нелінійної ділянки магнітного ланцюга. Як уже було відзначено вище, основною відмінністю моделей лінійної і нелінійної ділянки ланцюга є необхідність врахування кривої намагнічування сталі, яка характеризується залежністю  $B(H)$ . З урахуванням цього фактору, вираз для визначення падіння магнітної напруги на нелінійному опорі  $R_m$  записано наступним чином:

$$U_m = \Phi \cdot R_m = H(B) \cdot L_{CT} = H \left( \frac{\Phi}{S_{CT}} \right) \cdot L_{CT}. \quad (2.5)$$

Для визначення напруги  $U_m$ , наведену на рис. 2.8 криву намагнічування сталі 3408, представлену залежністю  $B(H)$ , необхідно перетворити в  $H(B)$  (рис.2.9).

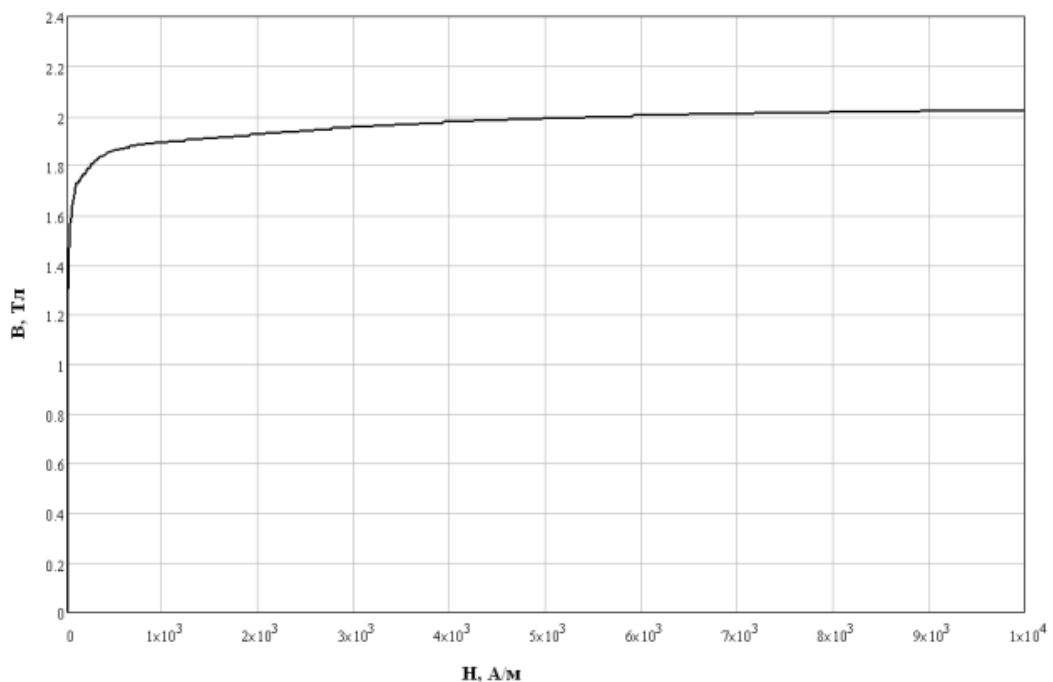
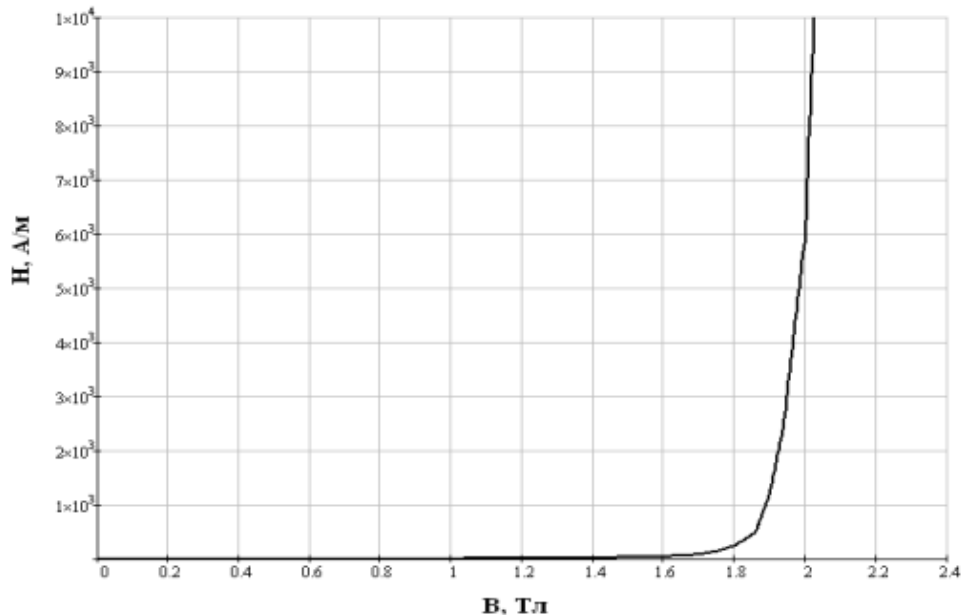


Рисунок 2.8. Крива намагнічування сталі 3408.

З огляду на вищесказане, структурна схема нелінійної магнітної ділянки (ферромагнітного матеріалу) представлена відповідно до рис.2.10.

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 ВЕ з подальшим перетворенням отриманого сигналу  $\Phi$  в індукцію  $B$  у блоці підсилення БП<sub>1</sub>, далі сигнал, що характеризує  $B$ , подається в блок вибору значення БВЗ, в якому відбувається вибір значення напруженості магнітного поля  $H$  відповідно до кривої  $H(B)$  зображеної на рис. 2.9 з подальшим її перетворенням в  $U_m$  в блоці підсилення БП<sub>2</sub>, де значення  $H$  множиться на довжину магнітної ділянки  $L_{ст}$ . Значення  $U_m$ , отримане на виході БП<sub>2</sub> подається на кероване джерело напруги, яке формує значення падіння напруги в магнітному колі на нелінійному опорі  $R_m$ .

Рисунок 2.9. Характеристика  $H(B)$  сталі 3408.

Блок БВЗ містить інформацію про криву  $H(B)$ , яка задається в вигляді століття тора вхідних значень  $B$  і відповідності значенням вектора  $B$  вектору  $H$ .

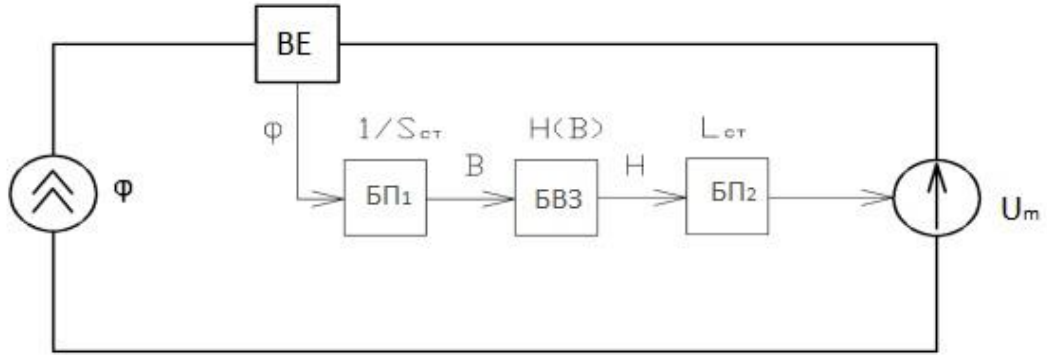


Рисунок 2.10. Структурна схема нелінійної магнітної ділянки.

Правила, за якими працює блок, описуються наступним чином:

1. Якщо вхідне значення  $V$  дорівнює одному з елементів вектора вихідних значень  $H$ , то вихідне значення блоку дорівнюватиме відповідно елементу вектора  $H$ .

2. Якщо вхідне значення  $V$  не збігається ні з одним з елементів вектора вхідних значень, то блок виконує лінійну інтерполяцію між двома найближчими до нього елементами.

3. Якщо вхідне значення  $V$  виходить за межі вектора вхідних значень, то блок виконує лінійну екстраполяцію по двох крайніх елементів.

На рис.2.11 і рис.2.12 наведені розрахункові моделі блоків лінійного і не лінійного блоків магнітного опору відповідно.

### Висновки по другому розділу

Використовуючи блоки лінійних і нелінійних магнітних опорів (рис.2.11 і рис.2.12), блок спільного розрахунку електричної та магнітної ланцюга (рис.2.6), 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 ін.).

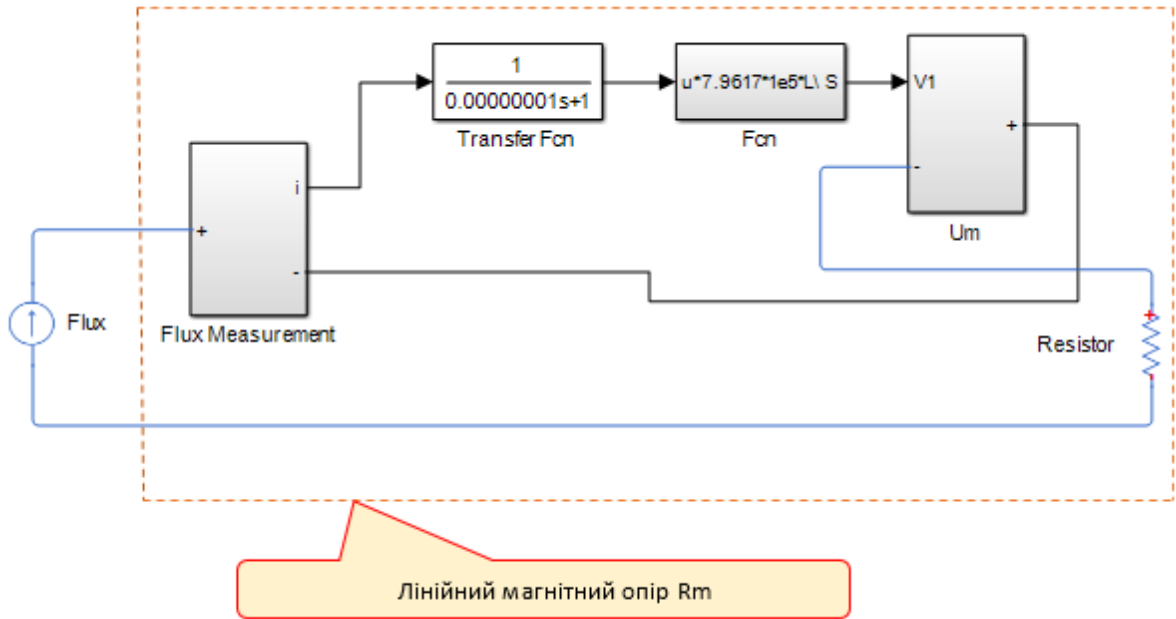


Рисунок 2.11. Модель лінійного магнітного опору в середовищі Simulink.

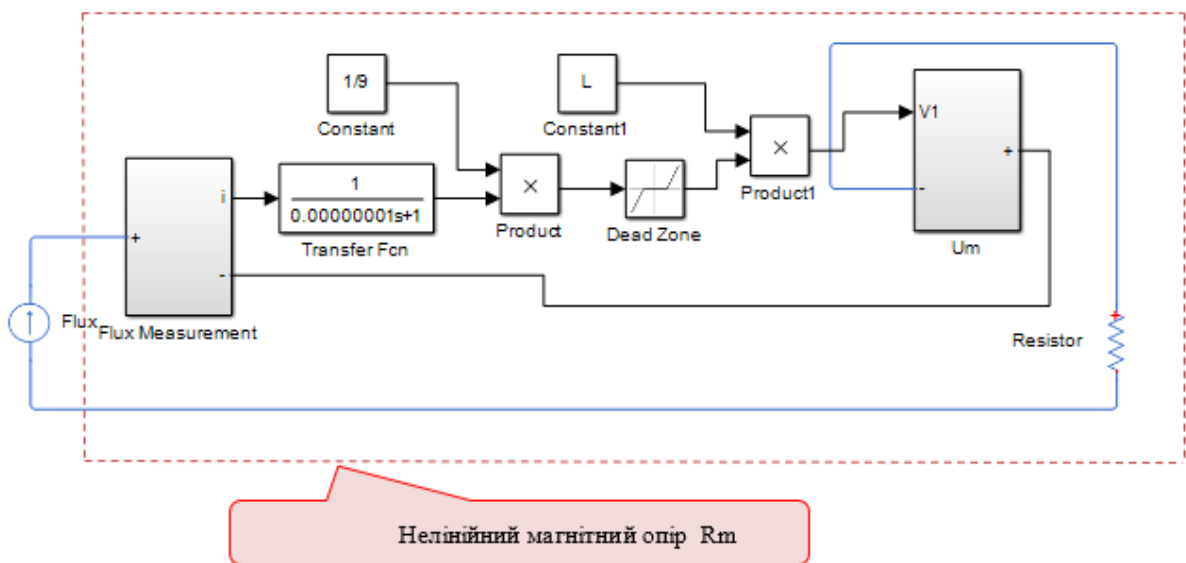


Рисунок 2.12. Модель нелінійного магнітного опору в середовищі Simulink.

## РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КШР НА ПРОЦЕСИ ЯКІ ВІДБУВАЮТЬСЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Для дослідження впливу КШР розглянемо найпростішу електроенергетичну систему керованої ЛЕП високої напруги(ВН) (рис. 3.1).

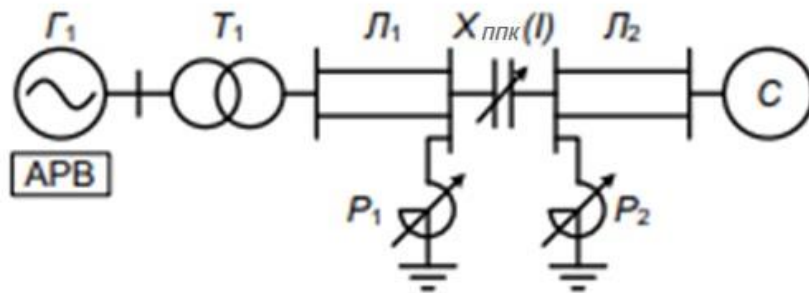


Рисунок 3.1. Досліджувана електроенергетична система, яка включає керовану ЛЕП ВН

Генератори електричної станції з сумарною номінальною потужністю  $P_{Гном}$  мають пристрій АРВ СД і з'єднані з системою дволанцюгової лінії електропередачі 220 кВ довжиною  $L$  км з встановлений ним посередині керований пристрій подовжньої компенсації (КППК). На виводах КППК встановлені керовані шунтуючі реактори (КШР). На рис. 3.2 представлена схема заміщення досліджуваної системи [14].

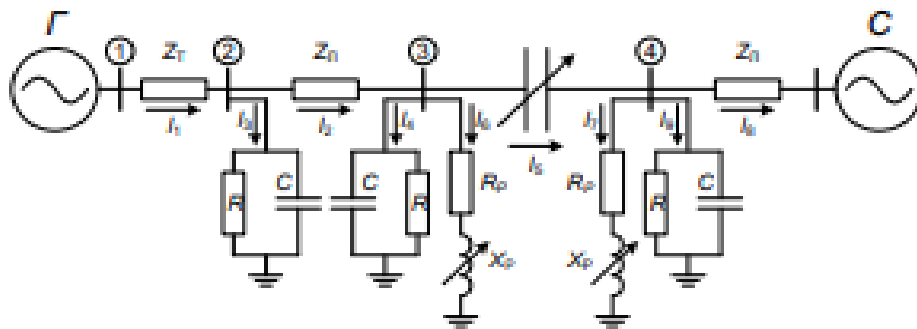


Рисунок 3.2. Схема заміщення досліджуваної електроенергетичної системи

Слід зазначити, що регулювання в ППК здійснюється шляхом зміни ємнісного опору в залежності від величини струму лінії (переданої по лінії потужності) [14]:

$$X_{ППК} = \frac{10^6}{\omega_0(K_1 - K_2 \cdot I)}, \quad (3.1)$$

де  $X_{ППК}(I)$  – опір регульованого ППК, Ом;  $I$  – струм лінії, кА;  $K_1, K_2$  – коефіцієнти регулювання ППК, мкФ і мкФ/кА відповідно.

### 3.1 Вплив КШР на величину переданої потужності та напругу в електричній мережі

Для визначення впливу КШР на величину напруги в точці підключення покажемо еквівалентну схему заміщення реактора (рис. 3.3)

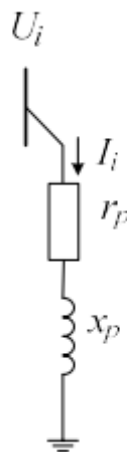


Рисунок 3.3. Схема заміщення КШР

Величина напруги в точці підключення КШР може бути визначена виразом [14]:

$$U_i = r_p \cdot I_i + L \frac{di_i}{dt} = r_p \cdot I_i + L p i_i. \quad (3.2)$$

Плавне регулювання КШР здійснюється шляхом зміни індуктивного опору в залежності від напруги в точці підключення КШР.

У літературі представлена велика кількість законів управління [15,16], оскільки є відмінності в технічній реалізації КШР. Найбільш простим законом управління є наступний, коригувальний індуктивний опір реактора зворотній пропорційно зміні напруги в точці його підключення:

$$\Delta X_{КШР}(U) = -K_{КШР}(U - U_0), \quad (3.3)$$



де  $\Delta X_{КШР}(U)$  – зміна опору КШР, Ом;  $U$  – напруга в точці підключення КШР, кВ;  $U_0$  – уставка КШР по напрузі, кВ;  $K_{КШР}$  – коефіцієнт регулювання КШР,  $\text{кА}^{-1}$ .

Оскільки реактор може тільки споживати реактивну потужність, то регулюючий ефект буде спостерігатися тільки в тому випадку, якщо напруга більше уставки, тобто  $\Delta X_{КШР}(U) < 0$ . У разі, якщо  $U < U_0$ , то реактор приймає своє максимальне значення опору і стає некерованим, тобто  $\Delta X_{КШР}(U) = 0$ .

Розглянемо межу переданої потужності ізольованої системи (рис.3.1) з КППК і з різною кількістю ступенів КШР.

На рис. 3.4 представлені кутові характеристики потужності електричної станції при відсутності регулювання КППК (коли  $K_2 = 0$  у виразі 3.1) і включені по одній, три і п'ять груп КШР на «лівих» і «правих» виводах УУПК.

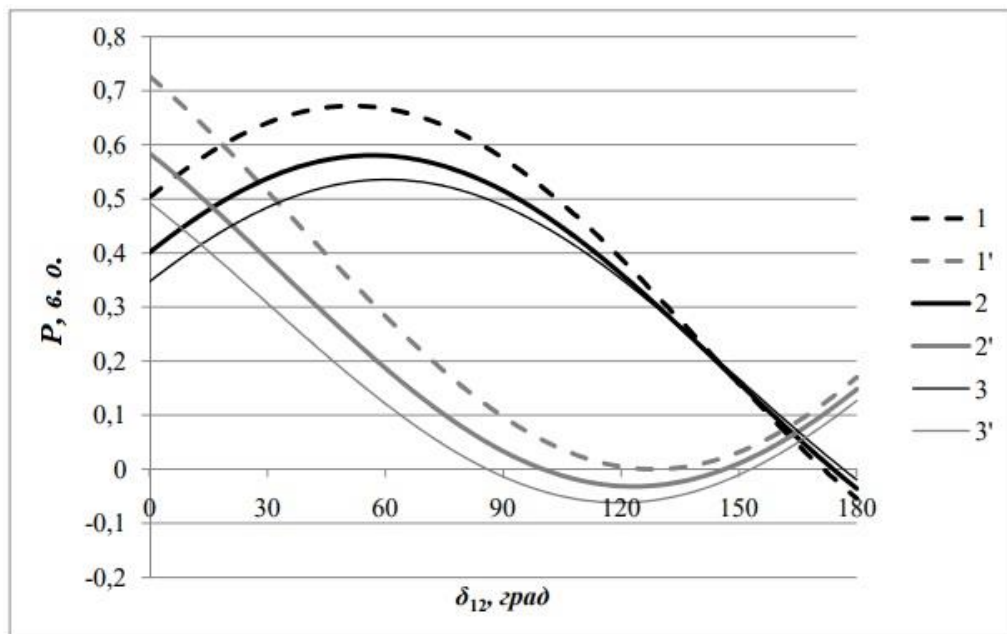


Рисунок 3.4. Кутові характеристики активної потужності генераторів при відсутності регулювання ППК: 1, 1' – включено по 1 групі ШР на виводах ППК; 2, 2' – включено по 3 групи ШР; 3, 3' – включено по 5 груп ШР

Аналіз залежностей на рис. 3.4 свідчить про те, що збільшення числа включених в роботу ШР знижує межу переданої потужності. Однак прийняти

довільне (мінімальне) число реакторів не можна, по скільки в цьому випадку напруга на виводах КППК вийде за нормований кордон. На рис. 3.5 представлені кутові характеристики напруги на «лівому» (індекс «л») і «правому» (індекс «п») виводах КППК при тих же умовах, що і на рис. 3.4.

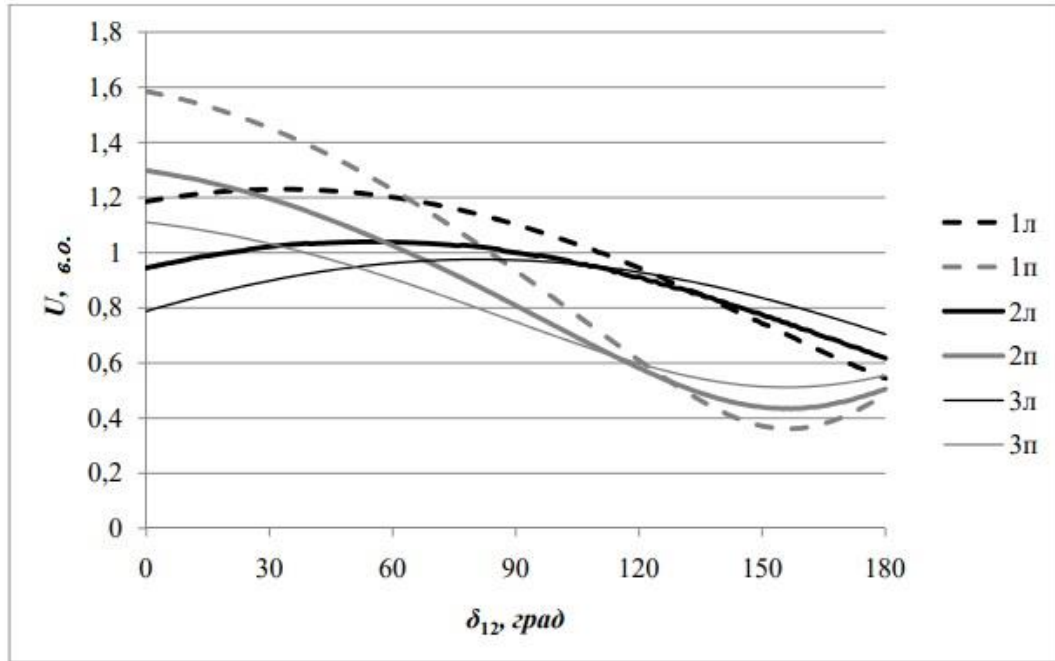


Рисунок 3.5. Кутові характеристики напруги на «лівому» і «правому» виводах КППК при відсутності його регулювання: 1 – включено по 1 групі ШР на виводах ППК; 2 – включено по 3 групи ШР; 3 – включено по 5 груп ШР.

Залежності на рис. 3.5 свідчать про те, що в міру збільшення числа груп реакторів напруги на виводах КППК вирівнюються.

Отримані результати справедливі також для інших коефіцієнтів  $K_2$  КПК. Включення по одній групі ШР неприпустимо за умовою дотримання необхідних рівнів напруги на висновках КППК.

Оскільки реактори встановлені на обох виводах КППК, то при зменшенні числа включених реакторів хоча б на одному з виводів змінюється баланс реактивної потужності в точці підключення обох груп ШР.

Виходячи з цього змінюється і перетікання реактивної потужності через КППК, а значить, ступінь компенсації і перепад напруги на його виводах

також змінюється. У даній системі має місце явище перехресного регулювання, коли включення додаткових реакторів з одного боку КППК призводить до зниження напруги на іншому виводі при невеликому зниженні або навіть збільшенні напруги на даному виводі.

### **3.2 Дослідження впливу КШР на процеси, що протікають в циклі однофазного автоматичного повторного включення лінії**

Автоматичне повторне включення (АПВ) ліній електропередачі є одним з найбільш простих і ефективних засобів підвищення надійності роботи ліній електропередачі при коротких замиканнях.

Розрізняють трифазні ТАПВ і однофазні ОАПВ. При ТАПВ пошкоджена ЛЕП незалежно від виду КЗ (однофазне, двофазне або трифазне) відключається трьома фазами з обох кінців лінії і після закінчення заданої без струмової паузи повторно включається з одного боку, а потім якщо відключення не відбулося, і з іншого боку. У разі неуспішного першого включення іноді включається дворазове ТАПВ.

При наявності ОАПВ і однофазному КЗ відключається по обидва боки тільки пошкоджена фаза, а дві інші залишаються в роботі. Через заданий час без струмової паузи відключена фаза включається повторно з одного боку, а потім з іншого. Якщо при повторному включенні КЗ не усунути, то відключають всі три фази ЛЕП. У деяких випадках при наявності пристроїв симетрування по кінцям ЛЕП двофазний режим роботи лінії може допускатися тривалий час.

У вітчизняній практиці на лініях напругою до 110 кВ, на яких доля багатофазних КЗ відносно велика, використовується в основному ТАПВ. На лініях напругою 220 кВ і вище застосовується як ОАПВ при однофазних КЗ, так і ТАПВ при багатофазних КЗ.

Після відключення аварійної фази ПЛ з двох кінців вона піддається впливу через ємнісні і індуктивні зв'язку з боку решти робочих фаз. Цей вплив призводить до протікання в місці замикання на землю струму підживлення

дуги  $I_{K3}$ , а після згасання дуги - до появи наведеної (відновленої) напруги на відключеній фазі  $U_B$ .

Значення  $I_{K3}$  і  $U_B$  залежать в першу чергу від номінальної напруги лінії і довжини ПЛ, а також від її конструкції і кількості встановлених на лінії шунтуючих реакторів (в т.ч. керованих). З ростом номінальної напруги і довжини лінії струми підживлення зростають, гасіння дуги затягується і тривалість горіння дуги може перевищити час, необхідний для збереження динамічної стійкості системи.

Для отримання досить точних результатів при розрахунках струмів підживлення і відновленої напруги повинні бути уточнені розподілення параметрів ПЛ і їх несиметрія по фазах.

Для того, щоб оцінити вплив КШР на сумарний струм підживлення, розглянемо схеми підключення КШР до електричної мережі по прямій і нульовій послідовності (рис. 3.6). При проведенні досліджень необхідно враховувати, що КШР за своїм призначенням є реактором з індуктивним опором  $X_{KШР}$ , який може змінюватися за рахунок зміни стану магнітної системи, а по конструкції КШР є трансформатором зі схемою з'єднання Y/Δ. Крім того, необхідно враховувати індуктивний опір КШР за нульовою послідовності  $X_{0KШР}$ , який визначається конструкцією реактора.

Величини опорів визначаються за виразами:

$$X_{KШР} = \frac{U_{ном}^2}{Q_{KШР}} ; X_{0KШР} = \frac{U_A \left[ \% U_{ном}^2 \right]}{100\% \cdot Q_{номKШР}} ,$$

де  $Q_{KШР}$  – потужність управляючого реактора КШР;  $Q_{номKШР}$  – встановлена потужність КШР.

Згідно зі схемою наведеної на рис.3.6, підживлення дуги струмом керованого реактора буде протилежна за знаком току фази реактора, тобто

$$\dot{I}_{KШР} = -\dot{I}_A .$$

$$i_{KШР} = j \frac{E_A}{3} \left[ \frac{1}{X_{KШР}} - \frac{1}{X_{0KШР} + X_{NKШР}} \right] \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{-j\frac{\delta}{2}},$$

де  $X_{NKШР}$  – індуктивний опір компенсуючого реактора, встановленого в нейтралі КШР.

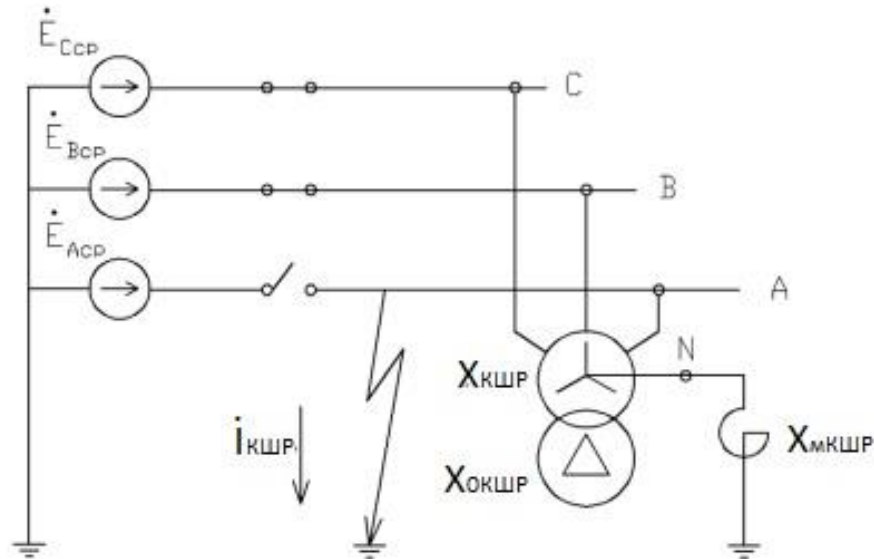


Рисунок 3.6. Спрощена схема для визначення дуги підживлення від КШР.

Проаналізуємо вплив кута передачі потужності на складову струму підживлення дуги від керованого реактора, для чого побудуємо залежність дійсної і уявної частин струму  $I_{KШР}$  від потужності реактора при фіксованих значеннях опору компенсаційного реактора і кута  $\delta$ . Як приклад будуть розглянуті варіанти з установкою  $X_{NKШР}$  0 Ом і 300 Ом. Зазначені залежності представлені на рис.3.7 - рис.3.10.

Аналіз представлених графіків (рис.3.7-рис.3.10) показує, що впливання кута передачі потужності на струм підживлення дуги від КШР збільшується з зменшенням потужності реактора. Збільшення опору компенсаційного реактора знижує залежність  $I_{KШР}$  від кута передачі потужності  $\delta$ .

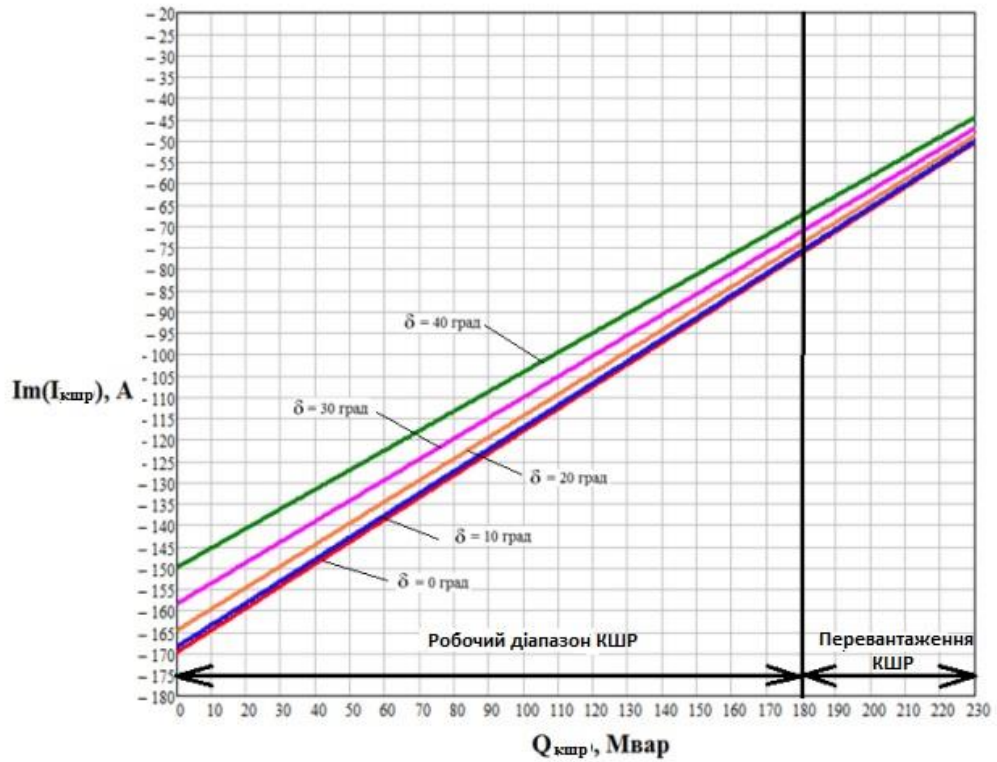


Рисунок 3.7. Уявна частина струму підживлення дуги через КШР в залежності від завантаження реактора і кута передачі потужності  $\delta$ . Опір компенсуючого реактора  $X_{\text{НКШР}} = 0$  Ом.

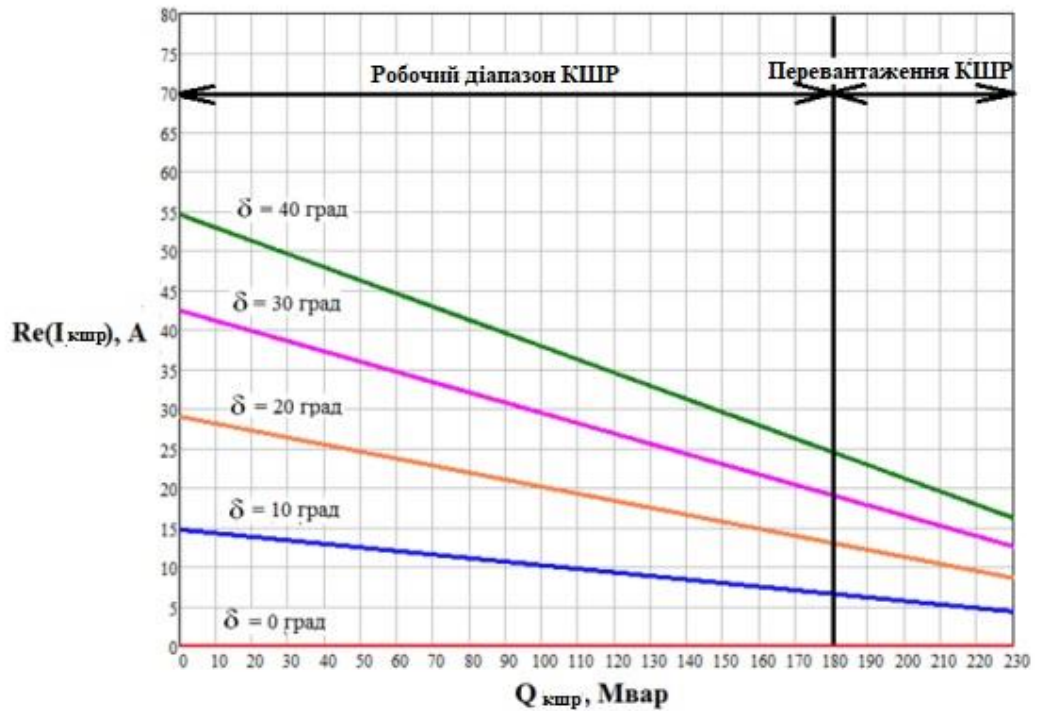


Рисунок 3.8. Дійсна частина струму підживлення дуги через КШР в залежності від завантаження реактора і кута передачі потужності  $\delta$ . Опір компенсуючого реактора  $X_{NKШР} = 0$  Ом.

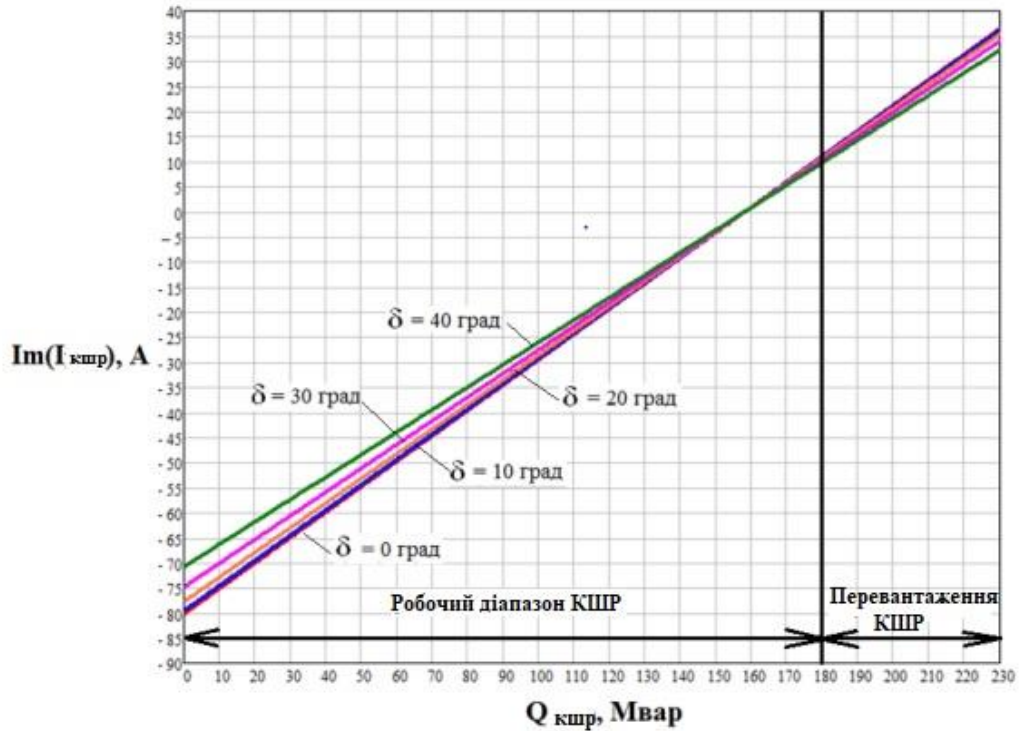


Рисунок 3.9. Уявна частина струму підживлення дуги через КШР в залежності від завантаження реактора і кута передачі потужності  $\delta$ . Опір компенсуючого реактора  $X_{NKШР} = 300$  Ом.

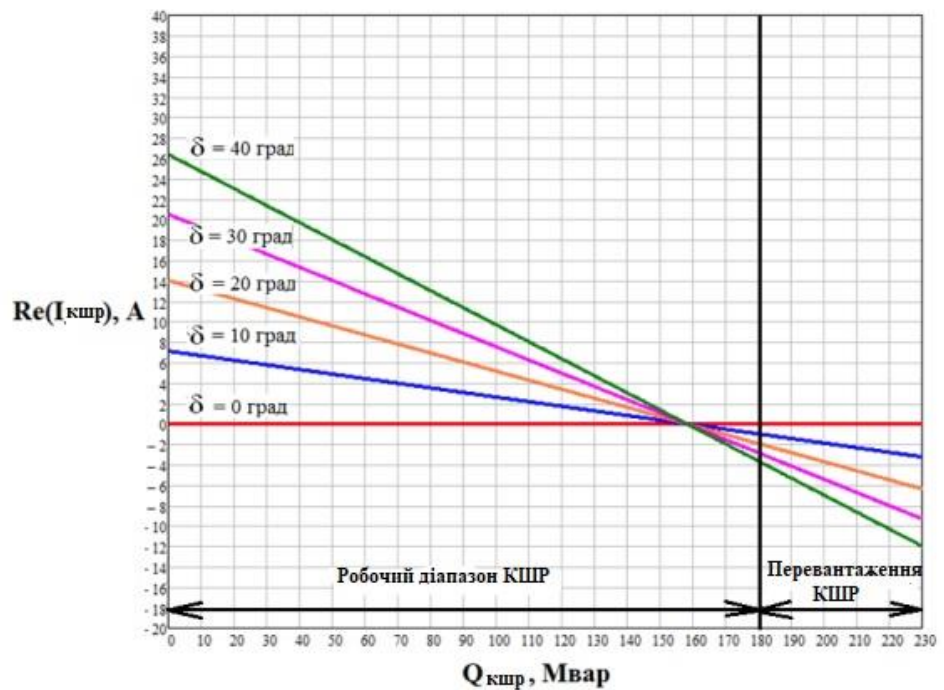


Рисунок 3.10. Дійсна частина струму підживлення дуги через КШР в залежності від завантаження реактора і кута передачі потужності  $\delta$ . Опір компенсуючого реактора  $X_{НКШР} = 300$  Ом.

### **Висновки по третьому розділу .**

З приведених вище графіків видно, що КШР, навіть при відсутності компенсаційного реактора, істотно впливає на величину струму підживлення дуги. Дане визначення, пояснюється наявністю компенсаційної обмотки в керованому реакторі.

Складова струму підживлення від КШР, як було зазначено вище, залежить не тільки від наявності компенсаційного реактора, кута зсуву фаз між напругами на шинах опорної і приймальні підстанцій, а й від споживаної потужності КШР на момент КЗ.



## ВИСНОВКИ

Виконана кваліфікаційна робота, присвячена новому типу електротехнічного обладнання - керованим шунтувальним реакторів. В роботі вирішено ряд актуальних завдань, пов'язаних з ефективністю застосування КШР 110 кВ і 220 кВ в електричній мережі.

1. У графічному середовищі Simulink математичного пакета Matlab на базі стандартних бібліотек SimPowerSystems розроблена модель КШР, яка використовується для аналізу комутаційних і динамічних процесів в реакторі при його роботі в енергосистемі. Модель створена на основі реальної конструкції КШР, застосовуваних схемотехнічних рішеннях і враховує характеристику намагнічування сталі, яка використовується в магнітній системі реактора.

2. Проаналізований вплив КШР на величину переданої потужності та напругу в електричній мережі. Встановлено що КШР впливає на перетікання реактивної потужності через керовані пристрої подовжньої компенсації, тобто на ступінь компенсації і перепад напруги на його виводах.

3. Оцінено вплив керованого реактора на процеси, що протікають в циклі ОАПВ лінії з КШР. Облік впливу КШР ґрунтується на аналізі представлених аналітичних виразів, що дозволяють оцінити струм підживлення дуги від КШР та відновлення напругу 50 Гц на відключеній фазі після згасання дуги КЗ.

**ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА**

1. Шакарян Ю.В., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart Grid // Энергоэксперт. – 2009. - №4
2. Долгополов А.Г., Сорокин С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий// Новости Электротехники. – 2012. - №3(75).
3. Б.Брянцев А.М., Базылев Б.И., Лурье А.И., Смоловик С.В. Регулирование и стабилизация напряжения высоковольтной электрической сети управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-емкостного типа// Электричество. -2012. - №10.
4. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 МВАр пущен в эксплуатацию // Электричество. 2002. № 3.
5. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. Учебно пособие. СПб., 2005.
6. Карпов В.Н. Разработка численно-аналитических моделей управляемых
7. подмагничиванием шунтирующих реакторов для анализа электромагнитных процессов в нормальных и аварийных режимах электрических сетей : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02 / Карпов Виктор Николаевич – М., 2013 – 18 с.
8. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сб. статей. Под ред. А.М. Брянцева. -М.: «Знак». 2004. 264 с. Ил.
9. Matlab. The Language of Technical Computing [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, свободный. - Загл. с экрана.
10. Дьяконов В. П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. –Москва: ДМК. Пресс, 2008. – 768 с.: ил. – ISBN-13: 978-5-94074-424-5
11. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — Москва: ДМК Пресс. — 288 с.: ил.

12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – Москва:«Высшая школа», 1996.– 638 с
13. Основы теории цепей: Учебник для вузов/Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб., - М.: Энергоатомиздат, 1989. –528с.:ил.
14. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. –2012. – Вып. 6. – С. 18–22.
15. Рагозин А.А., Таланов С.Б. Условия самовозбуждения систем, содержащих дальние линии электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. - №11. -1999. - с. 2-7.
16. Масленников В.А., Устинов С.М. Динамические свойства и статическая устойчивость дальних электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами // Изв. РАН Энергетика. — №3. — 1999. — с. 68-78.