

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Білошицький Максим Віталійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Особливості використання котушки Роговського в якості трансформаторів
струму
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

Білошицький М. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Білошицький М. В. Особливості використання котушки Роговського в якості трансформаторів струму. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Метою даної роботи є аналіз можливості та особливості використання котушки Роговського в якості трансформаторів струму в схемах релейного та диференційного захисту елементів системи електропостачання.

Ключові слова: датчики струму, електроенергетичні системи, диференціальний захист, котушка Роговського.

ABSTRACT

Biloshitsky M. V. Peculiarities of using Rogowski coils as current transformers. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of this work is to analyze the possibility and features of using Rogowski coils as current transformers in relay and differential protection schemes of power supply system elements.

Keywords: current sensors, electric power systems, differential protection, Rogowski coil.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. КОТУШКА РОГОВСЬКОГО .	7
1.1 Принцип дії котушки Роговського	7
1.2 Методика розрахунку секціонованої котушки Роговського	12
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2 ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РОГОВСЬКОГО В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ ТА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	18
2.1 Моделювання котушки Роговського в середовищі Multisim	18
2.2 Сучасний релейний захист з датчиками струму на базі котушки Роговського	22
2.3 Релейний захист мереж за допомогою котушки Роговського	24
2.3.1 Застосування в мережах низької напруги	24
2.3.2 Застосування в мережах середньої напруги	25
2.3.3. Захист генератора, лінії та шин	26
Висновки по розділу 2	27
РОЗДІЛ 3 ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ЗАХИСТ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОТУШКИ РОГОВСЬКОГО	28
3.1. Принципи диференційного захисту силових трансформаторів з використанням котушки Роговського	31
3.2 Розрахунок параметрів індукційного датчика струму на основі катушки Роговського	36
Висновки по розділу 3	42
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45

ВСТУП

Одним з актуальних питань, пов'язаних з проєктуванням та експлуатацією систем релейного захисту електротехнічних комплексів, є питання щодо можливості насичення трансформатора струму в області верхніх меж струмів короткого замикання. Насичення датчиків струму (трансформаторів струму) призводить до збільшення їх похибки, що, своєю чергою, вимагає досить складної перевірки потрапляння в область 10 % похибки при розрахунку уставок кожного виду захистів, зменшує чутливість захистів, і навіть може призвести до хибних спрацювань або, навпаки, неспрацювань захистів в аварійних режимах. Крім того, рівні сигналів вторинних кіл трансформаторів струму занадто великі для релейних захистів, виконаних на мікропроцесорних терміналах, а відповідно, вимагає додаткового встановлення проміжних трансформаторів. Тому нині простежується тенденція заміни трансформаторів струму на інші види струмових датчиків. Найбільш перспективною з можливих альтернатив видається повітряний трансформатор або петля (пояс) Роговського. З 2007 року діє стандарт IEEE C37.235-2007, який містить керівні вказівки щодо застосування котушок Роговського, що розширює можливості їх використання в системах релейного захисту.

Найпоширенішим видом вимірювачів струму (ВС) наразі є трансформатори струму (ТС), які, однак, мають недоліки, що є наслідком власне принципу дії цього виду ВС. Одним із таких суттєвих недоліків є велика (до 40 %) похибка відтворення аперіодичної складової струму, тобто незадовільна якість вимірювання струму в перехідних режимах, зокрема при коротких замиканнях.

Багатьох недоліків трансформаторів струму позбавлені вимірювачі струму, що складаються з первинного диференціюючого вимірювального перетворювача типу котушки Роговського та вторинного інтегруючого перетворювача. Характеристика котушок Роговського лінійна: у них відсутнє насичення та гістерезис. Розроблені такі конструкції котушок, які навіть за відсутності електромагнітних або феромагнітних екранів забезпечують

незалежність вимірювань від впливу сторонніх магнітних полів, не пов'язаних з вимірюваним струмом. Великою перевагою котушок Роговського є їхня мала маса.

Відродження інтересу до застосування диференціюючих індукційних перетворювачів струму (ДПС) відбулося в останнє десятиліття минулого століття, коли були створені нові ДПС, що увійшли в практику вимірювання змінного струму під назвою котушок Роговського. Ці гнучкі котушки захищені від дії заважаючих магнітних полів за допомогою зворотного дроту, що проходить всередині котушки. У ньому наводилася ЕРС перешкоди, практично така ж за абсолютною величиною, але протилежна за напрямком ЕРС, яка наводиться в самій котушці в одному витку, що збігається з віссю котушки.

Відповідно до вище зазначеного **метою роботи** є аналіз можливості та особливості використання котушки Роговського в якості трансформаторів струму в схемах релейного та диференційного захисту елементів системи електропостачання.

При виконанні роботи були **використані методи** математичного та фізичного аналізу процесів в електричних та магнітних колах, а також методи аналізу процесів за допомогою прикладних програм в середовищі Multisim.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Білошицький М. В. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СЕКЦІОНОВАНОЇ КОТУШКИ РОГОВСЬКОГО

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

Соколовський О. Ф., Білошицький М. В. МОДЕЛЮВАННЯ КОТУШКИ РОГОВСЬКОГО В СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

РОЗДІЛ 1

КОТУШКА РОГОВСЬКОГО .

1.1 Принцип дії котушки Роговського

Необхідність досліджень датчиків струму підтверджує розроблюваний міжнародний стандарт (ІЕС 61869-13) [3]:, в якому визначаються вимоги сучасних систем вимірювання, автоматики та релейного захисту до датчиків струму (конструкції, параметрів, похибки перетворення, умов експлуатації). Розробка та впровадження нових стандартів показує актуальність використання петлі Роговського, підвищує довіру до датчиків такого типу з боку виробників і вимагає досліджень можливості використання петлі Роговського в структурі систем протиаварійної автоматики та релейного захисту, а також параметрів і характеристик їх вторинних ланцюгів.

У конструкції петлі Роговського відсутні феримагнітні осердя, які визначають процес насичення електротехнічної сталі. У разі використання як датчиків петлі Роговського намагнічування відбувається за лінійним законом, без насичення. Діапазон вимірювання первинних струмів петлі Роговського визначається лише діаметром вимірювальної петлі датчика та номінальним значенням струму у вимірюваному ланцюзі. Таким чином, перетворення первинних струмів у сигнали вторинних ланцюгів (ланцюгів релейного захисту та автоматики) відбувається за лінійним законом. Датчик на основі котушок Роговського не містить й інших нелінійних елементів у своїй конструкції, тому лінійність перетворення вимірюваних сигналів гарантована у всьому діапазоні. Особливо це актуально в системах диференціальних захистів, де для зниження впливу насичення датчиків струму на їхнє функціонування використовувалися додаткові пристрої, наприклад, швидко насичувані трансформатори (ШНТ), або розроблялися спеціальні види захистів (диференціальний захист з гальмуванням).

Фазовий зсув вихідного сигналу також є досить важливим параметром перетворення сигналу, який обчислюється в мікропроцесорних пристроях релейного захисту та автоматики (РЗА) на основі сигналів від датчиків струму

та напруги. Петля Роговського, на відміну від, наприклад, трансреактора, не дає додаткових фазових зсувів і є ідеальним рішенням цієї проблеми. Однак, фазовий зсув може відбутися при посиленні та нормуванні сигналу в ланцюзі інтегратора. При розімкненій петлі Роговського фазовий зсув дорівнює нулю, а при переході в робочий режим інтегратор вносить фазовий зсув. Однак, таке фазове відхилення можна досить легко компенсувати або використанням еквівалентного RLC-ланцюга, або за допомогою обчислень (цифрова компенсація фазового зсуву) [3].

Вихідна напруга петлі Роговського є масштабованою похідною за часом $di_1(t)/dt$ первинного струму. При використанні пристроями релейного захисту та автоматики аналогових входних сигналів необхідна додаткова обробка параметрів, що отримуються від петлі Роговського, а мікропроцесорні реле, навпаки, мають елементи конструкції, що перетворюють сигнали різного типу (струму та напруги) до одного виду, найчастіше – напруги. Прикладом можуть слугувати мікропроцесорні реле типу БМРЗ, що мають у своєму складі пристрої ПТН (перетворювачі струм-напруга) [4].

Обмотки петлі Роговського являють собою багатошарові друковані плати з немагнітного матеріалу, тому взаємоіндукція між вторинною та первинною обмотками петлі Роговського дуже слабка і можливе значне спотворення сигналу зовнішніми електромагнітними полями. Отже, для використання петлі Роговського як датчиків струму необхідне виконання умов:

- місце розташування первинного провідника у витку вторинної обмотки петлі не повинно впливати на вихідний сигнал датчика;
- зовнішні електромагнітні поля, створювані близько розташованими провідниками зі струмом, не повинні впливати на сигнал вторинної обмотки.

Конструктивно можливе підключення петлі Роговського до мікропроцесорного терміналу релейного захисту екранованою крученою парою, що забезпечує достатню простоту встановлення та запобігає помилкам під час монтажу обладнання. З точки зору безпеки рівень вихідного сигналу петлі Роговського є досить низьким, тому використання клемних блоків не

потрібне. При розмиканні вторинної обмотки напруга не збільшується. Сумуючий блок здійснює додавання електричних сигналів від двох секцій котушки Роговського, і сумарний сигнал передається в реле захисту по оптоволоконному кабелю.

Величина фазового кута низьковольтного вихідного сигналу петлі Роговського (кут між первинним струмом і вторинною напругою) становить 90° . При проектуванні систем релейного захисту та автоматики необхідно враховувати це значення фазового кута [5].

Звичайні трансформатори струму зі сталевим осердям (ТТ) виготовляються з номінальними вторинними струмами 1 або 5 А і дають змогу підключати навантаження вторинного кола в кілька Ом. Стандарт ANSI/IEEE C57.13™-2008 [2] визначає клас точності ТТ для умов усталеного режиму та симетричного короткого замикання. Клас точності коефіцієнта трансформації ТТ встановлюється $\pm 10\%$ або краще, при струмах короткого замикання, що в 20 разів перевищують номінальний струм ТТ і опір вторинного кола (максимальне навантаження, яке може бути підключене до вторинного кола). ТТ розробляються відповідно до цих вимог. Але, якщо струм симетричного короткого замикання перевищує в 20 разів номінальний струм ТТ або якщо струм короткого замикання менший, але містить постійну складову (асиметричний струм), ТТ буде насичуватися. Вторинний потік буде спотворюватися, і середньоквадратичне значення струму знизиться. Традиційна котушка Роговського складається з дроту, намотаного на немагнітне осердя ($\mu_r=1$). Котушка потім розміщується навколо провідників, струми яких необхідно виміряти. У нових розробках можна використовувати друковані плати (РСВ) з надрукованими в платі витками (рисунки 1.1).

Вихідна напруга пропорційна швидкості зміни вимірюваного струму, як зазначено у формулі:

$$v_s(t) = -M \frac{di_p(t)}{dt}, \quad \text{де } M = \mu_0 \cdot n \cdot S.$$

У цій формулі: M – взаємна індуктивність; μ_0 – проникність повітря; S – площа поперечного перерізу осердя; n – щільність витків.

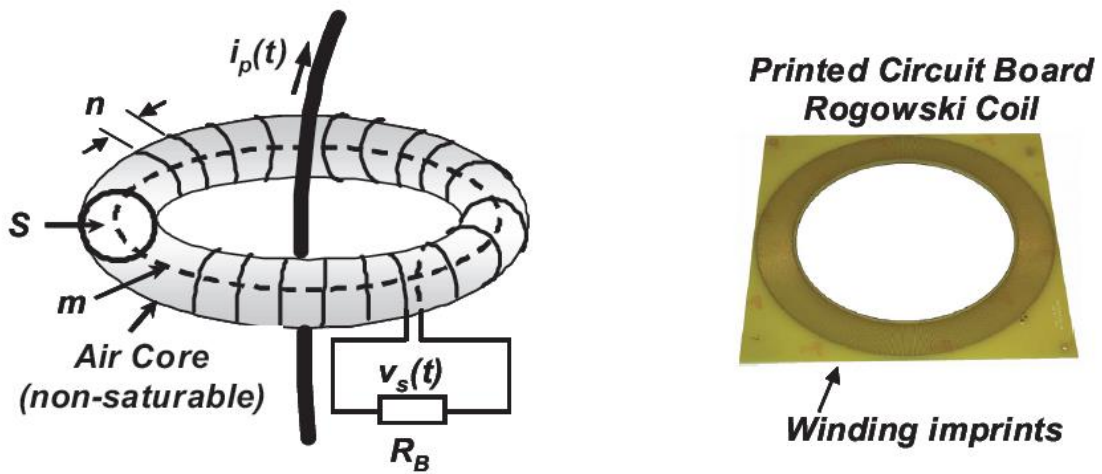


Рисунок 1.1-Котушка Роговського

Оскільки в котушці Роговського використовується немагнітне осердя, на яке намотуються вторинні обмотки, взаємний зв'язок між первинними та вторинними обмотками слабкий. Через слабкий зв'язок, щоб отримати якісні датчики струму, під час проектування котушок Роговського необхідно враховувати два головні критерії:

1. Вихідний сигнал котушки Роговського не залежить від положення провідника всередині котушки, і
2. Розташовані поблизу провідники, по яких протікають великі струми, мінімально впливають на вихідний сигнал котушки Роговського.

Щоб виконувався перший критерій, коефіцієнт взаємної індукції M повинен бути постійним для будь-якого положення провідника всередині котушки. Ця умова виконується, якщо обмотки намотані перпендикулярно до середньої лінії m (пунктирна лінія на рисунку 1) з постійною щільністю витка n на осердя з постійною площею поперечного перерізу S . Тоді коефіцієнт взаємної індукції M визначається за формулою, наведеною вище.

Оскільки первинна та вторинна обмотки котушки Роговського слабо з'єднані, для зниження небажаного впливу від прилеглих провідників, по яких протікають великі струми, котушки Роговського виконуються з двома електричними контурами, увімкненими зустрічно. Це компенсує електромагнітні поля, що наводяться котушкою. Один або обидва контури можуть бути намотані проводом. Якщо один контур виконаний як обмотка, то другий контур може бути створений шляхом намотування проводу через цю обмотку або біля неї. Якщо обидва контури виконані як обмотки, то вони повинні бути намотані у протилежних напрямках. Таким чином, вихідна напруга котушки Роговського, індукована струмами від внутрішнього провідника (провідників), подвоюється.

На рисунку 1.2(а) показана схема заміщення трансформатора струму зі сталевим осердям. Струм намагнічування I_e вносить амплітудну та фазову похибки. Оскільки ТС зі сталевим осердям має нелінійну характеристику, він може насичуватися при коротких замиканнях або за наявності в первинному струмі постійної складової. Коли ТС насичується, струм намагнічування збільшується, а вторинний струм зменшується (тобто збільшується похибка коефіцієнта трансформації ТС). Це може негативно вплинути на роботу реле, внаслідок чого воно може спрацьовувати із затримкою, не спрацьовувати або спрацьовувати хибно.

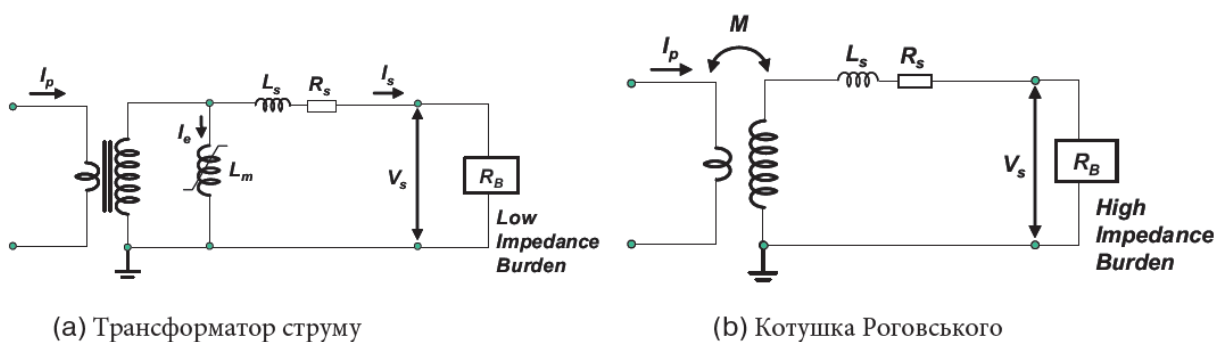


Рисунок 1.2 – Схеми заміщення

На рисунку 1.2(б) показана схема заміщення котушки Роговського. Кут зсуву фаз між струмом у первинному колі котушки Роговського та напругою у вторинній обмотці становить майже 90° (відхилення від 90° обумовлене

індуктивністю обмотки L_s). Оскільки сигнал котушки Роговського – це похідна за часом струму в первинному колі, $di(t)/dt$, потрібно обробити сигнал, щоб отримати складову промислової частоти для реле, виконаних на векторному принципі. Виділення складової промислової частоти здійснюється інтегруванням вихідних сигналів котушки Роговського або іншими методами обробки сигналів. Інтегрування може виконуватися в реле (аналоговою схемою або цифровими методами) або безпосередньо в самій котушці. Якщо використовується неінтегрований аналоговий сигнал з котушки Роговського, необхідно виконати корекцію сигналу для амплітудних значень та фазових кутів. Для реле, що ґрунтуються на векторному принципі, мають бути обчислені амплітуда та фазовий зсув сигналу з вторинної обмотки котушки Роговського для кожної частоти.

1.2 Методика розрахунку секціонованої котушки Роговського

Секціоновані тороїдальні котушки Роговського призначені для вимірювання похідних струмів в електричних установках високої напруги. Обмотка такої котушки складається з досить великої кількості секцій, розділених вузькими проміжками. Така конструкція котушки забезпечує її високу перешкодозахищеність від завадних магнітних полів, можливість отримання ЕРС (електрорушійної сили), що наводиться вимірюваними струмами, яка, за номінального значення цих струмів, становить кілька вольт. Котушка охоплює верхню порцелянову покришку високовольтного вводу. Вона розміщується на ділянці покришки, яка безпосередньо примикає до з'єднувальної втулки вводу. Секції котушки доцільно виконувати у вигляді однакових кругових соленоїдів, надягнутих на спільний гнучкий немагнітний каркас (на трубку з полімерного матеріалу) [1, 3].

Дотепер ще не створено методики, що дозволяє виконувати розрахунок параметрів таких котушок. Наведені нижче матеріали знімають цю проблему.

Соленоїди, що мають середній діаметр витка d і довжину a , розділені проміжками довжиною b , не покритими витками котушки. Відносна довжина однакових елементарних соленоїдів $ad = a/d$ повинна бути не менше 0,5 і не

більше 2. Такі обмеження пов'язані зі зручністю виготовлення елементарних соленоїдів, розміщення їх на загальному гнучкому каркасі, закріплення на ньому та електричного з'єднання виводів елементарних соленоїдів. За більшого значення ad виникають труднощі з насадкою секцій на гнучкий сердечник, а за меншого ad збільшується складність робіт із забезпечення однакових зазорів b між секціями, міцного закріплення соленоїдів на сердечнику та електричного з'єднання їх виводів.

Відносна довжина проміжків між обмотками соленоїдів $\beta d = b/d$ повинна знаходитись в межах від 0,2 до 0,5.

Середній діаметр витка d повинен вибиратися, виходячи зі зручності намотування секції котушки та розміщення котушки навколо нижньої ділянки верхньої порцелянової покритишки високовольтного вводу, що примикає до з'єднувальної втулки. Чим більший цей діаметр, тим менша кількість витків і довжина обмотувального дроту. Але при цьому зростає маса гнучкого каркаса котушки, ускладнюються процеси виготовлення її секцій, надягання їх на каркас і стикування кінців каркаса після охоплення ним порцелянової покритишки. При визначенні діаметра витка слід враховувати також товщину ізоляційного покриття секцій та необхідність розміщення котушки на ділянці між з'єднувальною втулкою та першим кільцевим ребром покритишки. Можна рекомендувати вибирати значення діаметра витка d в інтервалі від 5 до 8 см.

За кресленням високовольтного вводу та обраним середнім діаметром витка d визначається діаметр D осової лінії котушки так, щоб вона вільно розміщувалася на нижній ділянці верхньої покритишки вводу в безпосередній близькості до з'єднувальної втулки.

Розрахунок секціонованої тороїдальної котушки Роговського проводиться в наступному порядку.

1. *Визначення взаємної індуктивності M котушки та центральної труби високовольтного вводу.* За заданими значеннями номінального струму вводу I_1 , напруги котушки E_2 та частоти f взаємна індуктивність котушки та струмопроводу вводу визначається за формулою:

$$M = E_2 / (2\pi \cdot f \cdot I_1).$$

2. *Визначення розмірів та числа соленоїдів (секцій) котушки.* Задаються значення діаметра D осьової лінії котушки, середнього діаметра витка d та довжини a соленоїда, а також попереднє значення проміжків b між обмотаними ділянками соленоїдів.

Знаходиться попереднє значення числа секцій котушки:

$$n = \pi D / (a + b),$$

яке потім округлюється до цілого числа.

3. *Вибір обмотувального проводу.* Струм котушки Роговського малий, він становить частки міліампера. Тому дріт вибирається не за його допустимим нагрівом, а виходячи з задоволення трьох інших умов:

1) забезпечення механічної міцності жили проводу та його ізоляції в процесі механізованої намотки секцій котушки;

2) слід домагатися низького значення маси котушки;

3) активний опір котушки повинен бути значно меншим за опір навантаження, яке підключається до затискачів котушки.

Остання умова усуває велику втрату напруги в навантаженій котушці.

Цим умовам відповідають проводи з поліефірною ізоляцією, що мають діаметр d_m мідної жили в межах від 0,112 до 0,2 мм, при цьому максимальний зовнішній діаметр ізольованого проводу d_{iz} знаходиться в межах від 0,14 до 0,24 мм [5].

Поперечний переріз вибраного обмотувального проводу розраховується за формулою:

$$S_m = \frac{\pi d_m^2}{4}.$$

4. *Визначення чисел витків соленоїдів та котушки.* Число витків соленоїда знаходиться за наступним виразом [4]:

$$w_1 = \frac{2M}{\mu_0 n} \cdot \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d^2},$$

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

Знайдене значення округлюється до найближчого парного числа. Число витків w всієї котушки дорівнює n_1 .

5. *Перевірка розміщення обмотки у два шари.* Розраховується мінімальна та максимальна довжини одного шару обмотки: $a_{min} = 0,525 w_1 d_{i3}$ та $a_{max} = 1,05 w_1 d_{i3}$.

Перевіряється виконання умови $a_{min} \leq a \leq a_{max}$.

Якщо ця умова не виконується, то здійснюється одна з наступних рекомендацій:

збільшується довжина соленоїда a ;

обмотку котушки намотують не в два, а в чотири шари;

збільшується діаметр витка d .

В останньому випадку потрібно буде повернутися до пункту 2.

6. *Розрахунок довжини обмотувального проводу* виконується за формулою: $l_m = \pi d n w_1$.

7. *Розрахунок маси міді обмотувального проводу* проводиться за формулою: $m_m = \gamma_m l_m s_m$, де $\gamma_m = 8900 \text{ кг/м}^3$ – питома густина міді.

8. *Розрахунок індуктивності секціонованої котушки* виконується в наступному порядку.

8.1. Індуктивність L_0 однієї, ізольованої від інших, секції котушки знаходиться як індуктивність соленоїда з використанням еліптичних інтегралів $K(k)$ та $E(k)$ [5]:

$$L_0 = \frac{\mu_0 w_1^2 d}{4\pi} \Phi, \quad \Phi(\alpha_d) = \frac{4\pi}{3} \cdot \left[\sqrt{\alpha_d^2 + 1} \left(K(k) + \frac{1 - \alpha_d^2}{\alpha_d^2} E(k) \right) \right], \quad k = \frac{1}{\sqrt{\alpha_d^2 + 1}}. \quad (1.1)$$

8.2. Розрахунок відстані між секціями котушки:

$$b = \frac{\pi d}{n} - \alpha.$$

8.3. Визначення індуктивності однієї секції котушки з урахуванням її взаємної індуктивності з сусідніми секціями.

При цьому нехтуємо кривизною осрової лінії котушки, вважаючи, що розглядувана секція і сусідні з нею є коаксіальними соленоїдами, а відносні

значення довжини соленоїдів αd і відстаней між сусідніми соленоїдами βd знаходяться в рекомендованих вище діапазонах. Тоді достатньо враховувати взаємні індуктивності розглядуваної секції тільки з чотирма іншими. Дві з них найбільш близькі до розглядуваної, вони розташовані з двох сторін від неї через проміжок $b_1 = b$. Їм відповідає взаємна індуктивність M_1 . Дві інші враховувані секції також розташовані з двох сторін від неї, але через одну секцію. Проміжок між кожною з них і розглядуваною секцією дорівнює $b_2 = 2b + a$. Їм відповідає взаємна індуктивність M_2 .

Зазначені взаємні індуктивності M_1 і M_2 розраховуються за формулами, що відповідають теоремі про чотири прямокутники [4]. Для обчислення взаємної індуктивності M_1 спочатку за формулами (1.1) знаходяться індуктивності трьох фіктивних котушок: L_{b1} , L_{ab1} і L_{ab1a} , що мають відносну довжину: b_1/d , $(a+b_1)/d$, $(2a+b_1)/d$. У всіх цих котушок однакова лінійна щільність намотування витків, тому числа витків цих котушок відповідно дорівнюють: $w_1 b_1 / a$, $w_1 (a+b_1)/a$, $w_1 (2a+b_1)/a$. Потім розраховується взаємна індуктивність:

$$M_1 = \frac{1}{2} (L_{ab1a} + L_{b1} - 2L_{ab1}). \quad (1.2)$$

Аналогічним чином за формулами (1.1) і (1.2) розраховуються індуктивності трьох інших котушок, що мають відносну довжину b_2/d , $(a+b_2)/d$, $(2a+b_2)/d$, і взаємна індуктивність M_2 .

Індуктивність всієї котушки, що складається з n секцій, дорівнює:

$$L = n(L_0 + 2M_1 + 2M_2)k_t, \quad k_t = \frac{2\alpha_{d\Sigma}}{\alpha_{d\Sigma} + \sqrt{\alpha_{d\Sigma}^2 - \pi^2}}, \quad \alpha_{d\Sigma} = \frac{\pi D}{d}. \quad (1.3)$$

У формулі (1.3) коефіцієнт k_t враховує кривизну осьової лінії тороїдальної котушки.

9. *Розрахунок опорів котушки.* Знаходиться індуктивний опір котушки: $X = 2 \pi f L$.

Питомий опір мідного проводу при заданій температурі T її нагрівання знаходиться за формулою [4]: $\rho_m = \rho_{m0}(1 + 0,0043(T-T_0))$, де $T_0 = 20^\circ \text{C}$, а

питомий опір відпаленої стандартної міді при цій температурі $\rho_{m0} = 0,01724 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Розраховується активний опір котушки:

$$R = \frac{\rho_{i_i} l_i}{S_i}.$$

На завершення розрахунку параметрів котушки визначається її повний опір: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Висновки по першому розділу

Основною особливістю роботи котушки Роговського є те що у конструкції петлі Роговського відсутні феримагнітні осердя, які визначають процес насичення електротехнічної сталі. У разі використання як датчиків петлі Роговського намагнічування відбувається за лінійним законом, без насичення. Діапазон вимірювання первинних струмів петлі Роговського визначається лише діаметром вимірювальної петлі датчика та номінальним значенням струму у вимірюваному ланцюзі.

РОЗДІЛ 2

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РОГОВСЬКОГО В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ ТА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Використання перетворювачів струму в диференціальному захисті силових трансформаторів може підвищити чутливість захисту, відкриває можливість відмовитися від застосування диференціального захисту з гальмівною характеристикою, яка досить складно реалізується з мікропроцесорних реле, і визначати виткові замикання в трансформаторі [6].

2.1 Моделювання котушки Роговського в середовищі Multisim

Моделювання поясу Роговського проводилося в середовищі електронної віртуальної лабораторії Multisim. Характеристики об'єкта, що моделюється (петлі Роговського) наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Основні параметри модельованого датчика струму

Параметр	Значення
Опір	1,1 Ом
Місткість	6 пФ
Індуктивність	72,2 нГн
Кількість витків	160
Відстань між витками	0,5 см
Діаметр дроту	1 мм
Діаметр кільця	100 см

Схема вторинних ланцюгів диференціального захисту трансформатора наведена на рис. 2.1. Схема представлена в однофазному виконанні, і містить датчик струму струму з двох сторін силового трансформатора, і реле, включене на різницю напруг (струмів).

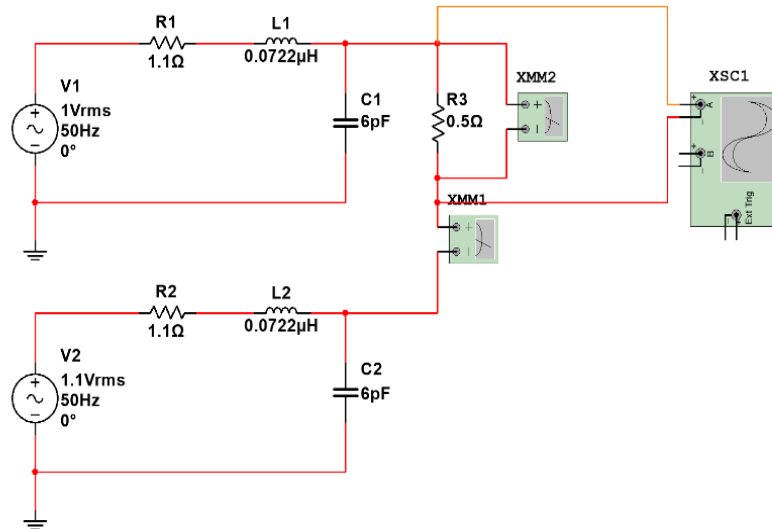


Рисунок 2.1. Вторинні ланцюги диференціальної захисту трансформатора на основі петлі Рогівського

Відповідно до паспортних даних у модельованій петлі Роговського кожна зміна первинного струму на 1 А призводить до пропорційної зміни вторинної напруги датчика на 0,05 mV. Приймаючи середній струм короткого замикання (КЗ) у мережі 110 кВ близько 10 кА, виконаємо моделювання сигналу датчика струму з другого боку силового трансформатора. Отримані значення наведено у табл.2.2.

Таблиця 2.2. Результати моделювання параметрів схеми диференціальної захисту

U_1 ,	U_2 ,	U_{R3} , mV	I_{R3} , mA
1	0,5	92,591	185,183
1	0,8	37,037	74,073
1	0,9	18,518	37,037
1	0,92	14,815	29,629
1	0,95	9,259	18,518
1	0,98	3,704	7,407
1	1,01	1,852	3,704
1	1,03	5,555	11,11
1	1,05	9,259	18,518
1	1,1	18,518	37,037

Модель вторинних ланцюгів диференціального захисту силового трансформатора дозволила отримати залежність струму реагуючого органу ($R3$ в схемі) від різниці вторинних напруг перетворювачів Рогівського на

високій і низькій сторонах трансформатора. Вторинна напруга змінювалася пропорційно протікаючому через первинні ланцюги струмам первинної і вторинної обмоткам силового трансформатора. За результатами моделювання побудовано графічні залежності напруги реагуючого органу від різниці первинних струмів сторін силового трансформатора. (і, відповідно, вторинних напруг перетворювачів Рогівського) (рис. 2.2).

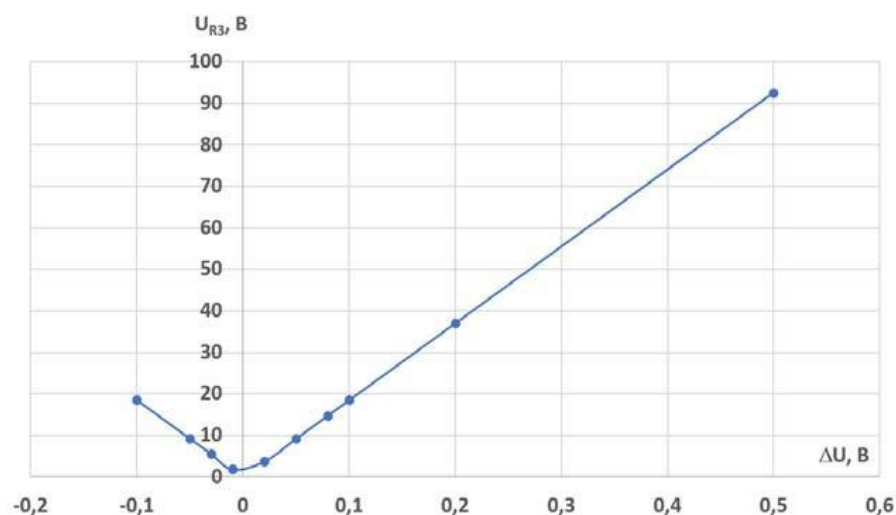


Рисунок 2.2. Залежність напруги реле від небалансу сигналів сторін диференціального захисту

Результати моделювання показують, що навіть при відхиленні струмів сторін вищої та нижчої напруг силового трансформатора в 1 % напруги реагуючого органу релейного захисту достатньо для фіксування пошкодження в первинному ланцюзі. Таким чином, при розрахунку струму спрацьовування диференціального захисту необхідно відбудовувати від похибки терміналу мікропроцесорного реле і роботи пристрою РПН. Пропонується визначати уставку за струмом відповідно до наступної умови (2.1):

$$I_{сз} = K_{відс} \cdot (\delta + \Delta U / U_{ном} / 2) \cdot I_{роб.мах}, \quad (2.1)$$

де $K_{відс}$ - коефіцієнт відстроювання, пропонується прийняти із запасом рівним 1,2; δ - погрішність аналого-цифрового перетворення мікропроцесорного реле, у більшості сучасних реле дорівнює не більше 5%; $\Delta U / 2$ - половина діапазону регулювання РПН; $I_{роб.мах}$ - максимальний робочий струм первинного кола.

Струм спрацьовування захисту в відповідно з формулою (2.1) складе $0,2 \div 0,25 I_{\text{ном}}$.

Таким чином, маючи коефіцієнт трансформації петлі Рогівського 0,05 мВ/А, навіть за номінальних струмів порядку 100 А, на виході перетворювача Роговського отримуємо напругу порядку 0,05 В. При аварійних струмах (струмах КЗ) рівень сигналу значно збільшується [7]. Диференціальний сигнал (різницю величин сигналів початку і кінця зони, що захищається) можна встановити відповідно до формули (2.1), причому, без гальмування уставки диференціального сигналу завдяки відсутності насичення (лінійності вихідної характеристики) [8]. Моделювання диференціального захисту показало, що уставки порядку $0,2 \div 0,25$ від номінального струму більш ніж достатнього для впевненого спрацьовування диференціального захисту, при цьому чутливість захисту така висока (коефіцієнт чутливості більше 10), що не потрібно перевірки та визначення коефіцієнта чутливості. Використання перетворювача Роговського дозволяє підвищити чутливість диференціального захисту, спростити методику розрахунку параметрів спрацьовування, підвищити надійність спрацьовування і відбудується від хибних спрацьовувань при високих рівнях струмів короткого замикання.

Перший диференційний захист електроенергетичної системи високої та надвисокої напруги був розроблена для батареї конденсаторів у 2012 році. В системі релейного захисту було застосовано котушки Рогівського (потужність БК 30 Мвар, найбільша робоча напруга 60 кВ, схема зірка-зірка). Для цієї реалізації цієї системи датчики встановлені в кожному плечі трифазної батареї конденсаторів [5].

Так як датчики типу пояс Рогівського не проектується для роботи з рівнем високої та надвисокої напруги, для роботи на рівні випробувальної напруги 350 кВ датчики підключалися до вторинних ланцюгів релейного захисту через систему оптичних кабелів [3]. Значення диференціальних струмів при такій схемі підключення, отримані в результаті пусконаладжувальних робіт, склали приблизно 0,2 А і показали симетричність системи. Таким чином, на

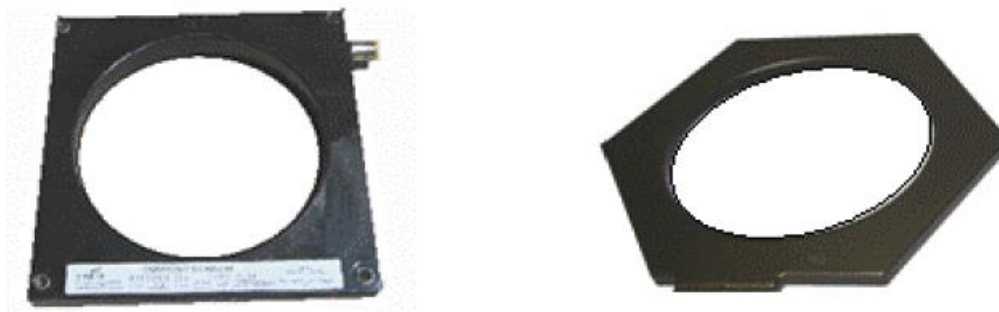
прикладі цього комплексу релейного захисту та автоматики було підтверджено можливість використання пояса Роговського як датчика струму для основних захистів високовольтного обладнання та забезпечення стійкості сигналу до електромагнітних перешкод. Встановлені комплекси доводять перспективність використання перетворювачів типу петля Роговського у диференційних захистах.

2.2 Сучасний релейний захист з датчиками струму на базі котушки Роговського

Котушки Роговського можуть бути виконані в різних формах, наприклад, у вигляді кола або овалу. Котушки можуть бути виготовлені з твердих або гнучких матеріалів. Котушки можуть бути як нерозбірні, так і, як альтернатива, з розбірною конструкцією, яка може монтуватися навколо провідника, який не може бути розімкнутий. Форма профілю, на яку надівається котушка, зазвичай кругла або прямокутна.

Тверді котушки Роговського мають вищу точність, ніж гнучкі, і можуть бути виконані з використанням друкованих плат за типом вікна (нерозбірний осердя) або розбірного типу. Котушки Роговського на друкованих платах можуть складатися з однієї або двох друкованих плат, на яких друкуються обмотки. При використанні конструкції з однією друкованою платою обидві обмотки друкуються на тій самій платі. При використанні двох плат обмотки друкуються на кожній платі і розташовуються зустрічно. На рисунку 2.3 показано дві конструкції котушки Роговського типу «вікно» на друкованих платах для внутрішнього та зовнішнього розміщення навколо провідників первинної обмотки, що полегшує встановлення котушки Роговського, аналогічно звичайним високовольтним ТС у виводах трансформатора. На рисунку 2.4 показано осердя котушки Роговського, яке встановлюється навколо провідників первинної обмотки, якщо не висувається вимога вільного доступу доіспровідників. На рисунку 2.5(a) показано осердя котушки Роговського, встановлене навколо розщеплених проводів. На рисунку 2.5(b)

показано встановлення навколо провідника з великою площею поперечного перерізу, що охолоджується водою.



(a) Для внутрішнього розміщення (b) Для зовнішнього розміщення

Рисунок 2.3: Нерозбірні котушки Роговського, виготовлені на друкованій платі

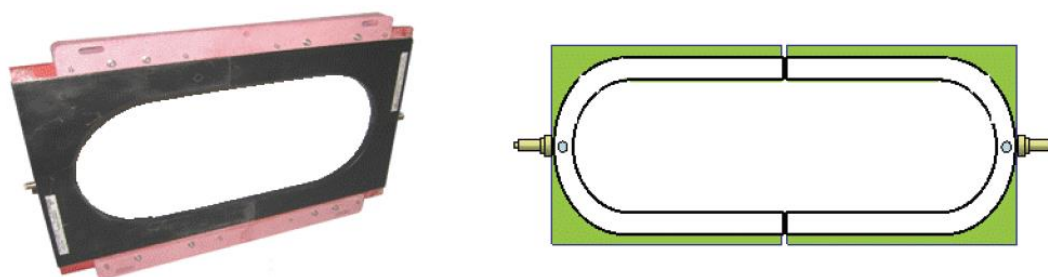
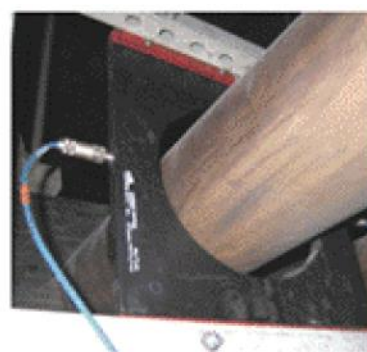


Рисунок 2.4: Розбірна котушка Роговського, виготовлена на друкованій платі



(a) Котушка Роговського,
змонтована навколо 6 провідників



(b) Котушка Роговського,
змонтована навколо великого
провідника

Рисунок 2.5: Розбірна котушка Роговського

Для підключення до реле або інших вимірювальних пристроїв та пристроїв керування, трансформатори струму повинні мати у вторинному колі проводи

великого перерізу (рисунок 2.6а). Опір проводу збільшує навантаження на ТС і негативно впливає на ТС у перехідних режимах, що може спричинити насичення ТС при високих струмах короткого замикання. Крім того, потрібні клемні колодки, які дозволяють закоротити вторинну обмотку ТС при підключенні до реле. При розмиканні вторинної обмотки ТС, по якій протікає струм навантаження, можуть виникати небезпечні напруги. Інші недоліки ТС – великі розміри та маса. Наприклад, на рисунку 2.6 показано ТС 2000/5 А класу С800, підключений до реле. Цей ТС має осердя і важить 90 кг, а висота обмотки дорівнює 10 см.

Котушки Роговського можуть підключатися до реле екранованою крученою парою з конекторами (рисунок 6(b)). У цьому випадку клемні колодки не потрібні, оскільки вихідний сигнал котушки – мінімальна напруга, яка є безпечною, і ця напруга не збільшується, коли вторинне коло розмикається. Ширина та маса котушки Роговського менші, ніж у ТС. Котушка Роговського має таке ж за розміром вікно, як і ТС (рисунок 6а), але більший діапазон по струму.

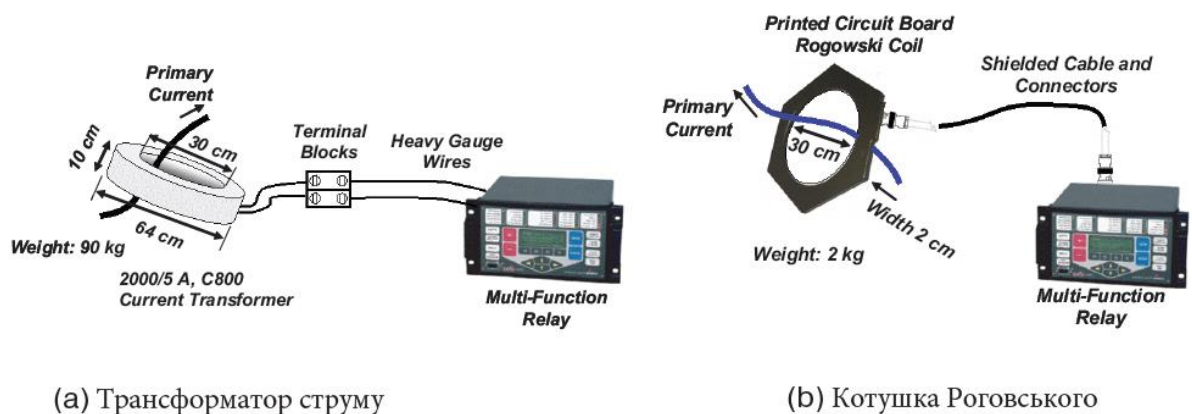


Рисунок 2.6. Підключення котушки Роговського

2.3 Релейний захист мереж за допомогою котушки Роговського

2.3.1 Застосування в мережах низької напруги

Котушки Роговського можуть замінити традиційні трансформатори струму для вимірювань і захисту. У IEEE Std C37.235 ТМ-2007 [3] наведено рекомендації щодо застосування котушок Роговського в релейному захисті.

Приклади систем захисту, організованих на датчиках струму з котушками Роговського, наведено нижче.

Локалізовані електричні мережі були широко поширені в США для забезпечення надійного живлення щільно завантажених міських районів. Однак у випадку короткого замикання, струми замикання дуги в колекторній шині відносно низькі (у порівнянні з максимальними струмами пошкодження для глухих металевих КЗ), у деяких випадках дещо більше струмів навантаження. Оскільки низькі значення струмів можуть виявитися недостатніми для спрацьовування плавких запобіжників, обладнання може бути суттєво пошкоджене. Диференціальний захист локалізованих електричних мереж загальноприйнятими методами застосовувався в рідкісних випадках. Також, внаслідок використання звичайних ТС, були випадки позаштатної роботи релейного захисту. Нещодавно розроблені схеми на основі котушок Роговського забезпечують надійну роботу захисту при протіканні високого рівня струму, як, наприклад, у локалізованих електричних мережах, оскільки проблема насичення усунена. На рисунку 2.7 показана схема диференціального захисту локалізованої електричної мережі з трьома незалежними джерелами живлення.

Вимикачі СВ1, СВ2 та СВ3 використовуються для переривання струму на стороні середньої напруги. Пристрої захисту NP1, NP2 та NP3 використовуються для переривання струму на стороні низької напруги. Пристрій захисту – це низьковольтний повітряний вимикач, який керується мережевим реле зворотної потужності (пристрій 32), а також може бути укомплектований фазним реле (пристрій 78) для спостереження за замиканням мережевого захисного пристрою за допомогою порівняння фазних кутів між первинною та вторинною напругами. Щоб уникнути перебоїв у живленні, мережеві захисні пристрої зазвичай не мають функції максимального струмового захисту, що встановлюється фірмами-виробниками, і тому не спрацьовують при замиканнях у мережі в прямому напрямку для захисного пристрою, встановленого з боку навантаження. Крім того, більшість фірм-

виробників не застосовують пристроїв для виявлення пошкоджень в інших ділянках мережі, оскільки струми замикання дуги можуть бути низькими і не можуть достовірно бути відрізані від струмів навантаження. Плавкі запобіжники F11, F21 та F31 можуть усунути тільки стійкі високі струми замикання в низьковольтній колекторній шині, в розподільних пристроях споживача або в з'єднанні колекторної шини та розподільних пристроїв споживача.

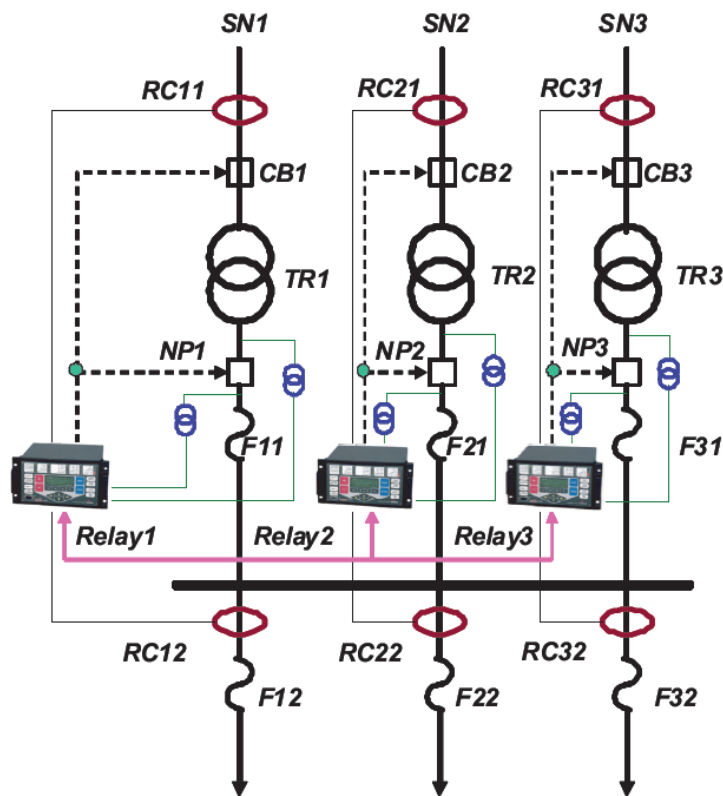


Рисунок 2.7: Захист локалізованої електричної мережі

Система диференціального захисту, показана на рисунку 2.7, ефективно захищає від коротких замикань всередині зони та стабільна щодо коротких замикань поза зоною, які усуваються плавкими запобіжниками F12, F22 та F32. Оскільки максимальні струми коротких замикань можуть перевищувати 100 кА, датчик з котушкою Роговського необхідний для забезпечення надійного функціонування диференціальної системи. Схема захисту, представлена на рисунку 2.7, має лише одну зону захисту, а отже, при замиканні в будь-якому місці поза зоною всі три трансформатори будуть відключені. З додаванням додаткових котушок Роговського між плавкими

запобіжниками F11, F21, F31 та шиною, схема стає більш гнучкою за наявності захисної зони для кожного трансформатора.

2.3.2 Застосування в мережах середньої напруги

Система захисту, представлена в цьому розділі, була розроблена для застосування в мережах середньої напруги (рис. 2.8). Система включає мікропроцесорні багатофункціональні реле, Ethernet-комутатори та датчики струму з котушкою Роговського, і забезпечує повний захист підстанції. Котушки Роговського мають однакову конструкцію та номінальні параметри для всіх функцій захисту, що спрощує технічні рішення. Ethernet-комутатори керують зв'язком між реле, а також передачею даних по Ethernet між підстанцією та внутрішньою локальною мережею. Також забезпечується віддалений доступ до реле з офісних ПК для коригування уставок і перегляду/завантаження осцилограм та подій, що дозволяє проводити моніторинг подій, що відбулися в системі, та завантажувати нові уставки, задані інженером РЗА, в реле.

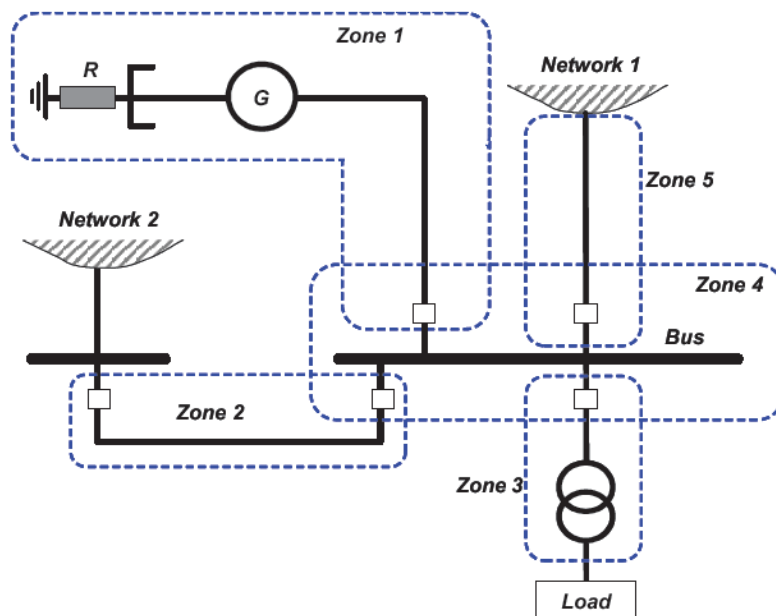


Рисунок 2.8: Енергосистема

Схеми захисту реалізовані на реле Idea фірми Cooper Power Systems, які є повнофункціональними мікропроцесорними пристроями захисту, моніторингу та керування. Реле Idea також підвищують надійність електропостачання та забезпечують вимірювання, керування, зв'язок і функції

PLC-контролерів для автоматики, EMS та SCADA. У цих реле можуть встановлюватися 2 різні типи плат аналогових входів – перший тип для підключення до вимірювальних ТС, другий – для підключення до котушок Роговського.

Idea-реле використовують пакет робочих програм ProView, розроблений для ПК, керованих операційною системою Microsoft Windows. Програма Idea Workbench, що входить до складу ProView, дозволяє користувачеві налаштувати функції захисту та керування. Типові схеми захисту включають захист лінії, диференційний захист трансформатора, захист обертових машин, диференційний захист шин, захист конденсаторної батареї та захист шунтувального реактора.

Розділ Communications в Idea Workbench дає користувачеві можливість вибрати протокол зв'язку для підключення до SCADA-систем, а також для налаштування параметрів. Доступні протоколи – DNP 3.0, Modbus, 2179 та IEC 870-5.

Диференційний захист, представлений тут, ґрунтується на методі зв'язку PeerComm, який забезпечує зв'язок «точка-в-точку» по послідовному каналу зв'язку з оригінальним протоколом або по Ethernet. PeerComm зв'язок по Ethernet використовує систему передачі повідомлень GOOSE, що дозволить у майбутньому здійснити взаємодію з іншим обладнанням з підтримкою стандарту IEC 61850.

2.3.3. Захист генератора, лінії та шин

Зона захисту 1 на рис. 2.8 охоплює генератор, підключений до шин підстанції.

На рис. 2.9 наведено систему з реле, встановленим у зоні 1. Реле 1 виконує інтегрований захист генератора. Реле 2 захищає приєднання та здійснює синхронізацію генератора з мережею. Реле 1 і 2 також з'єднані волоконно-оптичними кабелями (не показані на рисунку) з Ethernet-комутаторами для забезпечення віддаленого доступу до реле та зв'язку з програмним забезпеченням ProView.

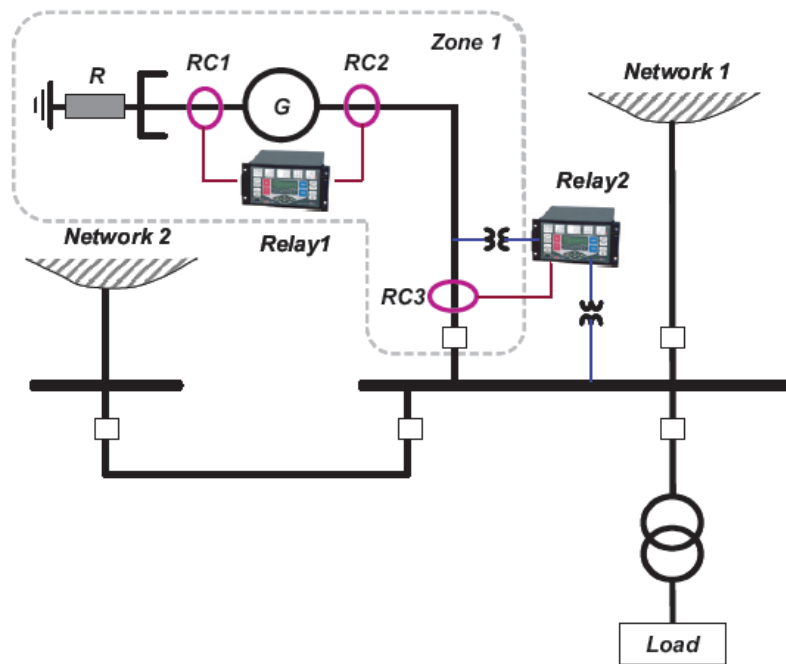


Рисунок 2.9. Захист генератора

Схема захисту лінії (Зона 2) показана на рис. 2.10. Реле 1 і 2 пов'язані волоконно-оптичними кабелями з Ethernet-комутаторами. Схема захисту лінії працює за протоколом зв'язку PeerComm. Реле на обох кінцях лінії незалежно одне від одного виконують алгоритм захисту та обмінюються інформацією по каналу зв'язку, щоб визначити, чи знаходиться коротке замикання на лінії (у зоні) або десь в іншому місці системи (поза зоною).

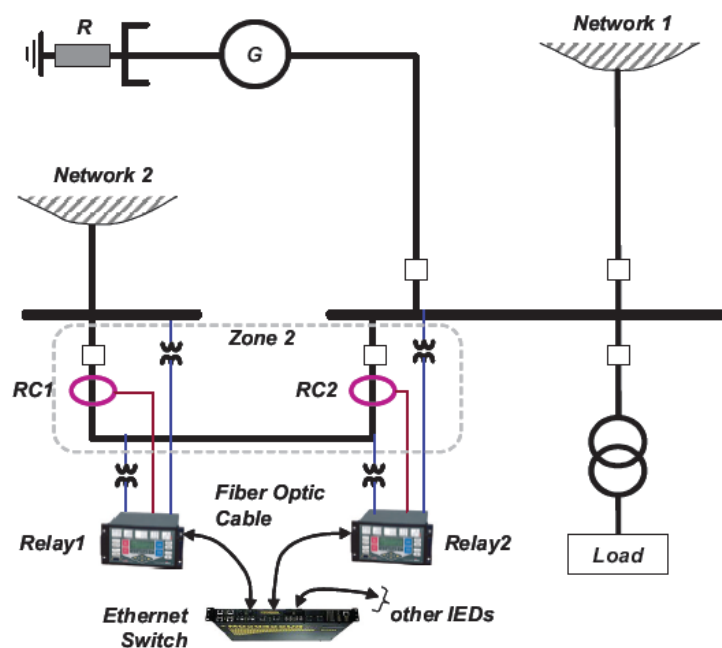


Рисунок 2.10. Диференційний захист лінії

Котушки Роговського можуть забезпечити надійний захист будь-якого типу збірних шин за будь-яких струмів пошкодження. На рис. 2.11 показано шину з чотирма приєднаннями. Котушки Роговського можуть бути підключені до одного реле за допомогою екранованої крученої пари та підсумовувального блоку, як показано на рис. 2.11a. У рішенні, яке показано на рис. 2.11b, котушки Роговського можуть бути підключені до різних каналів реле або підключені до кількох реле за допомогою інтерфейсів зв'язку. Це дозволяє контролювати кожне приєднання і, отже, обробляти положення роз'єднувачів для складніших систем збірних шин, використовуючи ті самі критерії, що й для звичайних ТС.

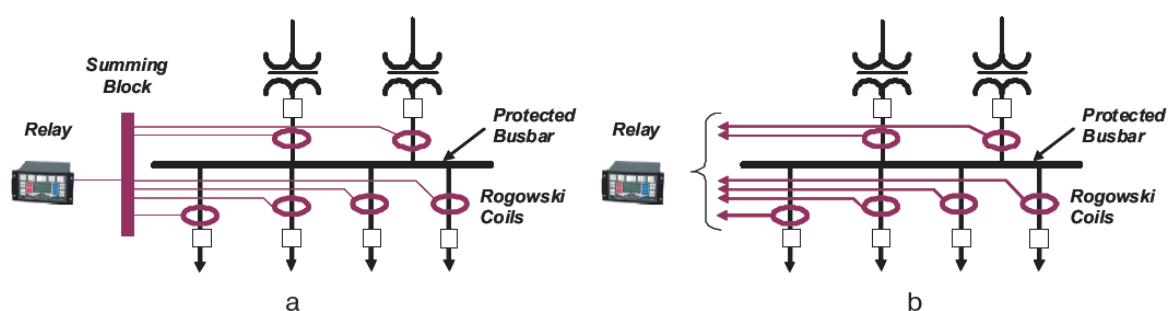


Рисунок 2.11. Захист шин.

Висновки по другому розділу

Котушки Роговського можуть замінити традиційні трансформатори струму для вимірювань і захисту.

Диференційний захист елементів електромережі, виконаний на основі датчиків Роговського, дозволяє впевнено фіксувати диференціальний струм від 1 % номінального, що забезпечить чутливий диференційний захист і, можливо, буде достатньо для визначення виткових замикань у трансформаторі, відповідно роботи захисту на сигнал при виявленні такого виду пошкоджень.

РОЗДІЛ 3

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ЗАХИСТ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОТУШКИ РОГОВСЬКОГО

Традиційні диференціальні схеми захисту, в яких використовуються звичайні ТС, вимагають стабілізації при зовнішніх замиканнях або пошкодженнях, що викликають насичення ТС, оскільки неможливо уникнути насичення ТС за всіх обставин. Навіть там, де ТС мають однакову конструкцію і провідники між кожним ТС, і диференціальним реле збалансовані, ТС не насичуватимуться однаково через залишковий магнітний потік. Щоб уникнути хибного спрацювання при зовнішніх коротких замиканнях, гальмівна характеристика диференціального елемента зазвичай виконується з двома або більшою кількістю нахилів.

Використання котушок Роговського покращує технічні характеристики захисту за рахунок високої надійності (чутливості та працездатності при низьких струмах пошкодження в зоні), та підвищує надійність щодо не спрацювання при коротких замиканнях поза зоною (струми перевищують 60 кА). Алгоритми захисту спрощуються, тому що котушки Роговського не насичуються. Крім того, не потрібна наявність декількох похилих ділянок гальмівної характеристики. Пускові струми трансформатора визначаються з використанням хвильового алгоритму розпізнавання. Уставки захисту можуть обиратися нижчими для забезпечення чутливості у порівнянні з рішеннями на звичайних ТС. РПН, що використовується в реле, дозволяє адаптивно змінювати коефіцієнт трансформації трансформатора, що також дозволяє підвищити чутливість.

3.1. Принципи диференційного захисту силових трансформаторів з використанням котушки Роговського

Традиційні системи диференційного захисту, що використовують звичайні ТС, потребують стабілізації при зовнішніх коротких замиканнях або збуреннях, що спричиняють насичення ТС, оскільки неможливо уникнути насичення ТС за будь-яких обставин. Навіть там, де ТС мають однаковий тип

і з'єднувальні проводи між кожним ТС і диференційним реле однакові, трансформатори струму не насичуватимуться однаково через залишковий магнітний потік. Рис. 3.1 пояснює похибку в диференційному струмі, викликану насиченням ТС. Щоб уникнути хибної роботи при наскрізному струмі короткого замикання, зазвичай використовується гальмівна характеристика диференційного захисту з двома похилими ділянками характеристики (рисунок 2). Використання котушок Роговського в релейному захисті покращує функціонування захисту завдяки збільшенню надійності роботи реле (захист може відчувати і працювати при внутрішніх замиканнях з невеликими струмами пошкодження) та забезпечує високу безпеку при зовнішніх коротких замиканнях (при струмах, що перевищують 60 кА). Оскільки котушки Роговського мають лінійні характеристики (не насичуються), алгоритми захисту стають простішими, і наявність кількох похилих ділянок характеристики більше не потрібна (рисунок 2). Подальше вдосконалення функціонування захисту було досягнуто завдяки реалізації алгоритму розпізнавання пускових струмів трансформатора на основі аналізу форми кривої струму. Уставки цього захисту можуть бути чутливішими порівняно зі стандартними схемами, що використовують звичайні ТТ. Також, в алгоритмі захисту використовується положення пристрою РПН для адаптивного коригування коефіцієнта трансформації, що дозволяє зменшити поріг спрацьовування реле.

Використання котушок Роговського для вимірювання та захисту є прикладом зміни парадигми в техніці. В інженерів РЗА були обґрунтовані побоювання, що застосування нових датчиків може серйозно вдарити по існуючих концепціях вимірювання та захисту. Щоб продемонструвати, що зміна в парадигмі не повинна викликати занепокоєння і використання котушки Роговського дозволяє покращити функціонування захисту в порівнянні зі звичайними ТС, перша система, що використовує котушки Роговського, була розроблена та використана для захисту трансформатора дугової електропечі. Ці силові трансформатори раніше не захищалися диференціальним захистом

через труднощі у створенні трансформаторів струму зі сталевим осердям для струмів навантаження 60 кА і більше[6]:.

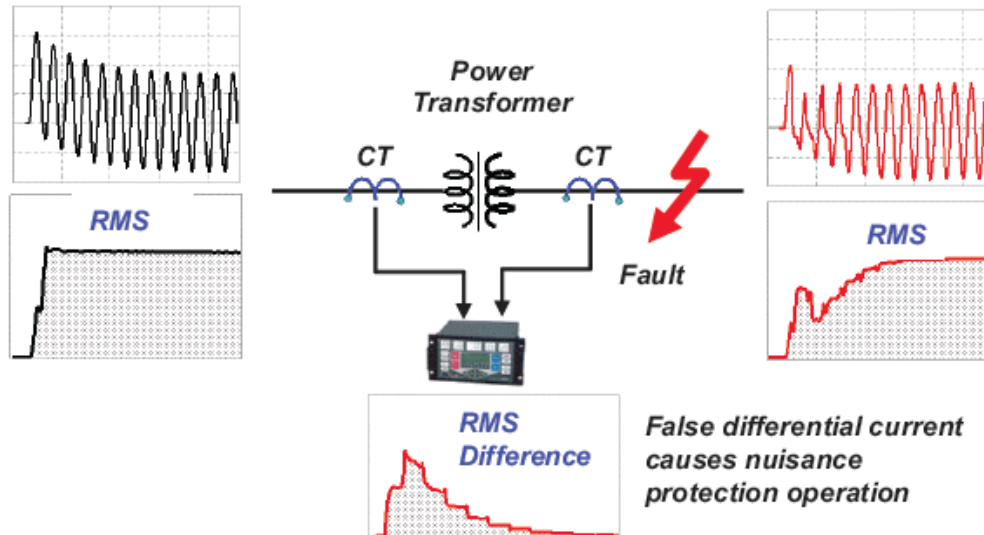


Рисунок 3.1: Виникнення хибного диференційного струму внаслідок насичення ТС

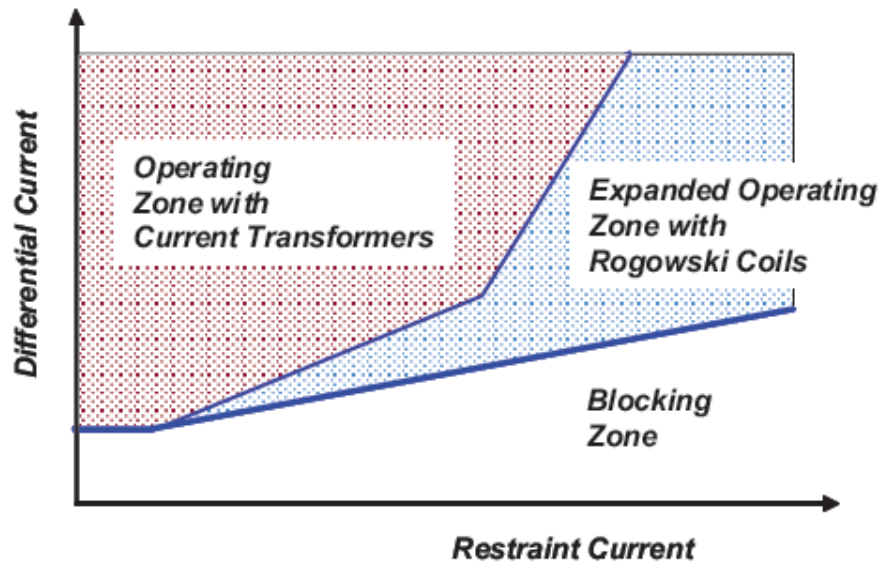


Рисунок 3.2: Робоча характеристика при використанні ТС та котушок Роговського

Система релейного захисту з використанням котушок Роговського була реалізована вперше для двох трансформаторів ЕАФ напругою 34.5/1 кВ потужністю 90 МВА, оснащених пристроєм РПН. Первинна обмотка котушки Роговського була обрана нерозбірної конструкції. Через високий рівень

вторинних струмів, що перевищують 50 кА, вторинна сторона трансформатора EAF утворена численними провідниками, що відходять від обмоток і зібрані в два шинопроводи з водяним охолодженням на кожну фазу (діаметр кожної труби 23 см). Оскільки шинопроводи на вторинній стороні не можна різати, то були обрані котушки Роговського з розбірним осердям. Рисунок 3.3 пояснює реалізацію диференціального захисту трансформатора EAF. Режим роботи трансформатора EAF суттєво відрізняється від режиму роботи підстанційного силового трансформатора порівнянного розміру. Ці відмінності створюють багато проблем проєктувальнику РЗА при розробці відповідної системи диференціального захисту.

Щоб краще зрозуміти, чому складно (або неможливо) реалізувати диференціальний захист трансформатора EAF на звичайних ТС, далі показано приклад типової електродугової печі з трансформатором 25 МВА[5]:.

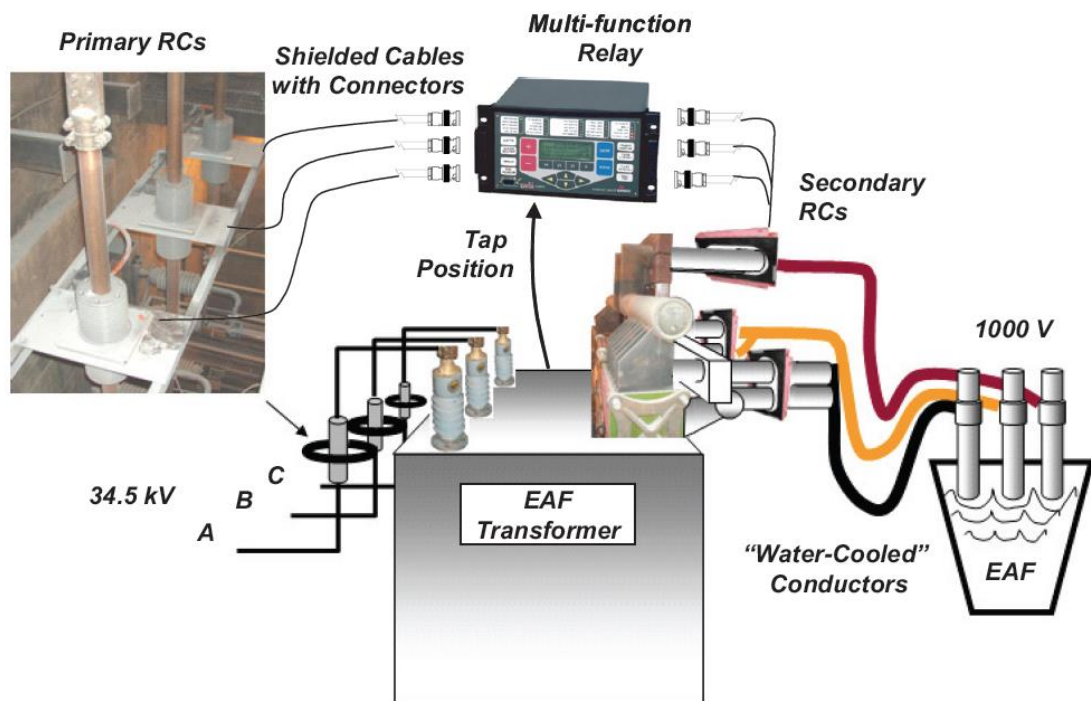


Рисунок 3.3: Диференційний захист трансформатора ДСП з використанням котушок Роговського

На рис. 3.4 показано однолінійну діаграму електричної системи.

За звичайного режиму роботи печі цикл плавки починається із завантаження в піч холодного брухту металу (шихти). Цикл плавки

починається тоді, коли електроди занурюються в шихту і з'являється дуга. Це спричиняє коротке замикання, яке миттєво призводить до виникнення дуже великого струму. Володіючи надмірними електродинамічними силами, дуга відкидає брукт від електродів, іноді перериваючи електричну дугу. Потім дуга швидко повторно загоряється, і цей процес може тривати до кількох хвилин. Протягом цього періоду значення струму швидко й хаотично змінюються від низьких до високих. Після 5-10 хвилин роботи покращується стабільність горіння дуги, але ступінь стрибків струму все ще залишається високим порівняно з можливим характером зміни струму в підстанційному силовому трансформаторі. Наступна стадія циклу стосується раннього періоду розплаву. Щоб оптимізувати процес розплаву, регулятор EAF може видавати команду на зміну положення відгалужень пристрою РПН трансформатора EAF. У циклі плавки зазвичай потрібно більше одного завантаження брукту, щоб заповнити піч.

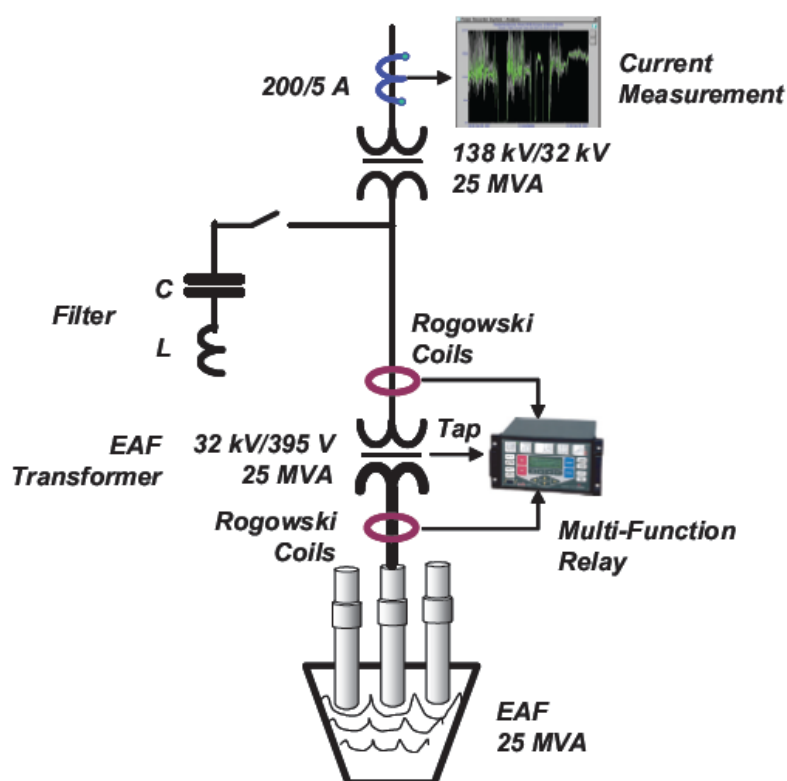


Рисунок 3.4: Функціонування EAF трансформатора

3.2 Розрахунок параметрів індукційного датчика струму на основі котушки Роговського

Залежно від цілей вимірювань до індукційних датчиків висуваються різні вимоги: при вимірюванні великих струмів в одиниці—десятки кА прийнятними значеннями чутливості є десятки мВ/кА, при вимірюваннях імпульсних струмів з широким частотним спектром важлива ширина смуги пропускання, для цілей релейного захисту актуальна чутливість і завадостійкість. Для всіх випадків важлива похибка вимірювань – як амплітудна, так і кутова. Котушки Роговського мають найбільше поширення при вимірюванні імпульсних струмів у техніці високих напруг, у високовольтних електрофізичних установках, при вимірюванні великих струмів промислової частоти [1, 9].

Традиційно як первинні датчики в системах релейного захисту та автоматики (РЗА) застосовують електромагнітні трансформатори струму (ТС) і трансформатори струму нульової послідовності (ТСНП), що мають низку недоліків: велика маса, насичення магнітного осердя при первинних струмах великої кратності або з аперіодичною складовою. Водночас застосування як датчика струму котушки Роговського має багато переваг, таких як широкий динамічний діапазон вимірювань, лінійність, широкий частотний діапазон, наявність гальванічної розв'язки, відсутність залежності від температури, малі габарити та вага, простота встановлення, і є хорошою альтернативою традиційним вимірювальним трансформаторам струму [4, 5, 6].

Відмінною особливістю датчиків струму є мала потужність вихідного сигналу порівняно з ТС та ТСНП, конструкції яких сформувалися досить давно, тому стандартні значення їхніх вихідних параметрів визначалися рівнем розвитку та станом засобів автоматики середини ХХ століття. Велика вихідна потужність ТС та ТСНП була виправданою, оскільки від них живилися реле автоматики та захисту, засоби вимірювань та реєстрації. Сучасні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) мають на своїх входах або сигнальні процесори з вбудованими АЦП, або окремі АЦП, які не вимагають таких потужних сигналів для отримання прийнятного відношення сигнал/шум

[4], що призвело до виникнення та широкого впровадження концепції датчиків струму малої потужності – *LPCT* (low power current transducers).

Як відомо, котушка Роговського — це тороїдальна котушка без магнітопроводу, розташована навколо провідника з вимірюваним струмом i , який створює магнітне поле, що індукуює ЕРС. $\varepsilon(t)$ в обмотці котушки:

$$\varepsilon(t) = -M \cdot di(t)/dt,$$

де M – взаємна індуктивність прямолінійного проводу, що проходить перпендикулярно площині котушки через її центр.

Оскільки сигнал на виводах котушки пропорційний швидкості зміни струму, то для його перетворення на сигнал, пропорційний вимірюваному струму, необхідний інтегруючий ланцюг, від властивостей якого залежать коефіцієнт передачі, фазовий зсув та смуга робочих частот [4]. При вимірюванні струмів промислової частоти зазвичай використовується активний аналоговий інтегратор. Параметри інтегратора визначають коефіцієнт передачі, лінійність, фазовий зсув та смугу робочих частот.

Розглянемо інтегруючий ланцюг на інвертуючому операційному підсилювачі (ОП) для випадку, коли джерело сигналу має активно-індуктивний характер, що відповідає схемі заміщення котушки Роговського (рис. 3.5). В загальному випадку дана схема заміщення застосовна для будь-яких джерел сигналу, що мають активно-індуктивний характер внутрішнього опору.

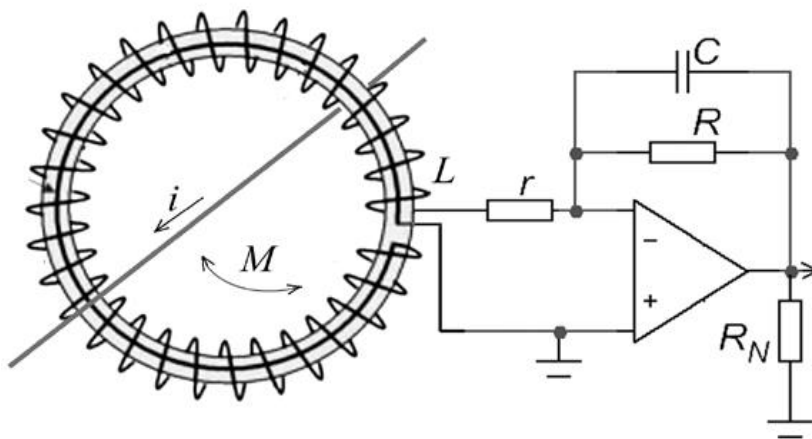


Рисунок 3.5. Спрощена схема заміщення датчика струму на основі котушки Роговського

Коефіцієнт передачі інвертуючого підсилювача визначається відомим виразом $K = -Z_{з.з.}/Z_{дж.}$ [7], де $Z_{з.з.}$ – повний опір у колі зворотного зв'язку; $Z_{дж.}$ – повний опір у колі джерела сигналу. При застосуванні як джерела сигналу диференціюючого індукційного датчика, наприклад за типом пояса Роговського, $Z_{дж.} = r + j \cdot \omega \cdot L$, де L – індуктивність; r – активний опір у колі джерела сигналу (більша частина – це опір котушки); ω – кутова частота. Інвертуючий підсилювач повинен виконувати функції інтегратора, тому коло зворотного зв'язку містить конденсатор з ємністю C і увімкнений паралельно йому резистор R . При практичній реалізації обійтися без цього резистора в колі зворотного зв'язку неможливо через виникнення значної напруги зміщення на виході ОП. Таким чином, повний опір кола зворотного зв'язку визначається виразом $Z_{з.з.} = R/(1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C)$. Впливом опору навантаження R_N ОП можна знехтувати, оскільки його вихідний сигнал подається на вхід АЦП мікропроцесора через буферний підсилювач з великим вхідним опором.

При вимірюванні синусоїдального струму $i(t) = i \cdot e^{j\omega t}$ наведена ЕРС буде

$$\varepsilon(t) = j \cdot \omega \cdot M \cdot i \cdot e^{j\omega t}.$$

У технічній документації загальноприйнятим є використання чутливості датчика $K(\omega) = U_{\text{вих.}}/i_{\text{вим.}}$, що має розмірність В/А. З урахуванням вищенаведених виразів, після перетворень, виділення реальної та уявної частин та введення позначень, чутливість буде визначатися виразом

$$K(\omega) = k_{\text{ОП}} \cdot \omega \cdot M \cdot \frac{\omega \cdot (\tau_{\text{дж.}} + \tau_{\text{з.з.}}) + j(1 - \omega^2 \cdot \tau_{\text{дж.}} \cdot \tau_{\text{з.з.}})}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot \tau_{\text{дж.}} \cdot \tau_{\text{з.з.}})^2 + \omega^2 (\tau_{\text{дж.}} + \tau_{\text{з.з.}})^2}}. \quad (3.1)$$

де, $k_{\text{ОП}} = R/r$ – коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача по постійному струму; $\tau_{\text{з.з.}} = R \cdot C$; $\tau_{\text{дж.}} = L/r$. Відмінною особливістю запропонованого підходу до проведеного аналізу індукційного датчика струму є застосування параметрів $\tau_{\text{з.з.}} = R \cdot C$, $\tau_{\text{дж.}} = L/r$, які можна інтерпретувати як постійні часу кіл джерела сигналу та зворотного зв'язку ОП. Параметри $\tau_{\text{дж.}}$ і

$\tau_{3.3.}$ вельми зручні при практичних розрахунках і суттєво спрощують розрахунки та експрес-аналіз схемотехнічних рішень. Амплітудно-частотна характеристика визначається модулем $|K(\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$ і має вигляд:

$$|K(\omega)| = k_{оп} \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot \tau_{дж} \cdot \tau_{3.3.})^2 + \omega^2 (\tau_{дж} + \tau_{3.3.})^2}}. \quad (3.2)$$

Найбільше значення модуля чутливості буде при $\omega = \omega_0$, де $\omega_0 = 1/\tau_0$, а $\omega_0 = \sqrt{\tau_{3.3.} \cdot \tau_{оп}} = \sqrt{k_{оп}} \cdot \sqrt{L \cdot C}$. Таким чином, частота, на якій АЧХ чутливості має максимум, визначається виразом:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_{оп}}},$$

$$|K(\omega)| = k_{оп} \cdot \frac{M}{(\tau_{дж} + \tau_{3.3.})}. \quad (3.3)$$

Фазо-частотна характеристика (ФЧХ) має вигляд:

$$K(\varphi) = \arctg\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) = \arctg\left(\frac{1 - \omega^2 \cdot \tau_{дж} \cdot \tau_{3.3.}}{\omega \cdot (\tau_{дж} + \tau_{3.3.})}\right). \quad (3.4)$$

Неважко переконатися, що при виконанні умови $\omega = \omega_0$ зсув по фазі буде відсутній. Якщо частота, на якій проводяться вимірювання, відрізняється від $\omega = \omega_0$, то буде наявний деякий фазовий зсув. При використанні датчика струму в релейному захисті від замикань на землю, заснований на вимірюванні струму нульової послідовності, фазовий зсув між струмом і напругою нульової послідовності є важливим діагностичним параметром. При вимірюваннях струму наявність фазового зсуву визначає значення кутової похибки, яка повинна бути мінімальною. Застосування виразу (3.4) дозволяє обчислити необхідну поправку по зсуву фази для усунення цієї систематичної похибки при подальшій цифровій або аналоговій обробці сигналу.

Типові значення індуктивності котушок Роговського, призначених для вимірювань струмів промислової частоти, становлять десятки мкГн, а їх активних опорів – одиниці Ом [4, 9]. Тому для практики становить інтерес випадок виконання нерівності $\tau_{дж} \ll \tau_{3.3.}$. Тоді вираз (2) спрощується:

$$|K(\omega)| = k_{оп} \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot \tau_{дж} \cdot \tau_{3.3.})^2 + (\omega \tau_{3.3.})^2}}. \quad (3.5)$$

А для частоти $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_{дж} \cdot \tau_{3.3.}}}$ і з урахуванням $\tau_{дж.} \ll \tau_{3.3.}$ вираз (3.3) прийме

вигляд

$$|K(\omega_0)| = k_{оп} \cdot \frac{M}{\tau_{3.3.}}. \quad (3.6)$$

Вираз (3.4) для фазового зсуву, з урахуванням прийнятого допущення $\tau_{дж.} \ll \tau_{3.3.}$, перетворюється до вигляду

$$K(\varphi) = \left(\frac{1 - \omega^2 \cdot \tau_{дж} \cdot \tau_{3.3.}}{\omega \cdot \tau_{3.3.}} \right).$$

Під час вимірювань сигналів у смузі частот загальноприйнятою є оцінка ширини смуги пропускання за рівнем -3 дБ, що відповідає зміні сигналу у 2 рази або рівню 0,707 від найбільшого значення, прийнятого за 1. Частотна смуга пропускання за рівнем -3 дБ для випадку $\tau_{дж.} \ll \tau_{3.3.}$ становить від $\omega_n = 1/\tau_{3.3.}$ до $\omega_v = 1/\tau_{дж.}$ Ширина цієї смуги може бути досить великою, і верхня гранична частота визначається індуктивністю та опором кола джерела сигналу. Платою за ширину смуги пропускання є низький коефіцієнт передачі, що ілюструє графік 1 на рис. 3.6. Під час вимірювання великих імпульсних струмів забезпечення широкої смуги пропускання є суттєво важливішим, а проблеми чутливості не існує через великі значення вимірюваних струмів: одиниці – десятки кА в імпульсі. При застосуванні датчиків струму для цілей релейного захисту при замиканнях на землю широка смуга пропускання затребувана лише при застосуванні методів, заснованих на реєстрації гармонік або перехідних процесів при переміжних однофазних замиканнях.

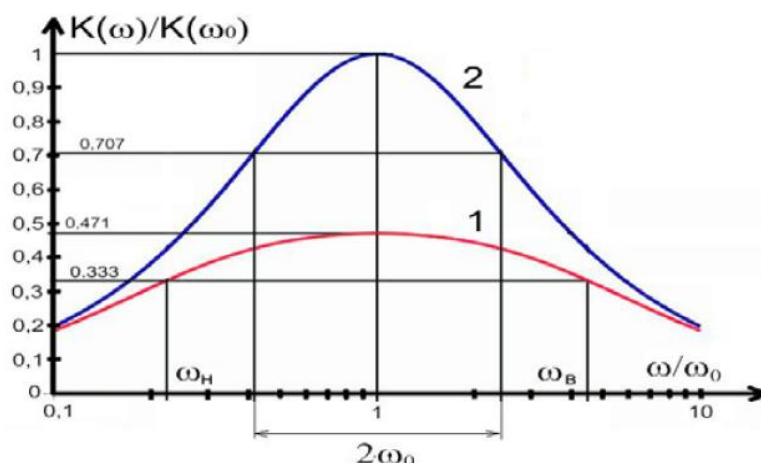


Рисунок 3.6. Крива 1 побудована для випадку $\tau_{дж.} \ll \tau_{3.3}$ за формулою (3.5) при $\tau_{3.3}/\tau_{дж.} = 16$. Крива 2 побудована для випадку $\tau_{дж.} = \tau_{3.3} = \tau_0$. Масштаб по осі абсцис логарифмічний.

Особливий інтерес становить випадок, коли $\tau_{дж.} = \tau_{3.3} = \tau_0$, що реалізовано для вимірювань відносно високочастотних процесів. На промисловій частоті виконати цю рівність досить складно через малу індуктивність при традиційній реалізації котушки Роговського. Тоді вираз (3.2) перетворюється до вигляду

$$|K(\omega)| = k_{оп} \cdot \frac{\omega \cdot M}{1 + (\omega \tau_0)^2}, \quad (3.7)$$

а ФЧХ буде мати вигляд

$$K(\varphi) = \arctg \left(\frac{1 - (\omega \cdot \tau_0)^2}{2\omega \cdot \tau_0} \right).$$

Ширина смуги пропускання за рівнем -3 дБ визначається границями

$$\omega_n = (2^{1/2} - 1) \cdot \omega_0 \text{ та } \omega_v = (2^{1/2} + 1) \cdot \omega_0 \text{ і становить } 2 \omega_0.$$

При $\omega = \omega_0 = 1/\tau_0$ коефіцієнт передачі має максимальне значення:

$$|K(\omega_0)| = k_{оп} \cdot \frac{M}{2\tau_0}. \quad (3.8)$$

Умова $\tau_{дж.} = \tau_{3.3} = \tau_0$ відповідає випадку узгодження кіл на частоті $\omega = \omega_0$, коли характеристичний опір узгоджувальної ланки $Z_0 = (L/C)^{1/2}$ дорівнює середньгеометричному значенню узгоджуваних активних опорів $Z_0 = (R \cdot r)^{1/2}$.

Висновки по третьому розділу

Використання котушок Роговського в релейному захисті покращує функціонування захисту завдяки збільшенню надійності роботи реле (захист може відчувати і працювати при внутрішніх замиканнях з невеликими струмами пошкодження) та забезпечує високу безпеку при зовнішніх коротких замиканнях (при струмах, що перевищують 60 кА).

Застосування індукційних датчиків струму на основі котушки Роговського замість традиційних трансформаторів струму є стійкою тенденцією розвитку релейного захисту та автоматики.

ВИСНОВКИ

Розглянуто переваги використання перетворювачів струму типу «Петля Роговського» як датчиків струму в системі релейного захисту електрообладнання. Пропонується використання перетворювачів типу «Петля Роговського» в системі диференціального захисту високовольтного силового трансформатора, побудована віртуальна модель системи. Розглянуто використання датчиків струму типу «петля Роговського» в диференціальному захисті силових високовольтних трансформаторів. За результатами моделювання побудовано залежність різниці вторинних струмів від небалансу сигналів сторін диференціального захисту. На основі виконаного моделювання та аналізу роботи перетворювачів струму типу «Петля Роговського», виконаних у роботі, пропонується спосіб виконання диференціального захисту та визначення її уставки. Результати дослідження показують збільшення чутливості диференціального захисту, виконаного на основі перетворювачів струму типу «Петля Роговського», порівняно із захистом на традиційних трансформаторах струму. Пропонується формула для розрахунку уставки за струмом для диференціального захисту з використанням перетворювачів типу «петля Роговського» як датчиків струму.

1. Застосування індукційних датчиків струму на основі котушки Роговського замість традиційних трансформаторів струму є стійкою тенденцією розвитку релейного захисту та автоматики.

2. При розрахунку параметрів індукційного датчика або при порівняльній оцінці таких датчиків достатньо використовувати постійну часу котушки, постійну часу інтегратора та коефіцієнт передачі по постійному струму інтегратора.

3. Чутливість датчика, його смуга пропускання та внесений фазовий зсув є взаємопов'язаними параметрами і для практичного застосування були розглянуті два випадки співвідношень між постійними часу котушки та інтегратора $\tau_{дж.} \ll \tau_{з.з.}$ і $\tau_{дж.} = \tau_{з.з.}$ і отримані прості розрахункові формули.

4. У разі узгодження на частоті $\omega = \omega_0$ існують наступні співвідношення між параметрами: $\tau_{дж.} = \tau_{з.з.}$, $Z_0 = (L/C)^{1/2}$ та $Z_0 = (R \cdot r)^{1/2}$. Показано, що при виконанні зазначених умов чутливість датчика має найбільше значення.

5. Практичне застосування індукційного датчика струму на основі котушки Роговського дозволяє реалізувати чутливу систему моніторингу стану ізоляції за струмами витоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дяченко М.Д., Батора М.Р. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ СТРУМУ З АБСОЛЮТНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ МІЦНОЮ // ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ 2021р. Серія: Технічні науки Вип. 43
2. Д'яченко М.Д. Цифровий захист (апаратне та алгоритмічне забезпечення): навч. посібник / М.Д. Д'яченко, С.К. Піднебенна; М-во освіти і науки України, Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь: ПДТУ, 2014. – 398 с.
3. IEEE Std C37.235™, Guide for the Application of Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes.
4. IEEE Std C37.92™, Analog Inputs to Protective Relays from Electronic Voltage and Current Transducers.
5. IEC Standard 60044-8™, Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers.
6. Lj. A. Kojovic, “Innovative Non-conventional Current Transformers for Advanced Substation Designs and Improved Power System Performance”, CIGRE 2008, Paris, France, 2008.
7. <https://ua.x-fullstartech.com/info/operating-principle-of-rogerski-coil-47826091.html>
8. <https://www.mibotransformer.com/uk/what-is-a-rogerski-coil/>
9. a.kbs-connector.com/info/what-is-rogerski-coil-62391682.html
10. Kojovic L. High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements / L. Kojovic // The Line. – 2002. – Pp. 7-8.