

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітньо-професійна програма
«Системи електропостачання промислових підприємств, міст та локальних
об'єктів»

На тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ КМЕМ НЕК «УКРЕНЕРГО»

КНУ.МР.141.25.667с-05

Здобувач
групи СЕП-24м

/підпис/

Владислав ЗАКУРЕНКО

/ім'я, прізвище/

Завідувач кафедри:
д.т.н., проф.

/підпис/

Олег СІНЧУК

/ім'я, прізвище/

Керівник:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ім'я, прізвище/

Гарант ОП:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ім'я, прізвище/

Криворізький національний університет
Факультет: *електротехнічний*
Освітній рівень: *магістр*
Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**
Закурєнка Владислава Віталійовича

1. Тема роботи: Дослідження способів дистанційного захисту ліній електропередачі КМЕМ НЕК «Укренерго»
2. Строк подання студентом роботи: 16 грудня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: полягає в проведенні порівняльного аналізу застосування різних типів реле для дистанційного захисту магістральних ліній електропередачі 330 кВ НЕК «Укренерго» для підвищення надійності електропостачання
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):
I. Загальні дані про системи дистанційного захисту магістральних ліній електропередачі; II. Теоретичне підґрунтя налаштування дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі; III. Оцінювання якості дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі 330 кВ
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Характеристики реле дистанційного захисту лінії електропередачі довжиною 42 км; Моделювання спрацювання реле дистанційного захисту лінії електропередачі довжиною 42 км; Моделювання спрацювання реле дистанційного захисту лінії електропередачі довжиною 42 км у зворотному напрямку; Модель для симуляції роботи дистанційного захисту лінії електропередачі 330 кВ; Моделювання роботи імідансного реле; Моделювання роботи M_{ho} реле

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
II	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
III	Олексій МИХАЙЛЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Обробка літератури	01.09.2025–14.09.2025
2	Виконання розділу 1	15.09.2025–01.10.2025
3	Виконання розділу 2	02.10.2025–25.10.2025
4	Виконання розділу 3	26.10.2025–14.11.2025
5	Завершення оформлення роботи	15.11.2025–24.11.2025
6	Антиплагіатна перевірка	25.11.2025–16.12.2025
7	Підготовка презентації та доповіді	16.12.2025–17.12.2025

Дата видачі завдання: 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____

Владислав ЗАКУРЕНКО

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено питання проектування, налаштування та оцінки ефективності дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі напругою 330 кВ завдовжки 42 км, що з'єднує підстанції «Дніпровська-750» і «Першотравнева-330».

Об'єкт дослідження – процеси передачі електричної енергії в високовольтних магістральних лініях електропередачі.

Предмет дослідження – дистанційний захист лінії електропередачі магістральна лінія електропередачі напругою 330 кВ, зокрема, налаштування, моделювання та оцінювання ефективності роботи в умовах різних типів коротких замикань.

На основі теоретичних розрахунків визначено параметри лінії, імпеданси окремих ділянок, струми короткого замикання та коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів. Для забезпечення надійного захисту розроблено налаштування трьох зон дистанційного захисту для двох типів реле – імпедансного та Mho.

Проведено статичне моделювання спрацьовування захисту при різних типах коротких замикань (однофазних, двофазних, на землю) з урахуванням реальних умов експлуатації, зокрема наявності трансформатора 750/330 кВ та індуктивного навантаження. Порівняльний аналіз показав, що обидва типи реле забезпечують високу селективність та швидкодію за ідеальних умов, проте Mho-реле має суттєві переваги завдяки вбудованій спрямованості, стійкості до високого перехідного опору та коливань потужності.

Результати роботи підтверджують доцільність застосування Mho-реле як основного рішення для захисту сучасних магістральних ліній електропередачі, де високі вимоги до надійності, селективності та стійкості до складних аварійних режимів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, ДИСТАНЦІЙНИЙ ЗАХИСТ.

ЗМІСТ

Анотація	2
Вступ.....	5
Розділ 1. Загальні дані про системи дистанційного захисту магістральних ліній електропередачі.....	6
1.1 Загальні дані про магістральні лінії електропередачі НЕК «Укренерго».....	6
1.2 Характеристика дистанційного захисту ліній електропередачі	8
1.2.1 Імпедансне реле	11
1.2.2 Реле Mho	13
1.2.3 Полігональне реле	15
1.3 Сучасні здобутки в галузі схем дистанційного захисту та дистанційних реле.....	16
Висновки до розділу 1	22
Розділ 2. Теоретичне підґрунтя налаштування дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі	23
2.1 Розрахунки величин для описання магістральної лінії електропередачі 23	
2.2 Розрахунок характеристик зон дистанційного захисту з імпедансним реле 25	
2.3 Розрахунок характеристик зон дистанційного захисту з Mho реле	28
2.4 Симуляція роботи дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі в статисти.....	31
Висновок до розділу 2	36
Розділ 3. Оцінювання якості дистанційного захисту магістральної лінії електропередач 330 кВ.....	38

3.1	Модель для оцінювання якості дистанційного захисту	38
3.2	Модельна симуляція дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі	41
3.2.1	Однофазні замикання	41
3.2.2	Двофазні замикання	46
	Висновки до розділу 3	51
	Висновки	52
	Список використаних джерел	54

ВСТУП

Збільшення потужності енергетичних потоків у магістральних лініях електропередачі, інтеграція відновлюваних джерел енергії, використання гнучких пристроїв передачі на змінному струмі, розширення міжсистемних зв'язків призводять до ускладнення режимів роботи електромереж. Останнім часом до цього ще додалися наслідки бойових дій. Це підвищує ймовірність виникнення коротких замикань та несиметричних режимів, що потребують швидкого й точного виявлення місця пошкодження.

Дистанційний захист є одним з найефективніших способів виявлення пошкоджень на магістральних лініях електропередачі високої напруги. Вони дозволяють визначати відстань до місця аварії за виміряними струмами та напругами, забезпечуючи вибірковість спрацювання без потреби в окремих каналах зв'язку між підстанціями. Проте класичні методи мають обмеження, пов'язані з впливом зміни параметрів лінії, навантаження, перехідних процесів та несиметричних режимів. Це створює потребу у виявленні найякісніших методів дистанційного захисту, що можуть використовуватись у реальних експлуатаційних умовах.

Дана магістерська робота спрямована на порівняння характеристик різних типів дистанційного захисту, аналіз ефективності їх застосування, оптимізацію зон захисту, а також на впровадження реле дистанційного захисту того чи іншого способу дії для ідентифікації та запобігання аварійним режимам.

Актуальність обумовлюється підвищенням ефективності та адаптивності дистанційного захисту, що є ключовим чинником забезпечення стабільності, безпеки та безперервності електропостачання в сучасних енергосистемах.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

1.1 Загальні дані про магістральні лінії електропередачі НЕК «Укренерго»

Магістральні електричні мережі (MEM), що перебувають в управлінні Національної енергетичної компанії «Укренерго», становлять основу об'єднаної енергетичної системи України та забезпечують передачу електричної енергії від електростанцій до регіональних розподільчих мереж, великих промислових споживачів і міжнародних міждержавних перетинів.

Ці мережі функціонують на напругах 220, 330, 400, 500 та 750 кВ і мають протяжність у десятки тисяч кілометрів, що робить їх однією з найбільш розгалужених високовольтних систем у Європі (див. рис. 1.1). Основною функцією магістральних мереж є забезпечення надійної та безперебійної передачі електроенергії в масштабах усієї країни, підтримання необхідного балансу потужностей, частоти та напруги, а також створення умов для обміну електроенергією з енергосистемами суміжних держав.

MEM НЕК «Укренерго» характеризуються високим числом технічних засобів, які включають використання комутаційних апаратів, релейного захисту, автоматизації та систем диспетчерського управління. Особливе місце посідає використання цифрових технологій моніторингу стану обладнання, що дозволяє підвищити ефективність роботи мереж і запобігати аваріям.

Високовольтні підстанції, які входять до складу MEM, оснащені потужними автотрансформаторами, вимикачами, пристроями компенсації реактивної потужності та сучасними системами релейного захисту, що забезпечують гнучкість і стійкість енергосистеми до змінних режимів навантаження та зовнішніх впливів.

З технічного погляду, MEM поділяються на регіональні енергетичні кільця, які з'єднані між собою високовольтними перетинами, що дозволяє

здійснювати маневрування потоками потужності залежно від потреб споживачів і стану генерації. Завдяки такій структурі забезпечується енергетична безпека, зменшується ризик масштабних аварій і підвищується гнучкість у роботі об'єднаної енергосистеми. Після синхронізації енергосистеми України з континентальною європейською мережею ENTSO-E у 2022 році роль MEM НЕК «Укренерго» ще більше зростає, оскільки вони стали ключовою ланкою для міжнародних енергетичних потоків та інтеграції України до європейського енергетичного простору.

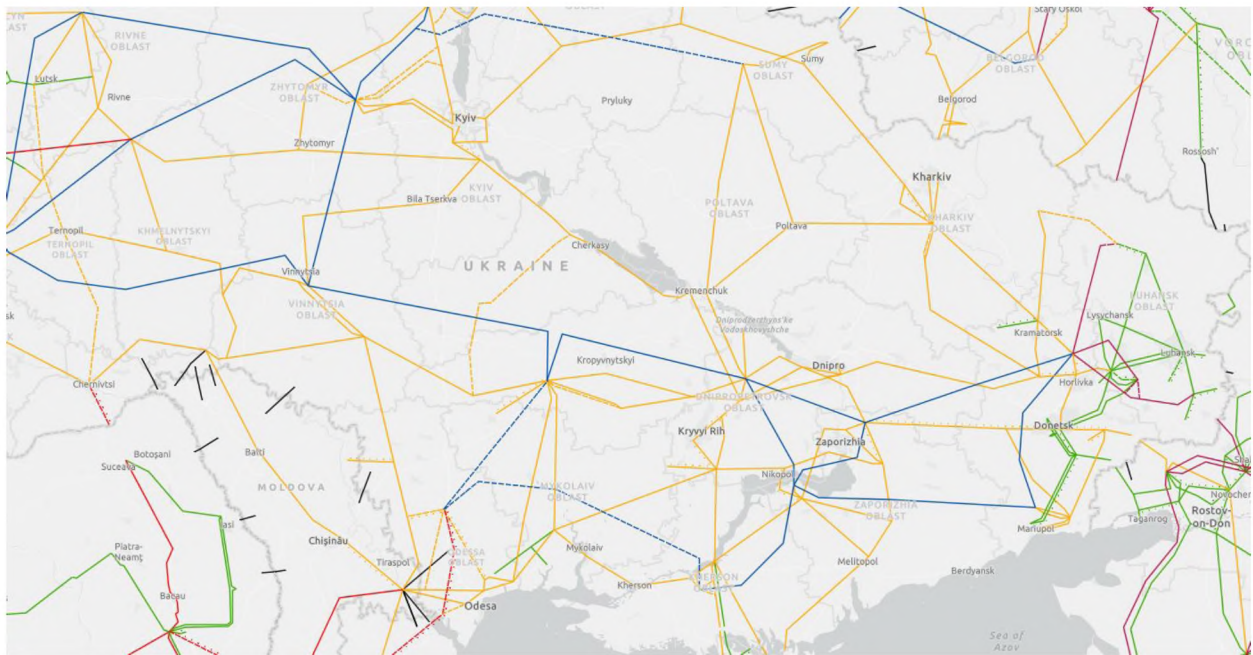


Рисунок 1.1 – Мапа магістральних електричних мереж України: синій колір – лінії 750 кВ; жовтий колір – 330 кВ; червоний колір – 400 кВ; зелений колір – 220 кВ [1]

Загалом MEM НЕК «Укренерго» є стратегічно важливою інфраструктурою, від якої залежить стабільність функціонування всієї енергетичної системи держави. Їх розвиток орієнтований на підвищення пропускної спроможності, модернізацію обладнання, впровадження автоматизованих систем управління, а також розбудову нових міждержавних інтерконекторів для посилення енергетичної інтеграції з Європою. У перспективі «Укренерго» планує створення гнучкої, цифрової та стійкої системи магістральних мереж, здатної ефективно функціонувати в умовах

децентралізації генерації, збільшення частки відновлюваних джерел енергії та зростання вимог до якості та надійності електропостачання.

1.2 Характеристика дистанційного захисту ліній електропередачі

Дистанційний захист ліній електропередачі є одним з основних і найбільш поширених видів релейного захисту в системах передавання електроенергії середньої та високої напруги. Його головна функція полягає у швидкому й надійному виявленні коротких замикань та інших аварійних режимів на лінії з одночасним визначенням відстані до місця пошкодження. Принцип дії дистанційного захисту базується на вимірюванні комплексного опору між місцем встановлення реле та місцем КЗ. Оскільки опір лінії пропорційний її довжині, то, порівнюючи виміряний імпеданс із уставками реле, можна визначити, чи знаходиться пошкодження в межах контрольованої зони, і відповідно прийняти рішення про відключення пошкодженої ділянки.

Структурно дистанційний захист складається з вимірювального елемента, який визначає імпеданс, логічних і часових блоків, що забезпечують селективність та узгодження дії із сусідніми пристроями захисту, а також елементів керування комутаційними апаратами, які виконують відключення лінії при виявленні аварії. У сучасних цифрових реле ці функції реалізуються мікропроцесорними системами, що обробляють миттєві значення струмів і напруг у реальному часі та дозволяють забезпечити високу точність визначення параметрів пошкодження навіть у складних умовах.

Дистанційний захист має кілька зон дії, які перекривають одна одну, що дозволяє забезпечити як основний, так і резервний захист лінії. Перша зона охоплює приблизно 80–90 % довжини лінії і спрацьовує миттєво, друга й третя зони мають більшу протяжність і спрацьовують із витримкою часу для резервування суміжних ділянок. Така багатозонна побудова гарантує

селективність і запобігає одночасному відключенню декількох ділянок мережі.

Існують різні типи дистанційних реле, серед яких найбільш поширеними є імпедансні, Mho -реле та полігональні реле. Імпедансне реле має зону спрацювання у вигляді кола на комплексній площині опору, Mho -реле – дугоподібну або кругову характеристику, що автоматично враховує кут навантаження системи, а полігональне реле забезпечує розширену область захисту, що підвищує чутливість і надійність у випадках несиметричних пошкоджень. У практиці сучасного енергетичного господарства часто використовуються комбіновані схеми, які поєднують переваги різних типів реле, зокрема підвищену стійкість до коливань напруги, перехідних процесів і впливу навантаження.

Сучасні системи дистанційного захисту інтегруються у загальні системи автоматизації підстанцій і диспетчерського управління, що дозволяє не лише відключати пошкоджені ділянки, але й виконувати аналіз подій, реєстрацію аварійних параметрів, автоматичне відновлення схеми живлення після усунення пошкодження. Використання цифрових технологій, алгоритмів штучного інтелекту, а також методів адаптивного налаштування у новітніх реле забезпечує підвищену точність і швидкодію, що є критично важливим для стабільності енергосистеми.

Таким чином, дистанційний захист ліній електропередачі є ключовим елементом системи релейного захисту, який поєднує високу швидкодію, надійність і селективність, забезпечуючи безпечне функціонування магістральних і розподільчих мереж. Його розвиток спрямований на вдосконалення вимірювальних алгоритмів, підвищення стійкості до нестабільних режимів та інтеграцію з інтелектуальними системами управління енергосистемою.

Проілюструємо базовий принцип дистанційного захисту. Розглянемо однофазну схему, показану на рис. 1.2 а [2].

Дистанційне реле вимірює напругу (U) і струм (I) на одному кінці лінії. Реле має реагувати на короткі замикання, що виникають до заздалегідь визначеної точки ЛЕП у контрольованій зоні, і обмежувати КЗ, що виходять за межі цієї точки.

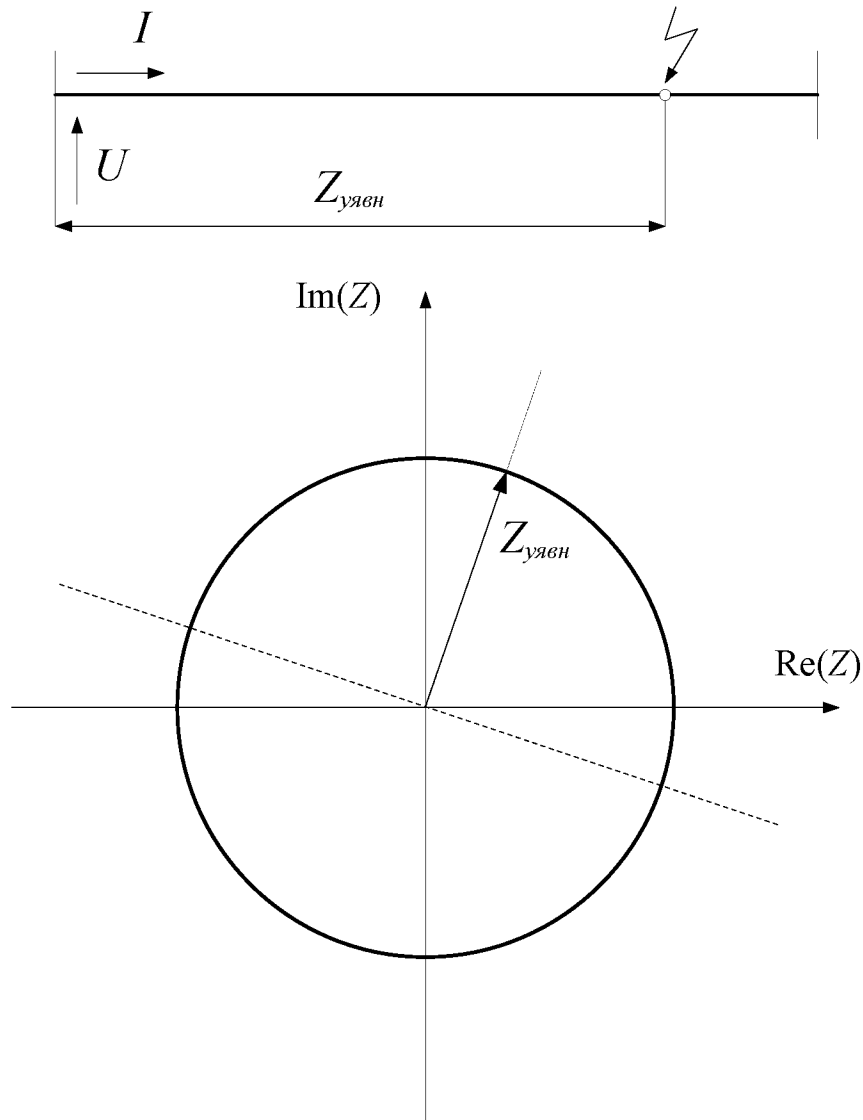


Рисунок 1.2 – До пояснення принципу дії дистанційного захисту [2]

Позначимо імпеданс між реле і заданою точкою як $Z_{уявн}$. Ми можемо використовувати поняття імпедансу і математику комплексних чисел, щоб визначити рівняння спрацьовування дистанційного реле [2]:

$$\frac{|U|}{|I|} < |Z_{уявн}|. \quad (1.1)$$

Рівняння (1.1) визначає концентричне коло на площині імпедансу (рис. 1.2 б). Ця робоча характеристика іноді називається омічною характеристикою. Контролюючи цю характеристику за допомогою спрямованого елемента, ми отримуємо елемент спостерігаючий за лінією до відстані заданою точкою з імпедансом $Z_{уявн}$ [2].

Принцип роботи усіх дистанційних захистів з базується на вимірюванні електричного опору (імпедансу) лінії електропередачі від місця встановлення захисту до точки КЗ. Основна ідея полягає в тому, що величина цього імпедансу прямо пропорційна відстані до місця пошкодження.

Розглянемо основні методи дистанційного захисту.

1.2.1 Імпедансне реле

Імпедансне реле реагує на співвідношення між напругою U та струмом I , які підводяться до реле захисту з трансформаторів напруги (ТН) та трансформаторів струму (ТС). Імпеданс, який фіксує реле, розраховується за законом Ома: $Z_{уявн} = U/I$, де U та I – це вторинні значення напруги та струму відповідно, що вимірюються на вводі захисту.

При КЗ у ЛЕП, що захищається, напруга U падає, а струм I зростає, внаслідок чого виміряний імпеданс Z_R зменшується. Чим ближче КЗ до місця встановлення захисту, тим меншим буде $Z_{уявн}$. Захист спрацьовує, коли виміряний імпеданс $Z_{уявн}$ стає меншим за встановлене значення уставки $Z_{уст}$, тобто коли виконується умова $Z_{уявн} < Z_{уст}$. Уставка імпедансу $Z_{уст}$ для кожної зони захисту встановлюється відповідно до опору лінії до кінця цієї зони. Якщо врахувати коефіцієнти трансформації ТН (K_U) і ТС (K_I), то первинний імпеданс $Z_{КЗ}$, який відповідає виміряному реле Z_R , визначається:

$$Z_{КЗ} = Z_{уявн} \frac{K_U}{K_I}. \quad (1.2)$$

Характеристика імпедансного реле показана на рис. 1.3 а.

Дистанційний захист зазвичай має декілька зон дії з різними уставками імпедансу та витримками часу. Наприклад, перша зона ($Z_{уст1}$) захищає більшу частину лінії (наприклад, 80-90%) майже без витримки часу ($t \approx 0$). Друга зона ($Z_{уст2}$) охоплює всю лінію і частину сусідньої, діючи з витримкою часу $t_2 > t_1$, забезпечуючи резервування. Третя зона ($Z_{уст3}$) може резервувати суміжні елементи з $t_3 > t_2$.

Відмінність імпедансного реле, що зони захисту в ньому мають вигляд кіл із загальним центром.

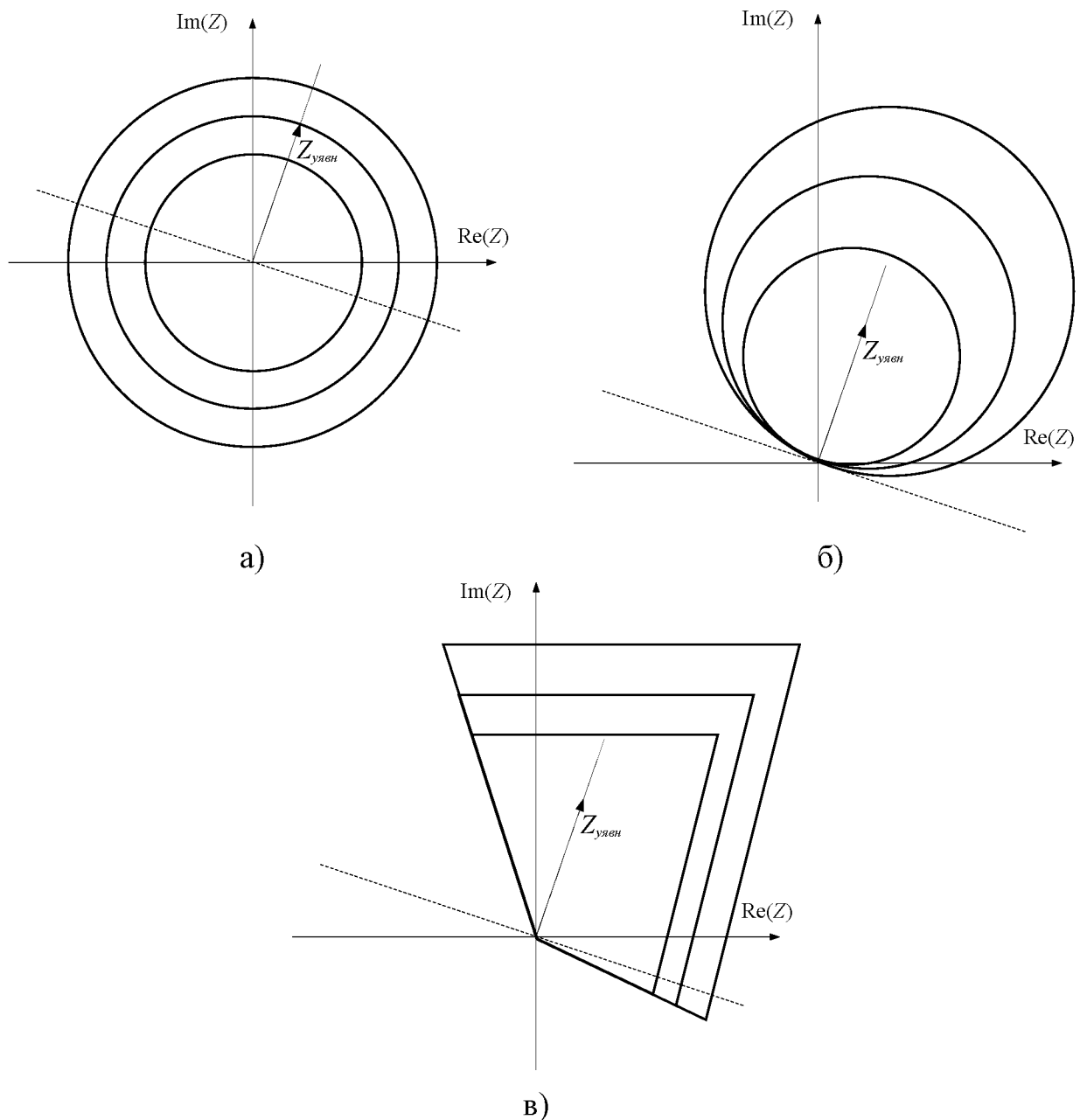


Рисунок 1.3 – Характеристики реле дистанційного захисту: а) імпедансне; б) Mho ; в) полігональне

Таким чином, селективність захисту (здатність відключати лише пошкоджений елемент) забезпечується за рахунок ступенчастого часу спрацювання, що визначається величиною виміряного імпедансу.

1.2.2 Реле Mho

Принцип роботи дистанційного захисту з реле Mho (або реле провідності) також ґрунтується на вимірюванні комплексного електричного опору (імпедансу) лінії від місця встановлення захисту до точки короткого

замикання (КЗ). На відміну від звичайного імпедансного реле, яке реагує лише на величину імпедансу ($|Z_{уявн}|$), реле Mho є спрямованим і реагує як на величину імпедансу, так і на кут між напругою U та струмом I . Реле Mho створює вибіркоковий момент, який залежить від напруги U та струму I , що надходять з вимірювальних трансформаторів, а також від кута зсуву фаз φ між ними [3, 4].

Принцип дії реле Mho може бути описаний через співвідношення між величиною напруги, струму та кутом зсуву фаз, або через вимірний імпеданс $Z_{уявн} = U/I$ та його порівняння з характеристичним імпедансом реле Z_{PB} (уставкою). Умова спрацювання реле Mho, виражена через крутий момент M , який діє на рухому частину реле (у електромеханічних реле) або в алгоритмі мікропроцесорного захисту, має вигляд: $M = K_1 \cdot I^2 - K_2 \cdot U \cdot I \cdot \cos \theta - \varphi > 0$, де I та U – струм і напруга, φ – кут зсуву фаз між U та I , θ – кут максимальної чутливості реле, що зазвичай відповідає куту імпедансу лінії, K_1 і K_2 – коефіцієнти, що визначають уставку реле. Граничне значення, при якому $M = 0$, відповідає характеристиці спрацювання реле Mho на комплексній площині $R-X$ (опір-реактивний опір), яка має вигляд кола, що проходить через початок координат.

Умова спрацювання також може бути записана через імпеданс $Z_{уявн}$:

$$\left| Z_{уявн} - \frac{1}{2} Z_{PB} \right| \leq \frac{1}{2} |Z_{PB}|, \quad (1.3)$$

де Z_{PB} – це вектор уставочного імпедансу реле.

Характеристика імпедансного реле показана на рис. 1.3 б.

Реле Mho спрацьовує, коли вимірний імпеданс Z_R потрапляє всередину цього кола. Завдяки тому, що характеристика спрацювання проходить через початок координат, реле Mho є природно спрямованим, оскільки при КЗ позаду нього (у зворотному напрямку) кут φ змінюється

таким чином, що умова спрацювання не виконується, і реле не спрацює на зовнішні КЗ. Як і у звичайному дистанційному захисті, використовується кілька зон захисту з різними уставками Z_{PB} та витримками часу t_n , що забезпечує селективність та резервування.

1.2.3 Полігональне реле

Принцип роботи дистанційного захисту з чотирикутним реле (або полігональним реле) базується на вимірюванні комплексного електричного опору (імпедансу) лінії $Z_{уявн}$ до точки короткого замикання (КЗ) і визначенні, чи потрапляє цей імпеданс у спеціально задану на комплексній площині $R-X$ (опір-реактивний опір) зону спрацювання, яка має форму чотирикутника або іншого багатокутника. Чотирикутне реле є найчастіше реалізується в мікропроцесорних захистах, оскільки його характеристика складно реалізується електромеханічними або навіть статичними аналоговими реле. Перевага цієї форми характеристики полягає в тому, що вона дозволяє точно охопити лінійний імпеданс лінії, не заходячи в зони можливих режимів навантаження або качань, а також незалежно контролювати складові імпедансу: активний опір $R_{уявн}$ та реактивний опір $X_{уявн}$. Імпеданс, виміряний реле, розкладається на активну та реактивну складові: $Z_{уявн} = R_{уявн} + jX_{уявн}$, де $R_{уявн} = |Z_{уявн}| \cos \varphi$ і $X_{уявн} = |Z_{уявн}| \sin \varphi$. Умова спрацювання чотирикутного реле визначається системою нерівностей, які обмежують виміряний імпеданс $Z_{уявн}$ чотирма прямими лініями на площині $R-X$. Наприклад, для типової зони захисту, обмеженої мінімальним і максимальним реактивним опором та двома лініями, паралельними ідеальному куту лінії, нерівності можуть виглядати так:

$$\begin{aligned} X_{\min} &\leq X_{уявн} \leq X_{\max}; \\ R_{уявн} &\leq R_{зсув} - X_{уявн} \cdot \operatorname{ctg} \delta - 90^\circ; \\ R_{уявн} &\geq R_{зсув} - X_{уявн} \cdot \operatorname{ctg} \delta + 90^\circ, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $X_{\min}$, $X_{\max}$ – граничні значення реактивного опору, які обмежують зону згори та знизу,

$R_{зсув}$ – активний опір, що визначає зсув ліній,

δ – кут імпедансу лінії, що захищається.

Проте, простіше умову спрацювання як форму чотирикутника задати у вигляді перетину чотирьох напівплощин, кожна з яких визначається однією стороною багатокутника. Реле спрацює, якщо імпеданс $Z_{уявн}$ одночасно задовольняє всі чотири нерівності:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z_{уявн} \cdot e^{-j\alpha_1} &\leq \operatorname{Re} Z_{уст1} \cdot e^{-j\alpha_1} ; \\ \operatorname{Re} Z_{уявн} \cdot e^{-j\alpha_2} &\leq \operatorname{Re} Z_{уст2} \cdot e^{-j\alpha_2} ; \\ \operatorname{Re} Z_{уявн} \cdot e^{-j\alpha_3} &\leq \operatorname{Re} Z_{уст3} \cdot e^{-j\alpha_3} ; \\ \operatorname{Re} Z_{уявн} \cdot e^{-j\alpha_4} &\leq \operatorname{Re} Z_{уст4} \cdot e^{-j\alpha_4} , \end{aligned} \quad (1.5)$$

де α – кут, перпендикулярний до k-ї сторони;

$Z_{устk}$ – точка на k-й стороні, що визначає її положення.

Характеристика імпедансного реле показана на рис. 1.3 в.

Як і в інших дистанційних захистах, чотирикутне реле використовує ступінчастий принцип часу, де різні зони захисту мають власні чотирикутні характеристики та відповідні витримки часу t_n , забезпечуючи селективне вимкнення пошкодженого елемента.

1.3 Сучасні здобутки в галузі схем дистанційного захисту та дистанційних реле

У [5] запропоновано адаптивне динамічне Mho-реле на основі фазового компаратора для захисту ліній із тиристорним послідовним компенсатором (TCSC). Реле використовує коефіцієнт імпедансу для виявлення несправностей і порівняння струмів для ідентифікації зони TCSC. Поляризація здійснюється за напругою позитивної послідовності, а вплив TCSC компенсується через оцінку його імпедансу. Схема не потребує

синхронізованої передачі даних і показала високу точність та стійкість до різних видів КЗ і коливань потужності у тестах на системах IEEE 9-шин і IEEE 39-шин.

У [6] розроблено двоступеневе адаптивне чотирикутне реле, яке незалежно коригує резистивну та реактивну межі зони захисту з урахуванням реактивності TCSC. Завдяки модифікованому методу Такагі та новому куту нахилу, реле ефективно працює в усіх режимах TCSC, виявляючи навіть високоомічні КЗ. Підходи перевірені на моделях IEEE 9-шин і IEEE 39-шин, прості у реалізації, не вимагають складної фільтрації чи синхронізації, і придатні для різних типів ліній – коротких, довгих, компенсованих і некомпенсованих.

У [7] запропоновано оригінальний алгоритм для зони 1 дистанційного захисту довгих паралельних ліній без спільної шини, який повністю враховує взаємний зв'язок, ємнісні та хвильові ефекти. Алгоритм використовує напругу нульової послідовності паралельної лінії як додатковий вхід, що робить його придатним для різних конфігурацій шин, де вимірювання струму та напруги нульової послідовності є практично можливим. Розробка зосереджена на однофазному замиканні на землю і сумісна з реалізацією в реальному часі. За допомогою теорії графів показано, що підхід з постійними коефіцієнтами компенсації нульової послідовності залишається точним для ліній завдовжки до 800 км, що дозволяє його використання в адаптивних схемах захисту разом із модулями виявлення високоомних замикань.

У [8] запропоновано нову методологію дистанційного захисту, що поєднує імпедансні та концентричні характеристики для виявлення КЗ, несправних фаз і коливань потужності. При виявленні КЗ визначення пошкоджених фаз ґрунтується на розташуванні видимого імпедансу шести елементів реле відносно їх концентричних характеристик. Після цього активуються відповідні елементи, які обчислюють коректний імпеданс і формують сигнал відключення за умови спрацьовування зони. Методологію перевірено в моделі WSCC Nine Bus System у MATLAB/Simulink при різних

типах КЗ та коливаннях потужності. Результати підтвердили здатність алгоритму точно ідентифікувати пошкоджені фази навіть за складних умов – зокрема, при розвиваючих і міжфазних КЗ. Реле на основі цієї методології видає сигнал відключення за один цикл при звичайних КЗ і за 1,5 циклу – при складних.

У [9] представлено новий алгоритм дистанційної захисту на основі миттєвих значень напруги та струму. Спочатку аналізується миттєвий розподіл напруги вздовж лінії електропередачі змінного струму. Потім представлено принцип дистанційної захисту на основі інкрементальних величин. Також аналізується вплив кута відхилення на представлений алгоритм і пропонується рішення для умов відносно невеликого кута відхилення. Нарешті, результати всебічного моделювання у PSCAD/EMTDC підтверджують ефективність представленої дистанційної захисту на основі інкрементальних величин.

[10] досліджує вплив статичного синхронного послідовного компенсатора (SSSC) та послідовного ємнісної компенсації (SCC) на дистанційний захист і пропонує метод їхнього нейтралізування. Метод використовує дані фазових вимірювальних пристроїв (PMU), які фіксують напругу на клеммах компенсаторів і передають їх до реле для корекції вимірюваної напруги. Моделювання охоплює різні режими роботи SSSC/SCC та типи КЗ (міжфазні та на землю). Ефективність методу підтверджується через межі спрацьовування реле – він усуває спотворення імпедансу за будь-яких значень опору КЗ і запобігає помилковим спрацьовуванням.

У [11] запропоновано схему дистанційного захисту для ліній, підключених до фотоелектричних станцій, яка не залежить від параметрів станції чи опору замикання. Метод ґрунтується на еквівалентних параметрах мережі позитивної послідовності, розрахованих за локальними вимірами напруги та струму до КЗ без потреби в каналі зв'язку. Ці параметри використовуються для компенсації опору замикання та точного визначення місця пошкодження. Оскільки розрахунок базується лише на мережі

позитивної послідовності, метод універсальний для різних мереж. Його ефективність підтверджено на тестових системах WSCC 9-шин та IEEE 30-шин при різних умовах КЗ і роботи фотоелектричних станцій.

У [12] наведено огляд проблем дистанційного захисту ліній із джерелами на основі інверторів. Проблеми класифіковано за причинами (пов'язаними з особливостями інверторних джерел) та наслідками – загальними (помилкові спрацьовування або відмова захисту) і специфічними (відмови окремих елементів реле). Особливу увагу приділено аналізу наукової літератури від виробників реле, оскільки вона краще відображає реальні виклики. Причини та наслідки узагальнено в таблицях, включаючи випадки, коли їх неможливо чітко ідентифікувати в джерелах.

У [13] показано, що опір КЗ викликає помилкову роботу традиційного дистанційного захисту. Для його компенсації запропоновано будувати віртуальну вимірювану напругу на основі напруги в точці КЗ, струму та імпедансу. На цій основі розроблено дві схеми захисту: Схема I – порівнює амплітуди оригінальної та віртуальної напруг для виявлення КЗ у зоні/поза зоною; Схема II – додатково використовує спеціальний синхронізований фазор напруги для підвищення чутливості. Обидві схеми нечутливі до опору КЗ та струму навантаження і працюють при всіх типах несправностей, причому Схема II є точнішою. Моделювання підтвердило їхню ефективність.

У [14] запропоновано адаптивну mho -характеристику для дистанційного захисту ліній, підключених до фотоелектричних станцій. Отримано узагальнену формулу адаптивного налаштування імпедансу та метод визначення фазового кута струму КЗ – ключового параметра для адаптації. Моделювання показало, що схема стійка до опору КЗ, добре адаптується до різних мереж, точно розрізняє внутрішні та зовнішні несправності і визначає напрямки КЗ.

У [15] запропоновано новий метод розрахунку імпедансу замкненої лінії, заснований на одночасному обертанні вимірюваного, додаткового та імпедансу лінії в комплексній площині доти, доки додатковий імпеданс не

вирівнюється з дійсною віссю. На основі геометричного співвідношення між обертаними величинами визначаються відстань до місця КЗ та імпеданс лінії. Метод нечутливий до опору КЗ, кута потужності та місця пошкодження, працює при всіх типах КЗ (AG, BC, BCG, ABC) і забезпечує точне визначення зони несправності.

У [16] запропоновано адаптивну схему дистанційного захисту, засновану на комплексній площині імпедансу. Кут додаткового імпедансу, спричиненого опором КЗ, визначається через фазове співвідношення струмів негативної послідовності в точці реле та КЗ. На основі тригонометричного зв'язку між ефективним, вимірним і додатковим імпедансами розраховується реальний імпеданс до місця пошкодження і формується адаптивний критерій спрацьовування. Тестування на цифровому симуляторі в реальному часі підтвердило, що схема працює при всіх типах несправностей, стійка до опору КЗ і усуває помилкові спрацьовування чи відмови, притаманні традиційному захисту.

У [17] досліджено вплив послідовної компенсації на роботу дистанційного захисту на 400-кВ лінії. Послідовна компенсація спотворює імпеданс лінії, що призводить до неправильної роботи реле через нелінійність імпедансу та субгармонічні коливання. Аналіз проведено в Digsilent PowerFactory, показано специфічну реакцію реле під час КЗ у таких умовах.

У [18] проаналізовано особливості дистанційного захисту в системах низькочастотного змінного струму (НЗС). Зниження реактивного опору ліній підвищує пропускну здатність, але призводить до значно більших струмів КЗ порівняно з 50 Гц. Через довшу хвилю струму та зменшений імпеданс лінії, захист має спрацьовувати швидше. Показано, що в НЗС більший розрив між імпедансом навантаження та зоною захисту, а критичний час усунення КЗ (у секундах) є меншим, ніж у традиційних системах.

У [19] запропоновано алгоритм дистанційного захисту без додаткового фільтрування сигналів. Він використовує виміряні напруги на початку лінії

та допоміжні напруги, розраховані за струмами, напругами та параметрами лінії. Несправність виявляється за зміною фазового кута між виміряними та допоміжними напругами. Алгоритм перевірено на моделях КЗ та реальних записах – він забезпечує швидку та чутливу реакцію.

У [20] систематично класифіковано проблеми дистанційного захисту та існуючі рішення за дванадцятьма напрямками: коливання потужності, нестабільність напруги, вторгнення навантаження, паралельні та багатотермінальні лінії, FACTS, послідовна компенсація, HVDC, відновлювані джерела, мікромережі, високоомні КЗ та кібератаки. Також визначено перспективні напрямки досліджень для розробки надійніших і адаптивних схем захисту в умовах зростаючої складності енергосистем.

У [21] розглянуто застосування дистанційного захисту в розподільних мережах із розподіленими джерелами енергії. Наведено реальні приклади його ефективності, порівняння витрат різних рішень для захисту живильників, а також рекомендації щодо навчання персоналу, який вперше впроваджує такий захист.

У [22] запропоновано простий і обчислювально легкий метод дистанційного захисту на основі моделі лінії з розподіленими параметрами. Він виявляє внутрішні КЗ за тенденцією розподілу напруги поблизу точки налаштування, не вимагаючи повного розрахунку напруги по всій лінії. Метод стійкий до високого опору переходу, а його ефективність підтверджено як моделюванням, так і польовими випробуваннями на 750 кВ лінії.

У [23] розроблено новий алгоритм, що визначає відстань до КЗ через розв'язання лінійного диференціального рівняння в моделі зосередженої лінії. Захист ґрунтується на порівнянні розрахованої відстані з захисним запасом, а не на імпедансі, що усуває перевищення зони при КЗ біля протилежного кінця лінії. Алгоритм враховує постійну складову струму, що дозволяє швидко спрацьовування в перехідному режимі. Моделювання в

ЕМТР підтвердило його працездатність на RL-лінії, хоча для практичного застосування потрібно врахувати вплив розподіленої ємності.

Висновки до розділу 1

Розділ 1 надає комплексний огляд систем дистанційного захисту магістральних ліній електропередачі, зокрема в умовах енергосистеми України та НЕК «Укренерго». У ньому описано структуру та функції магістральних мереж, принципи роботи дистанційного захисту, основні типи реле (імпедансні, Mho , полігональні) та їх характеристики. Особлива увага приділена сучасним науковим розробкам, спрямованим на підвищення надійності захисту в умовах складних факторів – високоомних КЗ, інтеграції ВДЕ, наявності FACTS-пристроїв, паралельних ліній тощо. Загалом, розділ підкреслює стратегічну важливість дистанційного захисту для стабільності й безпеки сучасних енергосистем та демонструє тенденцію до впровадження адаптивних, цифрових і інтелектуальних алгоритмів у релейний захист.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ПІДГРУНТЯ НАЛАШТУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ МАГІСТРАЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

2.1 Розрахунки величин для описання магістральної лінії електропередачі

Як об'єкт для аналізу дистанційного захисту беремо магістральну лінію електропередачі, котра з'єднує підстанції «Дніпровська-750» і «Першотравнева-330» Дніпровської ЕС ОЕС України.

ЛЕП має довжину 42 км і номінальну напругу 330 кВ. Побудована ЛЕП з використанням алюмінієво-сталевих провідників з погонними даними $r = 0,0733 \text{ Ом/км}$ і $x = 0,396 \text{ Ом/км}$.

Поділимо ЛЕП на три зони захисту по 14 км.

Тоді для першої зони захисту:

$$\begin{aligned} R_{14} &= r \cdot l = 0,0733 \cdot 14 = 1,0262 \text{ Ом}, \\ X_{14} &= x \cdot l = 0,396 \cdot 14 = 5,544 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Імпеданс:

$$Z_{14} = 1,0262 + j5,544 \text{ Ом}, \quad (2.2)$$

з амплітудою:

$$|Z_{14}| = \sqrt{R_{14}^2 + X_{14}^2} = \sqrt{1,0262^2 + 5,544^2} = 5,638 \text{ Ом}. \quad (2.3)$$

Для другої зони:

$$\begin{aligned} R_{28} &= r \cdot l = 0,0733 \cdot 28 = 2,0524 \text{ Ом}, \\ X_{28} &= x \cdot l = 0,396 \cdot 28 = 11,088 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Імпеданс:

$$Z_{28} = 2,0524 + j11,088 \text{ Ом}, \quad (2.5)$$

з амплітудою:

$$|Z_{28}| = \sqrt{R_{28}^2 + X_{28}^2} = \sqrt{2,0524^2 + 11,088^2} = 11,276 \text{ Ом.} \quad (2.6)$$

Для третьої зони:

$$\begin{aligned} R_{42} &= r \cdot l = 0,0733 \cdot 42 = 3,0786 \text{ Ом;} \\ X_{42} &= x \cdot l = 0,396 \cdot 42 = 16,632 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Імпеданс:

$$Z_{42} = 3,0786 + j16,632 \text{ Ом,} \quad (2.8)$$

з амплітудою:

$$|Z_{42}| = \sqrt{R_{42}^2 + X_{42}^2} = \sqrt{3,0786^2 + 16,632^2} = 16,915 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

$$\theta_{42} = \arctg\left(\frac{X_{42}}{R_{42}}\right) = \arctg\left(\frac{16,632}{3,0786}\right) = 79,54^\circ. \quad (2.10)$$

Фазна напруга системи для ЛЕП 330 кВ становить:

$$U_\phi = \frac{U_\pi}{\sqrt{3}} = \frac{330 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 190525 \text{ В.} \quad (2.11)$$

Використовуючи наведені вище величини та нехтуючи реактивними опорами джерела та трансформатора для першого наближення, трифазні симетричні струми короткого замикання (ідеалізовані) при короткому замиканні на кінці кожної ділянки становлять:

$$\begin{aligned} I_{K3}^{14} &= \frac{U_\phi}{|Z_{14}|} = \frac{490525}{5,638} = 33792,06 \text{ А;} \\ I_{K3}^{28} &= \frac{U_\phi}{|Z_{28}|} = \frac{490525}{11,276} = 16896,03 \text{ А;} \\ I_{K3}^{28} &= \frac{U_\phi}{|Z_{28}|} = \frac{490525}{16,915} = 11264,02 \text{ А.} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Беремо, що для вимірювання напруги і струму в ЛЕП залучаються трансформатор струму і напруги. Коефіцієнти трансформації $n_I = 1200 \text{ А} / 1 \text{ А}$

для трансформатора струму і $n_U = 330000B / 100B$ для трансформатора напруги.

З врахуванням коефіцієнтів трансформації коефіцієнт перерахунку опору:

$$\begin{aligned} n_Z &= \frac{n_U}{n_I} = \frac{U_{\text{ном перв}} / U_{\text{ном втор}}}{I_{\text{ном перв}} / I_{\text{ном втор}}} = \\ &= \frac{330000\sqrt{3}}{100\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1200} = \frac{3300}{1200} = 2,75. \end{aligned} \quad (2.13)$$

У результаті повний опір лінії перерахований:

$$Z_{42*} = \frac{Z_{42}}{n_Z} = \frac{16,915}{2,75} = 6,151 \text{ Ом}, \quad (2.14)$$

$$R_{42*} = \frac{3,0786}{2,75} = 1,12 \text{ Ом}, \quad (2.15)$$

$$X_{42*} = \frac{16,632}{2,75} = 6,048 \text{ Ом}. \quad (2.16)$$

2.2 Розрахунок характеристик зон дистанційного захисту з імпедансним реле

Імпедансне реле використовує ступеневий захист з трьома основними зонами (Зона 1, Зона 2, Зона 3), кожна з яких визначається колом на характеристиці реле.

Зона 1 (миттєва)

Призначена для миттєвого дистанційного захисту 80-85% лінії. Тобто 80% від Z_{42*} :

$$Z_{\text{зона1}} = 0,8Z_{42} = 0,8 \cdot 6,151 = 4,921 \text{ Ом}. \quad (2.17)$$

Час спрацювання $t_1 = 0 \text{ сек}$.

Зона 2 (основна з витримкою за часом)

Призначена для дистанційного захисту 100% ЛЕП з резервуванням 20...50% сусідньої лінії. Тобто 120% від Z_{42*} :

$$Z_{зона2} = 1,2Z_{42} = 1,2 \cdot 6,151 = 7,381 \text{ Ом.} \quad (2.18)$$

Час спрацювання $t_2 = 0,25 \dots 0,4 \text{ сек.}$

Зона 3 (резервування).

Призначена для резервування для довшої ділянки ЛЕП. Довжина: 100% захищеної ЛЕП і 100% найдовшої сусідньої ЛЕП. Типове налаштування: 200% від Z_{42*} :

$$Z_{зона3} = 2Z_{42} = 2 \cdot 6,151 = 12,302 \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

Час спрацювання $t_3 = 0,8 \dots 1,2 \text{ сек.}$

Реле спрацює, якщо абсолютне значення виміряного опору ($Z_{уявн}$) менше або дорівнює налаштуванню зони ($Z_{зона}$).

Загальна умова спрацювання:

$$Z_{уявн} \leq Z_{зона}, \quad (2.20)$$

де $Z_{уявн} = R_{уявн} + jX_{уявн}$ – вимірний опір.

У площині R-X, виміряні активний ($R_{уявн}$) і реактивний ($X_{уявн}$) опори, що лежать на межі спрацювання, задовольняють рівнянню кола:

$$R_{уявн}^2 + X_{уявн}^2 = Z_{зона}^2. \quad (2.21)$$

Для зони 1:

$$R_{уявн}^2 + X_{уявн}^2 \leq 4,921^2. \quad (2.22)$$

Рівняння кола зони 2:

$$R_{уявн}^2 + X_{уявн}^2 \leq 7,381^2; \quad (2.23)$$

$$R_{уявн}^2 + X_{уявн}^2 \leq 54,47 \text{ Ом}^2.$$

Рівняння кола зони 3:

$$R_{уявн}^2 + X_{уявн}^2 \leq 12,302^2; \quad (2.24)$$

$$R_{уявн}^2 + X_{уявн}^2 \leq 151,34 \text{ Ом}^2.$$

На рис. 2.1 візуалізовано характеристику імпедансного реле для дистанційного захисту ЛЕП з довжиною 42 км.

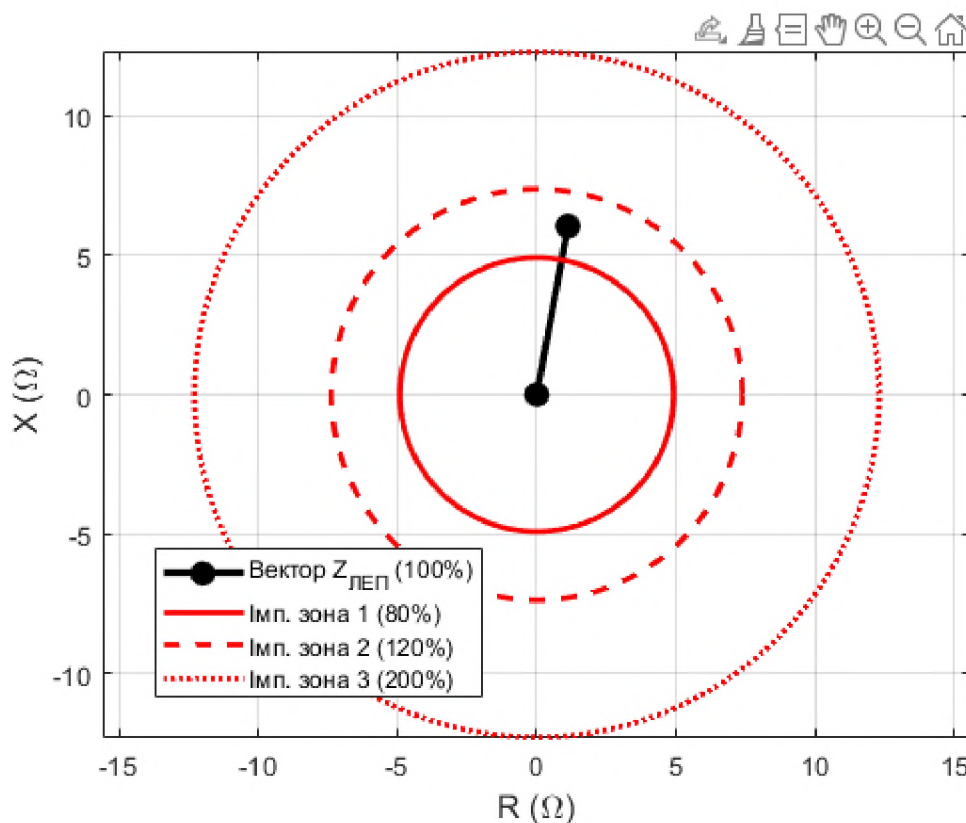


Рисунок 2.1 – Характеристика імпедансного реле з трьома зонами захисту

Реле імпедансу не є напрямним і спрацьовує як для аварій у прямому, так і у зворотному напрямку. Через це його зазвичай використовують лише у поєднанні з окремим напрямним реле або замінюють на більш досконалі типи реле, які мають вбудовану спрямованість.

2.3 Розрахунок характеристик зон дистанційного захисту з Mho реле

Mho використовує ступеневий захист з трьома основними зонами (Зона 1, Зона 2, Зона 3), кожна з яких визначається колом на характеристиці реле. Відмінність від імпедансного реле, що центри кіл охоплення зон захисту не розміщені в точках $R = 0$ і $X = 0$,

Діаметр кола Mho ($Z_{зона}$) дорівнює вибору зони (наприклад, 80% від $Z_{ЛЕП}$). Кут характеристики Mho (θ_{Mho}) встановлюється рівним куту ЛЕП ($\theta_{ЛЕП} = 79,54^\circ$).

Реле спрацьовує (видає команду на вимкнення), якщо виміряний уявний опір $Z_{уявн}$ задовольняє умові:

$$\frac{Z_{уявн} - Z_{зона}^*}{2} \leq \frac{Z_{зона}^*}{2}, \quad (2.25)$$

де $Z_{уявн} = R_{уявн} + jX_{уявн}$ – виміряний опір;

$Z_{зона}^*$ – опір налаштування зони спрацювання:

$$Z_{зона}^* = Z_{зона} e^{-j\theta_{Mho}}. \quad (2.26)$$

Якщо центр кола Mho ($Z_{ц}$) лежить на векторі лінії θ_{Mho} , то:

$$Z_{ц} = \frac{1}{2} Z_{зона}^* = \frac{1}{2} Z_{зона} \cos \theta_{Mho} - j \sin \theta_{Mho}. \quad (2.27)$$

Рівняння кола Mho реле на характеристиці R-X, де R і X є вимірними значеннями, що лежать на межі спрацювання:

$$\left(R - \frac{Z_{зона}}{2} \cos \theta_{Mho} \right)^2 + \left(X - \frac{Z_{зона}}{2} \sin \theta_{Mho} \right)^2 = \left(\frac{Z_{зона}}{2} \right)^2. \quad (2.28)$$

або якщо більш загально:

$$R - R_{ц}^2 + X - X_{ц}^2 \leq r^2. \quad (2.29)$$

Для зони 1 координати центру кола:

$$R_{\text{ц1}} = \frac{4,921}{2} \cos 79,54^\circ = 0,44 \text{ Ом}; \quad (2.30)$$

$$X_{\text{ц1}} = \frac{4,921}{2} \sin 79,54^\circ = 2,42 \text{ Ом}. \quad (2.31)$$

Радіус кола:

$$r_1 = \frac{4,921}{2} = 2,4605 \text{ Ом}. \quad (2.32)$$

Остаточна умова спрацювання для зони 1:

$$R_{\text{уявн}} - 0,44^2 + X_{\text{уявн}} - 2,42^2 \leq 2,46^2. \quad (2.33)$$

Реле спрацює, якщо вимірний опір $Z_{\text{уявн}}$ потрапить всередину цього кола.

Зробімо подібний розрахунок для двох інших зон:

Для зони 2 координати центру кола:

$$R_{\text{ц2}} = \frac{7,381}{2} \cos 79,54^\circ = 0,66 \text{ Ом}; \quad (2.34)$$

$$X_{\text{ц2}} = \frac{7,381}{2} \sin 79,54^\circ = 3,63 \text{ Ом}. \quad (2.35)$$

Радіус кола:

$$r_2 = \frac{7,381}{2} = 3,6905 \text{ Ом}. \quad (2.36)$$

Остаточна умова спрацювання для зони 2:

$$R_{\text{уявн}} - 0,66^2 + X_{\text{уявн}} - 3,63^2 \leq 3,69^2; \quad (2.37)$$

$$R_{\text{уявн}} - 0,66^2 + X_{\text{уявн}} - 3,63^2 \leq 13,62 \text{ Ом}^2.$$

Для зони 3 координати центру кола:

$$R_{\text{чз}} = \frac{12,302}{2} \cos 79,54^\circ = 1,1 \text{ Ом}; \quad (2.38)$$

$$X_{\text{чз}} = \frac{12,302}{2} \sin 79,54^\circ = 6,05 \text{ Ом}. \quad (2.39)$$

Радіус кола:

$$r_3 = \frac{12,302}{2} = 6,151 \text{ Ом}. \quad (2.40)$$

Остаточна умова спрацювання для зони 3:

$$R_{\text{уявн}} - 1,1^2 + X_{\text{уявн}} - 6,05^2 \leq 6,15^2; \quad (2.41)$$

$$R_{\text{уявн}} - 1,1^2 + X_{\text{уявн}} - 6,05^2 \leq 37,83 \text{ Ом}^2.$$

На рис. 2.1 візуалізовано характеристику Мho реле для дистанційного захисту ЛЕП з довжиною 42 км.

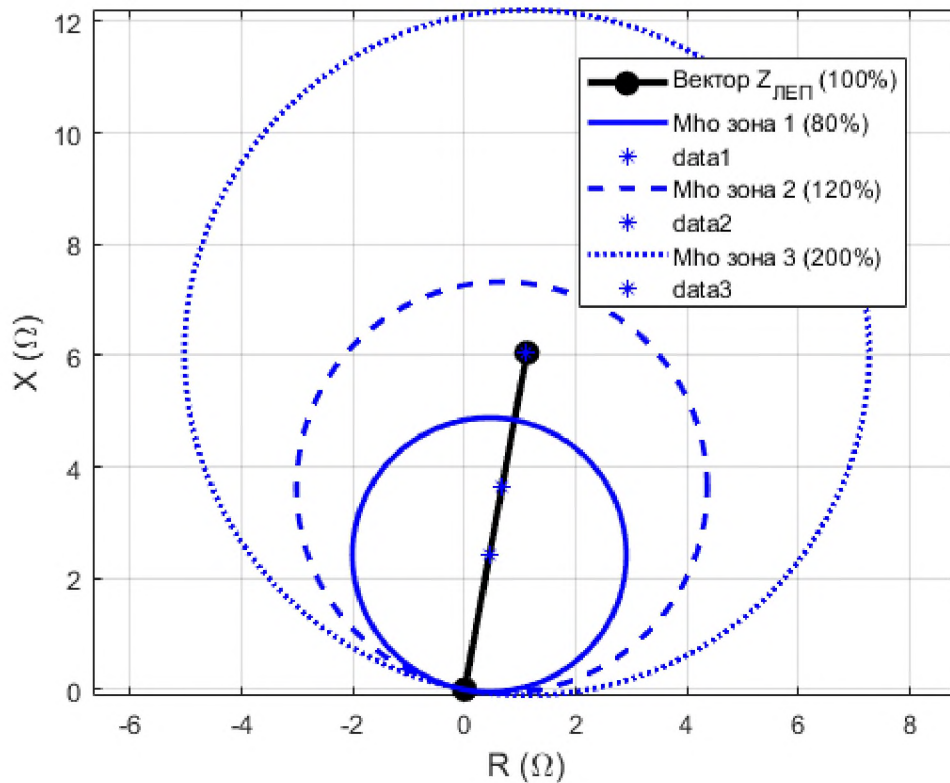


Рисунок 2.2 – Характеристика Мho реле з трьома зонами захисту

Розглянемо спрацювання дистанційного захисту з імпедансним та Mho реле.

2.4 Симуляція роботи дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі в статистиці

Проведемо симуляцію спрацювання дистанційного захисту за рахунок імітації КЗ у різних точках ЛЕП. Програмно розраховуватимемо вимірний уявний опір ($Z_{уявн}$) для кожної аварії та перевірятимемо, чи потрапляє цей опір у зони спрацювання Mho -реле та імпедансного реле.

Для реалістичності симуляції в кожній точці КЗ додається перехідний опір $Z_{КЗ} = R_{КЗ} + jX_{КЗ} = 0,5 + j0,8 \text{ Ом}$.

Перевірка спрацювання захисту проводилася, починаючи з найдалшої зони і рухаючись до найближчої (тобто від Зони 3 до Зони 1, або від найбільшого кола до найменшого). Це робиться через, що якщо точка КЗ потрапляє в Зону 1, вона автоматично знаходиться і в Зоні 2, і в Зоні 3, що робить селективність спрацювання захисту неоднозначним..

Результати симуляцій приведені в табл. 2.1 і на рис. 2.3 і 2.4.

У результаті успішно змодельовано та візуалізовано спрацювання двох типів дистанційних реле для ряду імітованих аварій уздовж лінії електропередачі. Моделювання підтвердило відмінності у їхніх характеристиках. Низький опір у місці КЗ ($Z_{КЗ} = R_{КЗ} + jX_{КЗ} = 0,5 + j0,8 \text{ Ом}$) забезпечив високу селективність зон.

На графіку характеристики імпедансного реле (рис. 2.3) зони захисту представлені концентричними колами, центрованими у початку координат (0,0). Це реле є неспрямованим (хоча це не єдине реле, необхідне для повного захисту) і має меншу стійкість до опору аварії. Однак, завдяки мінімальному $Z_{КЗ}$ у моделі, селективність також висока: точки КЗ потрапляють у відповідні зони.

Таблиця 2.1 – Заниження/перевищення розрахованої температури верхнього шару оливи

Відстань, км	Z (модуль)	R	X	Імпедансне реле	Мно реле
2,10	0,6	0,51	0,3	Зона 1	Зона 1
21,00	3,75	1,06	3,02	Зона 1	Зона 1
31,50	5,55	1,34	4,53	Зона 2	Зона 2
35,70	6,22	1,44	5,14	Зона 2	Зона 2
39,90	6,9	1,53	5,75	Зона 2	Зона 2
46,20	7,96	1,71	6,67	Зона 3	Зона 3
63,00	10,66	2,16	9,07	Зона 3	Зона 3
84,00	13,78	2,69	12,09	Поза зоною	Поза зоною

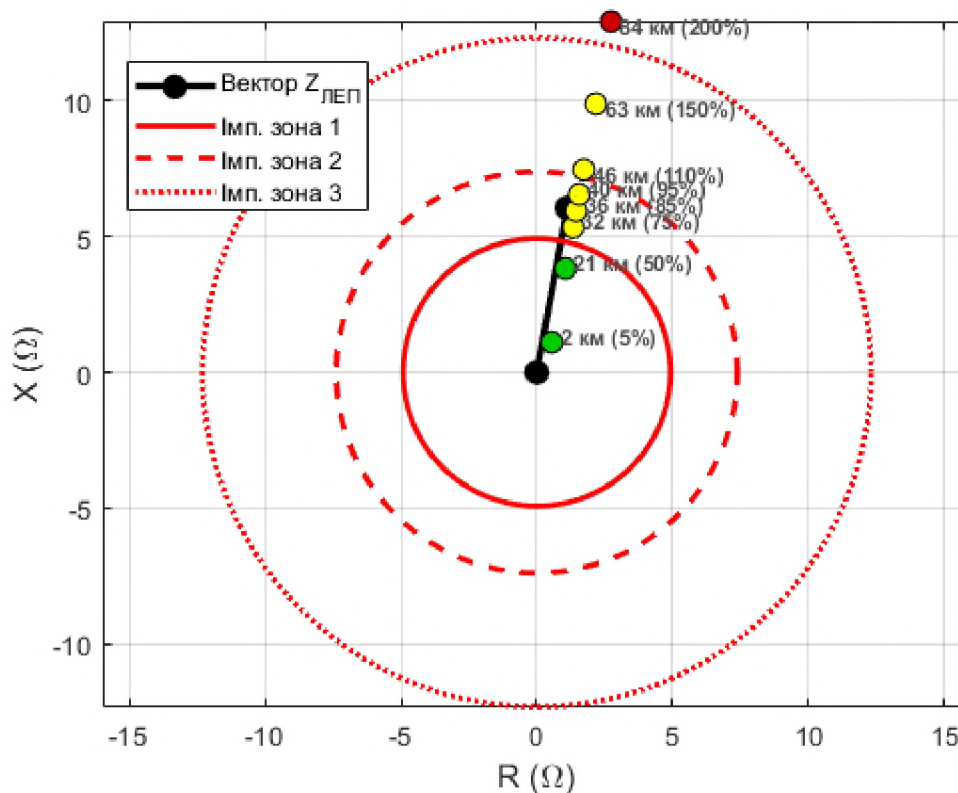


Рисунок 2.3 – Симуляція спрацювання дистанційного захисту з імпедансним реле

На графіку КЗ на віддаленні у 2,1 км та 31,5 км також відображаються як спрацювання у Зонах 1 та 2 відповідно, підтверджуючи, що за ідеальних умов (малий $Z_{KЗ}$) імпедансне реле може забезпечувати необхідну селективність. Точки, що виходять за межі Зони 3 (наприклад, 200% довжини ЛЕП), також правильно ігноруються.

Для Mho реле (рис. 2.4) ми бачимо, що його зони захисту (кола) зміщені та нахилені вздовж вектора лінії ($Z_{ЛЕП}$), проходячи через початок координат, що робить його спрямованим і стійким до опору аварії. На графіку Mho реле всі внутрішні КЗ, такі як на віддаленні 2,1 км (5% довжини ЛЕП) та 31,5 км (75% довжини ЛЕП), коректно потрапляють відповідно у Зону 1 (зелені маркери) та Зону 2 (жовті маркери), що відповідає вимогам швидкого відключення без витримки часу. КЗ, що знаходяться трохи далі за кінцем лінії (наприклад, 110% довжини ЛЕП), потрапляють у Зону 3, виконуючи функцію резервування, а дуже далекі КЗ (200%) виходять за межі всіх зон і позначаються як «не спрацювало» (червоні маркери).

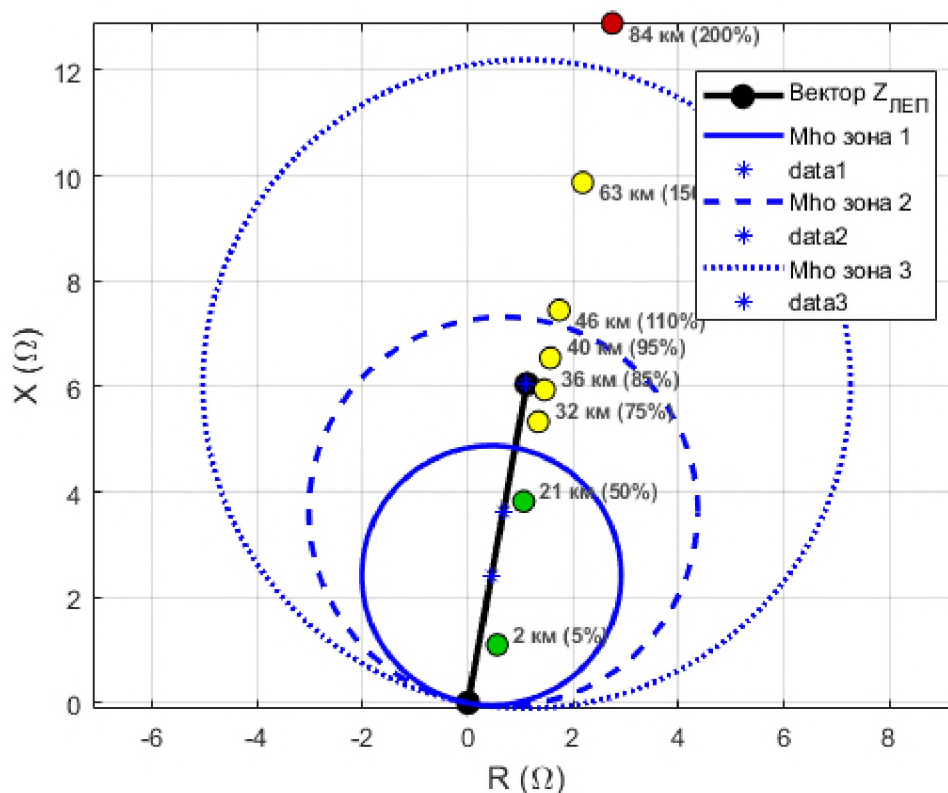


Рисунок 2.4 – Симуляція спрацювання дистанційного захисту з Mho реле

Тобто у таких умовах обидва реле мають непогані характеристики дистанційного захисту.

Додаймо декілька місць КЗ в зворотному напрямку та знову виконаємо симуляцію спрацювання дистанційного захисту.

Моделювання дистанційного захисту чітко ілюструє різницю у принципах спрацювання Mho реле та імпедансного реле, особливо щодо селективності та спрямованості. Для КЗ у прямому напрямку, як, наприклад, внутрішнє КЗ на 2,1 км або КЗ на 31,5 км, обидва реле демонструють коректну селективність зон, спрацьовуючи у Зоні 1 та Зоні 2 відповідно, оскільки використаний малий перехідний опір ($R_{КЗ} = 0,5 \text{ Ом}$; $X_{КЗ} = 0,8 \text{ Ом}$) не спричиняє значного підходу зон.

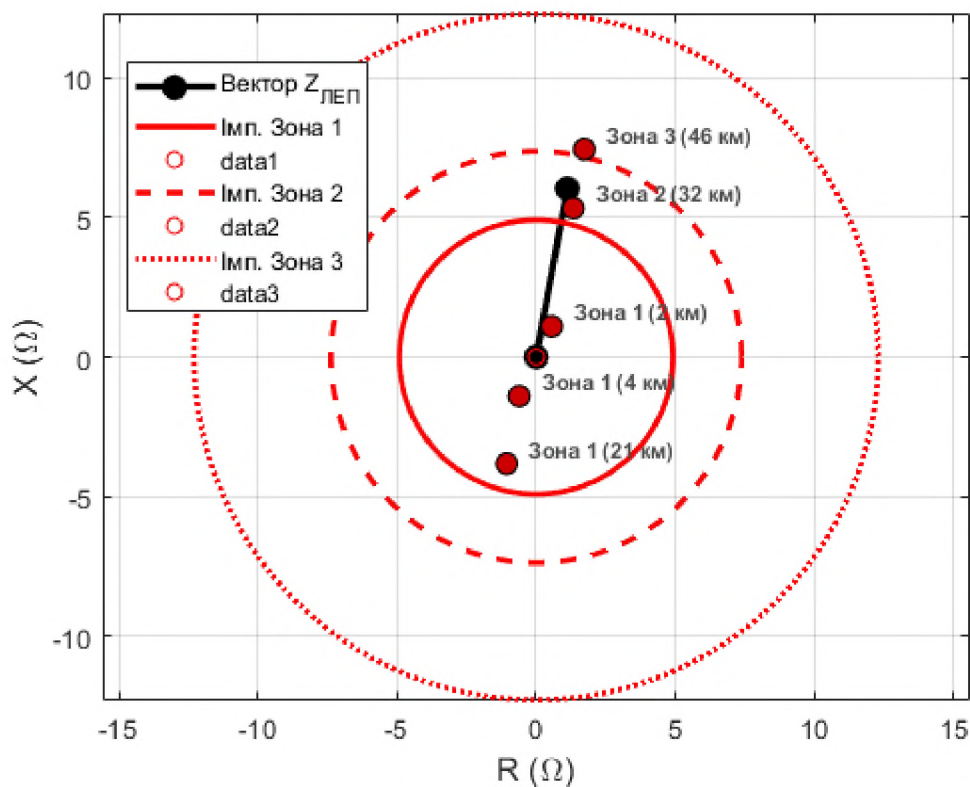


Рисунок 2.5 – Симуляція спрацювання дистанційного захисту з імпедансним реле при КЗ в зворотному напрямку

КЗ, що знаходяться поза межами захищеної ЛЕП, такі як КЗ на відстані 46,2 км, вірно відносяться обома реле до Зони 3 (резервний захист).

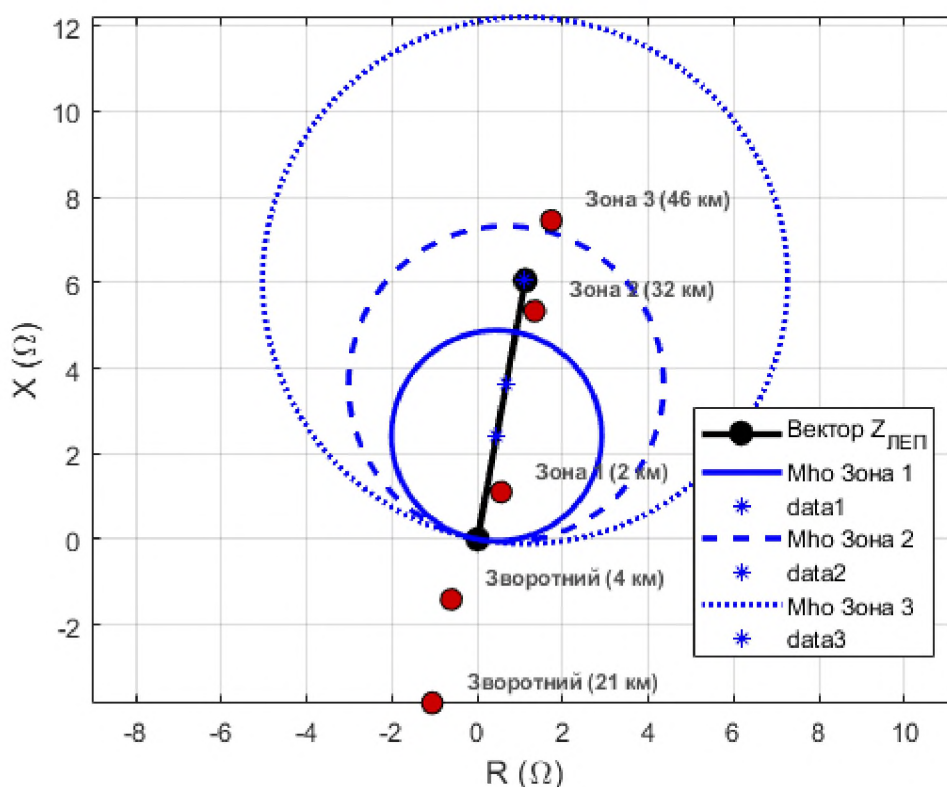


Рисунок 2.6 – Симуляція спрацювання дистанційного захисту з Mho реле при КЗ в зворотному напрямку

Однак, ключова різниця виявляється під час симуляції КЗ у зворотному напрямку (наприклад, на 4,2 км або 21,0 км). Mho реле є спрямованим, і оскільки його робочі зони повністю розташовані у позитивній частині характеристики, воно ігнорує ці зворотні КЗ, і не спрацьовує. Тоді як для імпедансного реле ці місця КЗ потрапляють в Зону 1.

Висновок до розділу 2

У розділі обґрунтовано налаштування дистанційного захисту лінії 330 кВ завдовжки 42 км між підстанціями «Дніпровська-750» і «Першотравнева-330». Розраховано імпеданси та струми короткого замикання для трьох зон захисту (по 14 км), враховано коефіцієнти трансформації трансформаторів напруги і струму та визначено параметри для імпедансного й Mho-реле. Обидва типи реле мають три зони: 80% лінії – миттєве спрацювання, 120% – з витримкою часу, до 200% – резервування. Статична симуляція підтвердила

високу селективність захисту при низькому перехідному опорі: КЗ всередині довжини лінії відносяться до відповідних зон, позалінійні – до резервної або ігноруються. Ключова різниця полягає у спрямованості дистанційного захисту. М_{ho}-реле не реагує на зворотні короткі замикання завдяки нахиленій характеристиці, тоді як імпедансне реле без додаткового напрямного елемента може спрацювати помилково.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ МАГІСТРАЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 330 кВ

3.1 Модель для оцінювання якості дистанційного захисту

У основу моделі покладено приклад показаний у [24]. Вона дає змогу проводити симуляції дистанційного захисту лінії електропередачі 330 кВ.

Джерело живлення (Grid) моделюється як ідеальне джерело напруги з номінальною напругою 750 кВ, що відповідає рівню ультрависокої напруги. Для моделювання реальних умов передачі електроенергії використовується трифазний двообмотковий трансформатор (Transformer), який імітує частину автотрансформатора, що з'єднує мережі 750 кВ та 330 кВ. Трансформатор знижує напругу з 750 кВ до 330 кВ, що відповідає рівню високої напруги, який зазвичай використовується для передачі енергії на великі відстані.

Для оперативного відокремлення пошкодженої ділянки ЛЕП поруч із понижувальним трансформатором встановлено захисне реле (Relay) та автоматичний вимикач (Circuit Breaker). У разі виявлення несправності реле формує команду на відключення вимикача, що дозволяє швидко ізолювати аварійну зону, мінімізуючи пошкодження обладнання та зберігаючи стійкість решти енергосистеми.

На приймальному кінці лінії підключено індуктивне навантаження потужністю 20 МВт. Навантаження характеризується коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,95$, тобто реактивна потужність складатиме десь 6,5 Мвар, що впливає на профіль напруги та струмів у лінії, а також на налаштування захисних реле.

Розглянута система захисту лінії електропередачі базується на комбінованому блоку реле, що включає імпедансне реле та mho-реле (реле з характеристикою у вигляді кола на комплексній площині імпедансу). Ця конфігурація дозволяє ефективно аналізувати поведінку захисних пристроїв за різних типів КЗ, зокрема трифазних, двофазних, двофазних на землю та однофазних на землю.

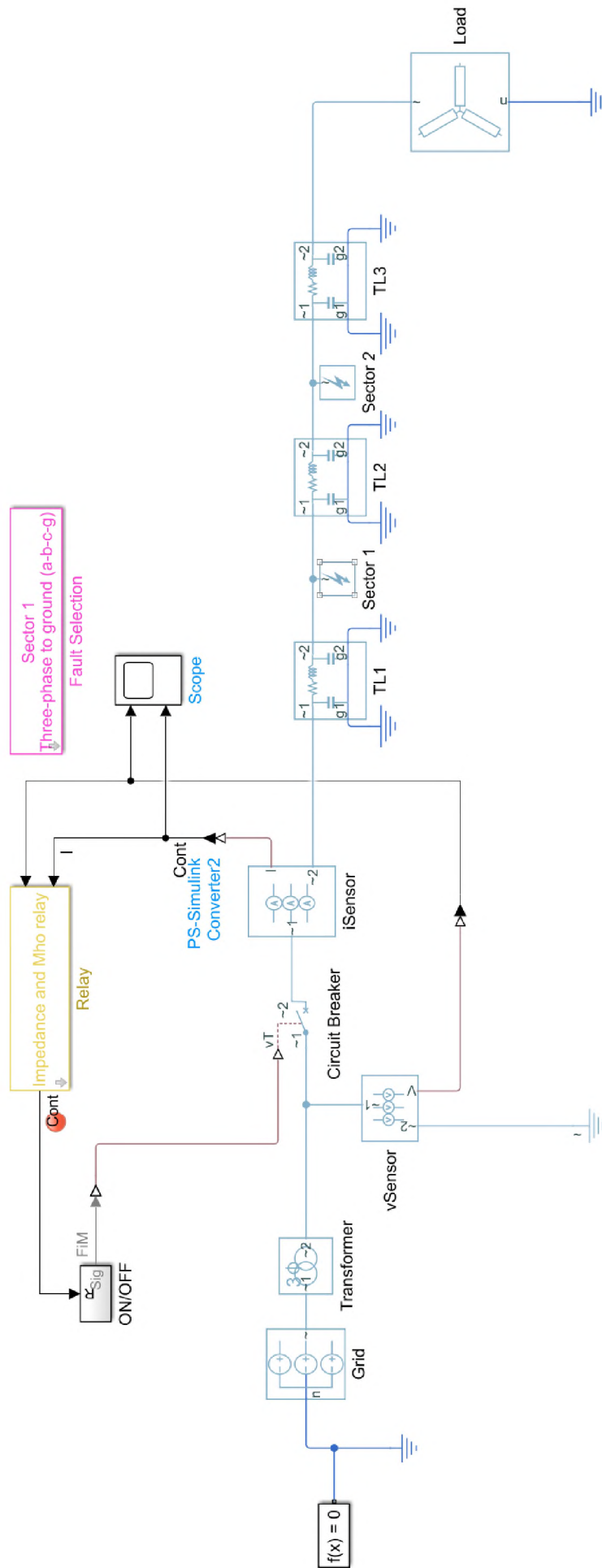


Рисунок 3.1 – Модель для симуляції роботи дистанційного захисту лінії 330 кВ

Обидва типи реле забезпечують селективний захист як від міжфазних КЗ, так і від замикань на землю, що є критично важливим для надійності високовольтних мереж.

Характеристики реле поділені на три зони, які визначаються дальністю («дальністю дії» або «reach») захисту. Для оцінки складових напруги та струму використовується блок на основі перетворення Фур'є.

Реле розраховує повний опір (імпеданс) лінії від вимикача до місця короткого замикання. Якщо розрахований імпеданс виявляється меншим за дальність першої зони, реле негайно формує сигнал відключення (trip) без будь-якої затримки за часом. У разі, коли розрахований імпеданс менший за дальність другої зони, реле генерує сигнал відключення після певної, обмеженої часової затримки. Якщо ж розрахований імпеданс стає меншим за дальність третьої зони, реле також формує сигнал відключення, проте з більшою часовою затримкою, яка обов'язково має перевищувати затримку, встановлену для другої зони.

Щоб уникнути помилкового спрацьовування при пошкодженнях, які виникають у зворотному напрямку відносно захищеної лінії, імпедансне реле оснащується спеціальним напрямковим елементом (directional unit). Напрямок дії імпедансного реле можна налаштувати залежно від конкретних вимог системи захисту. Важливо зазначити, що реле не спрацьовує, якщо розрахований імпеданс потрапляє в так звану «сліпу» (blinder) зону – область, де захист свідомо блокується для запобігання небажаних спрацьовувань.

У даному прикладі також реалізовано реле типу Mho, яке має вбудований напрямковий елемент, успадкований від базової структури. Mho-реле використовує самополяризацію, тобто як опорні сигнали воно застосовує власні фазні та лінійні напруги, що забезпечує високу чутливість та селективність захисту, особливо при несиметричних коротких замиканнях.

Така структура системи дозволяє досліджувати чутливість, селективність і швидкодію різних типів дистанційних реле в умовах реальних

експлуатаційних сценаріїв, включаючи різноманітні види коротких замикань, колювання навантаження та перехідні процеси в енергосистемі.

3.2 Модельна симуляція дистанційного захисту магістральної лінії електропередачі

3.2.1 Однофазні замикання

Під час симуляції однофазного короткого замикання (наприклад, фази А на землю) дистанційне реле ефективно виявляло ушкодження завдяки аналізу фазної напруги та струму ушкодженої фази.

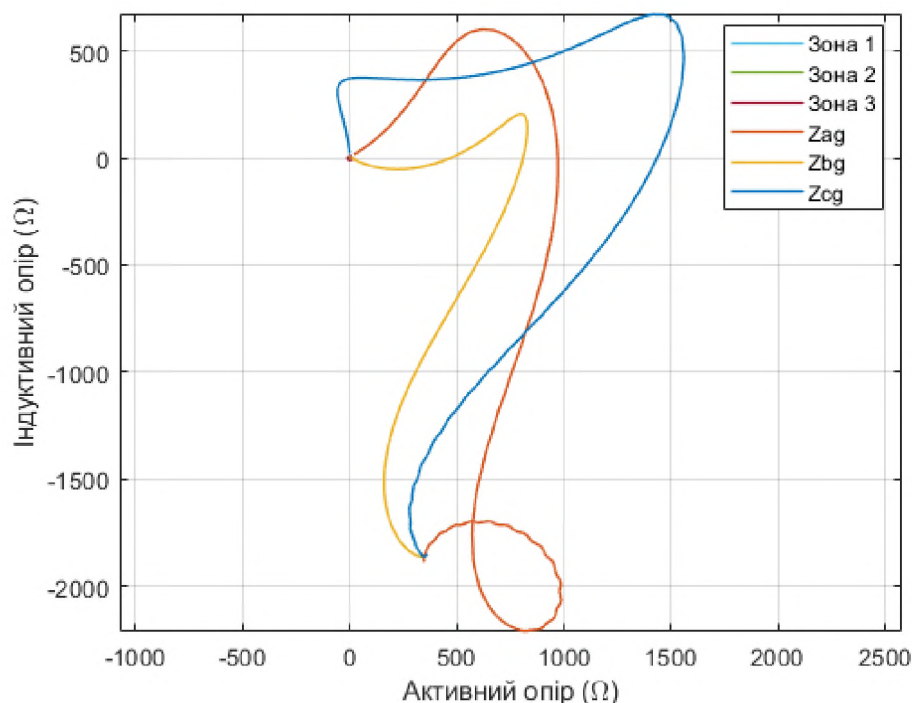


Рисунок 3.2 – Характеристика імпедансного реле при замиканні на землю

Через різке зниження напруги та зростання струму в ушкодженій фазі розрахований імпеданс значно зменшувався, що дозволяло реле точно локалізувати місце пошкодження. Якщо коротке замикання виникало в межах першої зони захисту (приблизно 80–85% довжини лінії), реле миттєво формувало сигнал відключення без будь-якої часової затримки. У разі ушкодження в другій зоні спрацьовування відбувалося після короткої

затримки (зазвичай 0,3–0,5 секунди), а для третьої зони – після більшої затримки (1,0–1,5 секунди), що забезпечувало необхідну селективність у роботі захисту. Напрямоквий елемент надійно підтверджував прямий напрямок пошкодження і блокував спрацювання при зворотних аваріях. Також було зафіксовано, що при попаданні розрахункового імпедансу в так звану «сліпу» (blinder) зону реле не спрацьовувало, що є передбаченою особливістю для уникнення помилкових відключень при дуже близьких до шин КЗ з високим опором. Загалом, реле продемонструвало високу чутливість, швидкодію та надійність при однофазних замиканнях на землю.

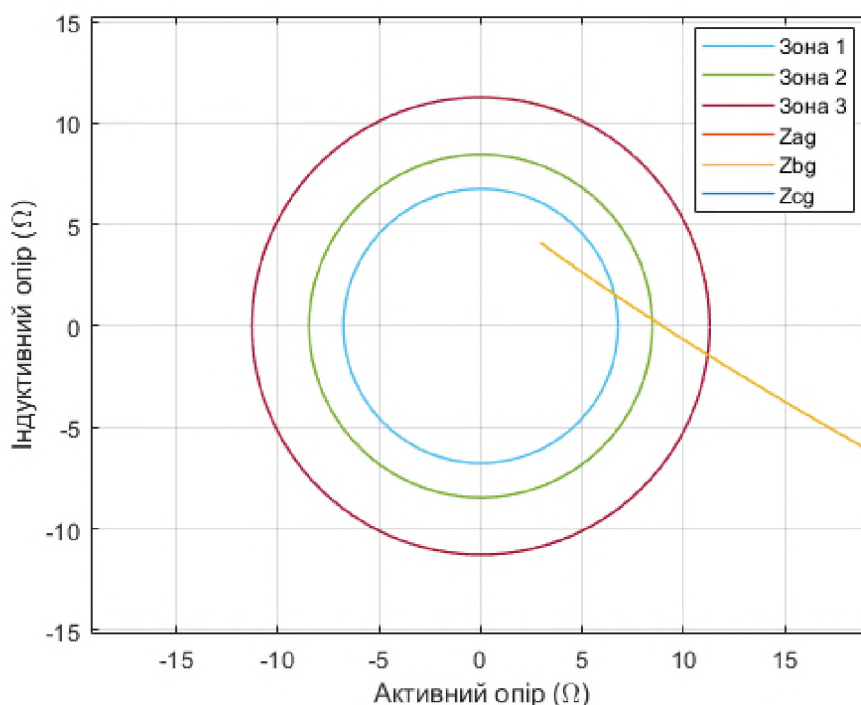


Рисунок 3.3 – Характеристика імпедансного реле при замиканні на землю (збільшена частина)

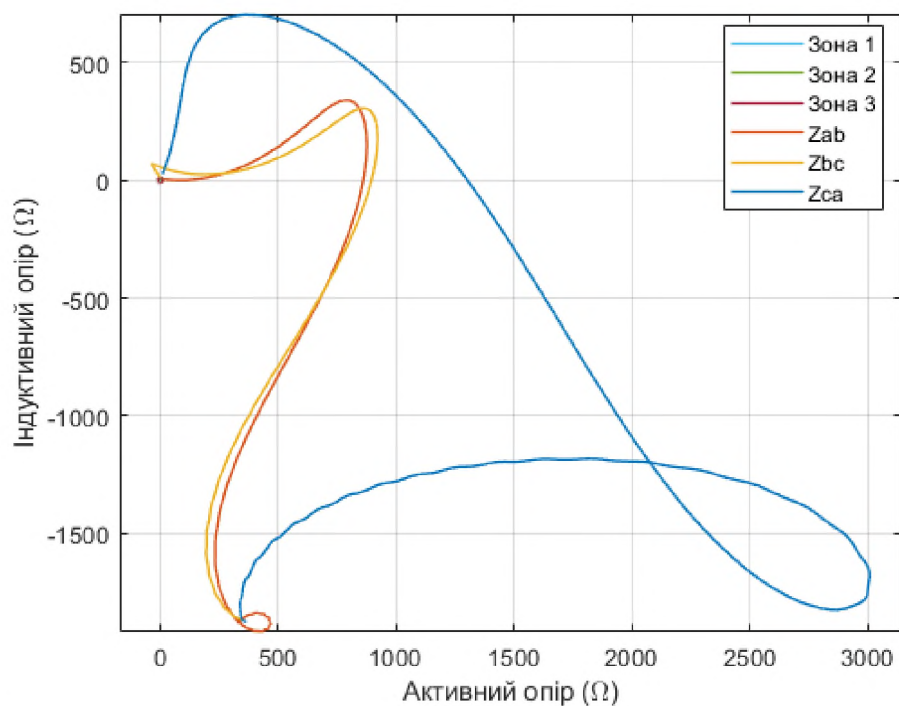


Рисунок 3.4 – Характеристика імпедансного реле при міжфазному замиканні

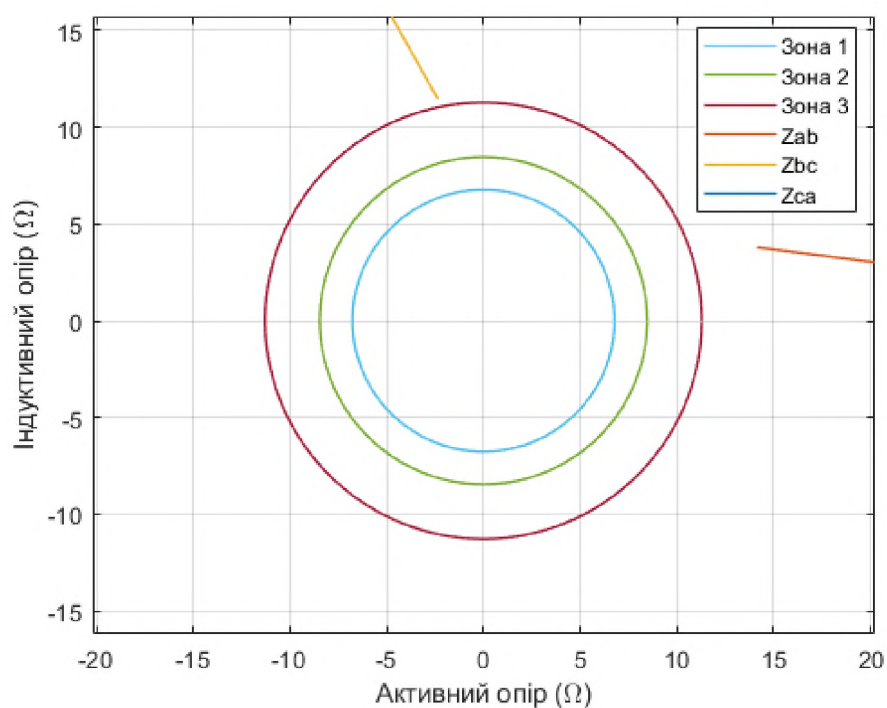


Рисунок 3.5 – Характеристика імпедансного реле при міжфазному замиканні (збільшена частина)

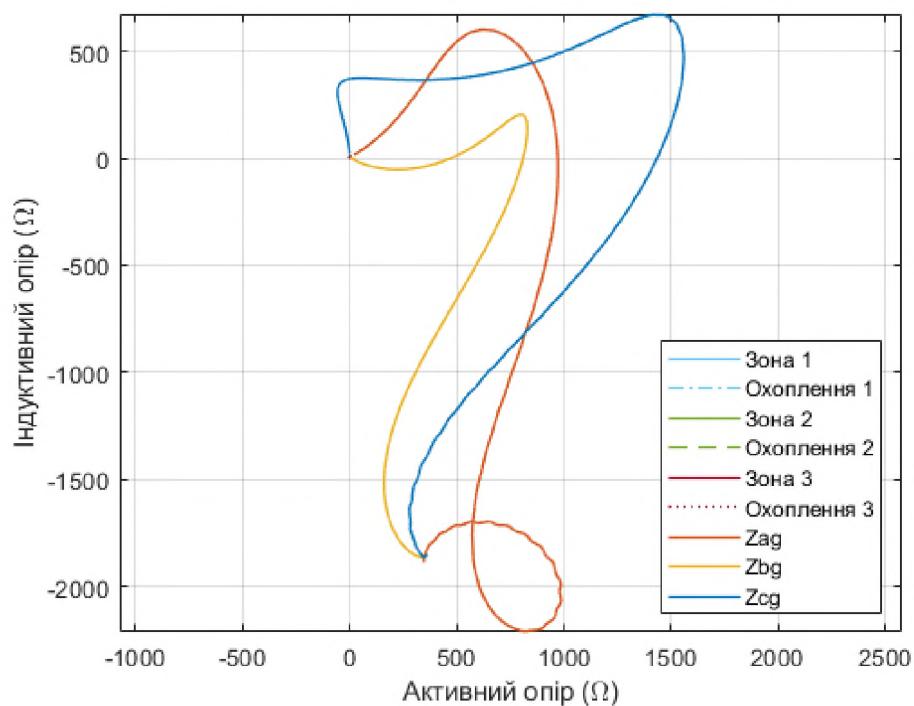


Рисунок 3.6 – Характеристика Мho-реле при замиканні на землю

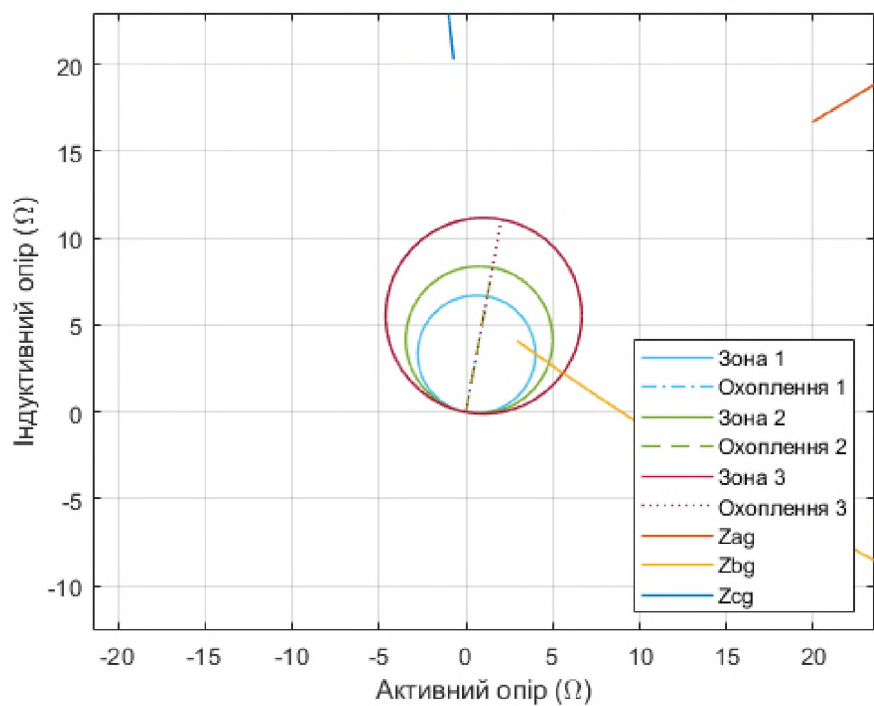


Рисунок 3.7 – Характеристика Мho-реле при замиканні на землю (збільшена частина)

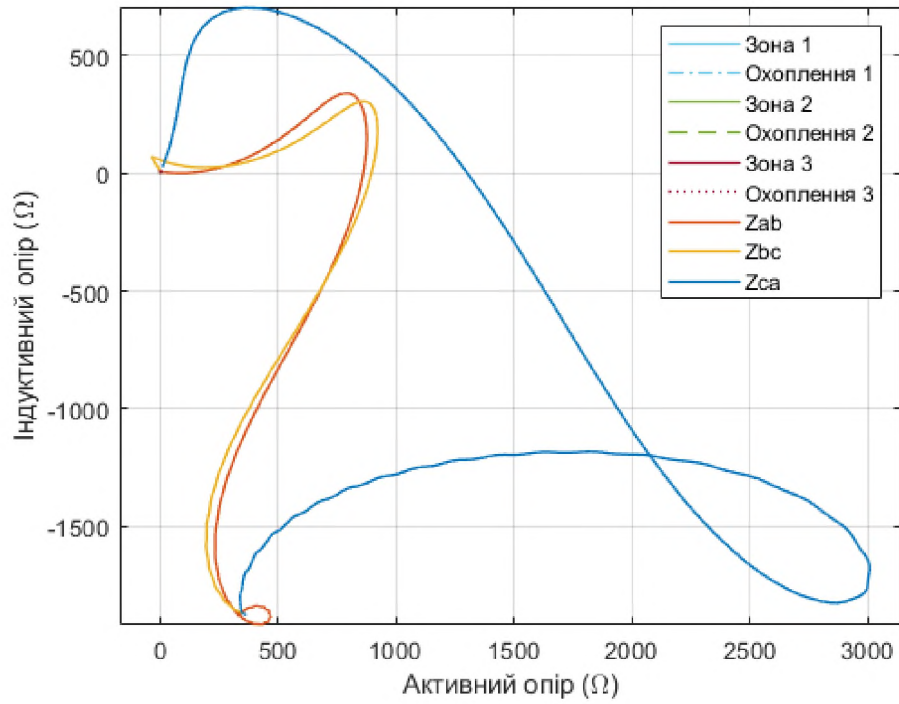


Рисунок 3.8 – Характеристика Мho-реле при міжфазному замиканні

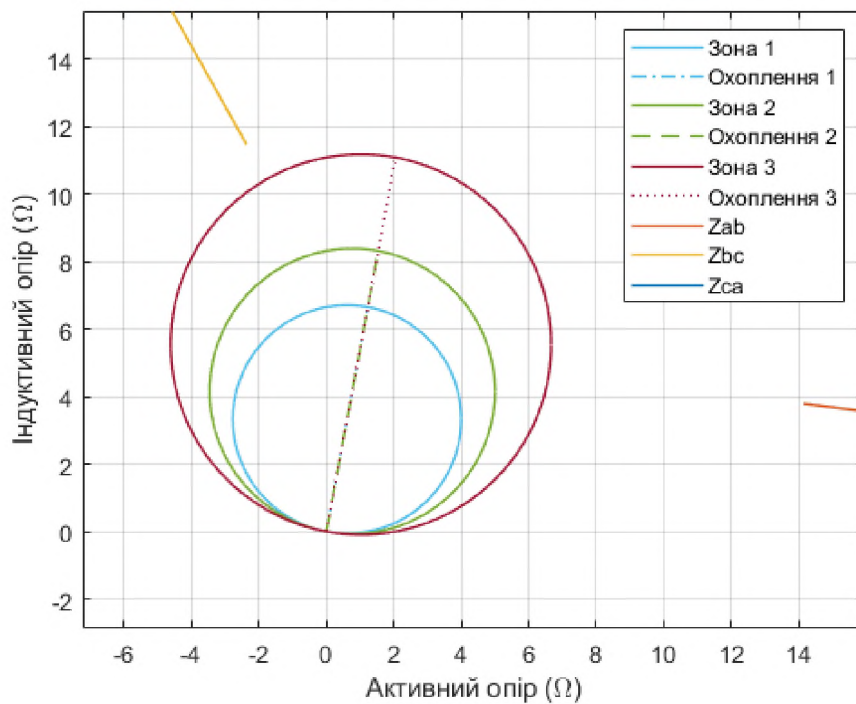


Рисунок 3.9 – Характеристика Мho-реле при міжфазному замиканні
(збільшена частина)

3.2.2 Двофазні замикання

Симуляція двофазних коротких замикань, як міжфазних (наприклад, В–С), так і двофазних на землю (В–С–земля) показала стабільну та точну роботу дистанційного реле. У випадку міжфазного КЗ реле аналізувало міжфазну напругу та різницю струмів ушкоджених фаз, що дозволяло точно оцінити імпеданс ЛЕП. При цьому нульова складова струму відсутня, що спрощує аналіз.

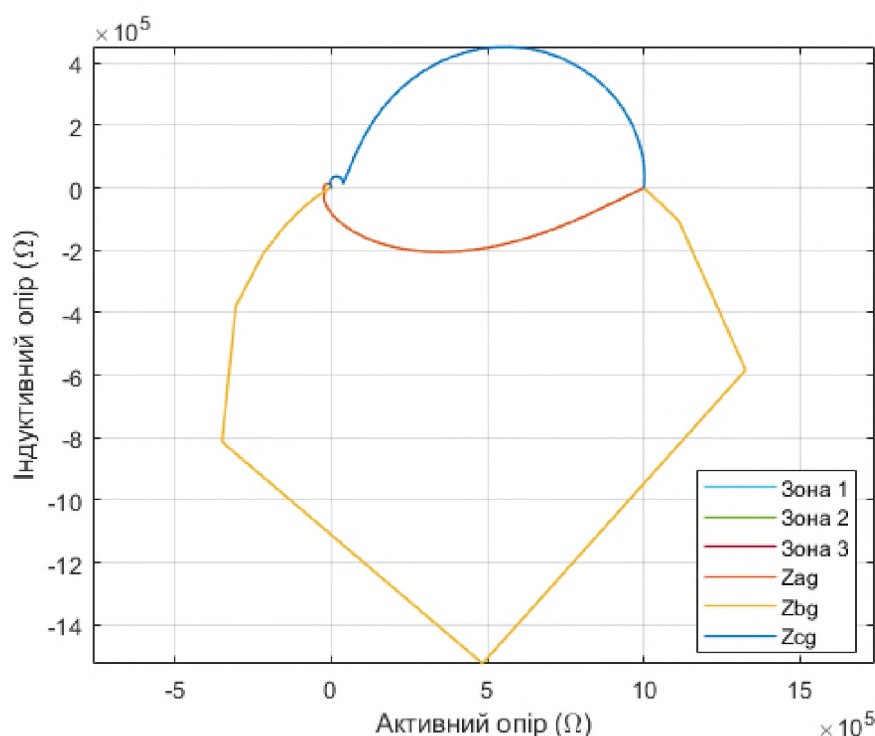


Рисунок 3.10 – Характеристика імпедансного реле при замиканні на землю

При двофазному КЗ на землю, навпаки, з'являлася нульова складова, і реле використовувало компенсовані алгоритми розрахунку імпедансу з урахуванням струму нульової послідовності для підвищення чутливості. У обох випадках, якщо КЗ знаходилося в межах першої зони, відключення відбувалося миттєво; для другої та третьої зон з відповідними часовими затримками, що гарантують селективність. Напрямокний елемент, що працював на основі компонентів зворотної та нульової послідовностей, надійно розрізняв напрямки аварії і запобігав помилковим спрацюванням.

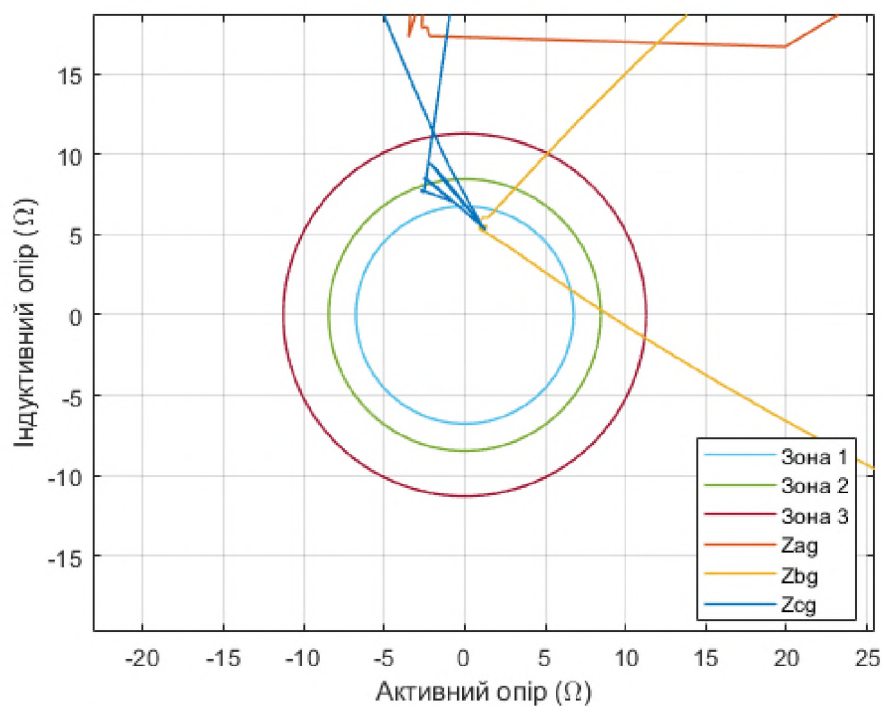


Рисунок 3.11 – Характеристика імпедансного реле при замиканні на землю (збільшена частина)

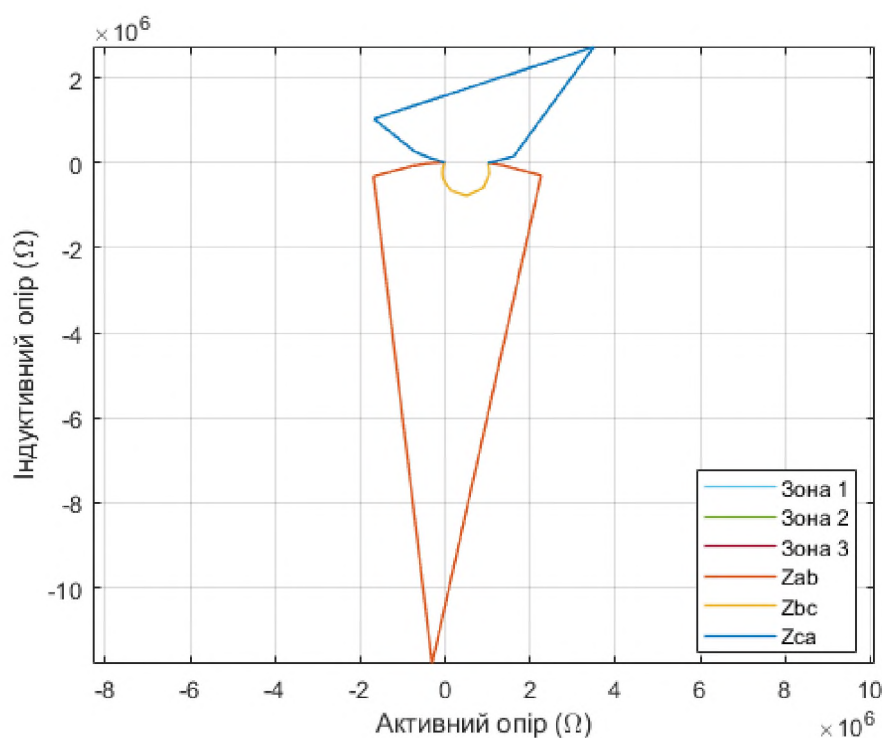


Рисунок 3.12 – Характеристика імпедансного реле при міжфазному замиканні

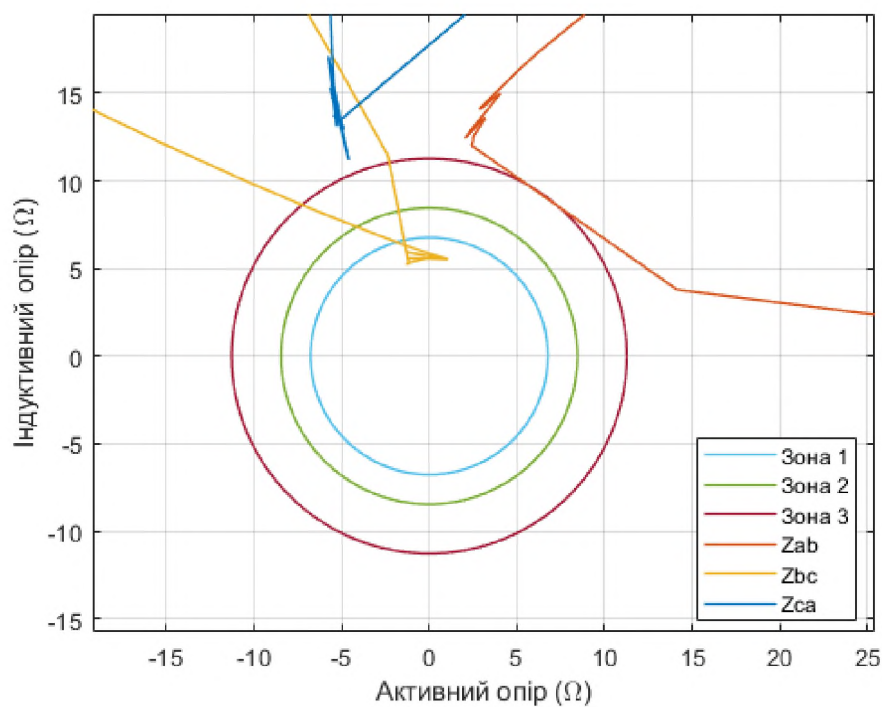


Рисунок 3.13 – Характеристика імпедансного реле при міжфазному замиканні (збільшена частина)

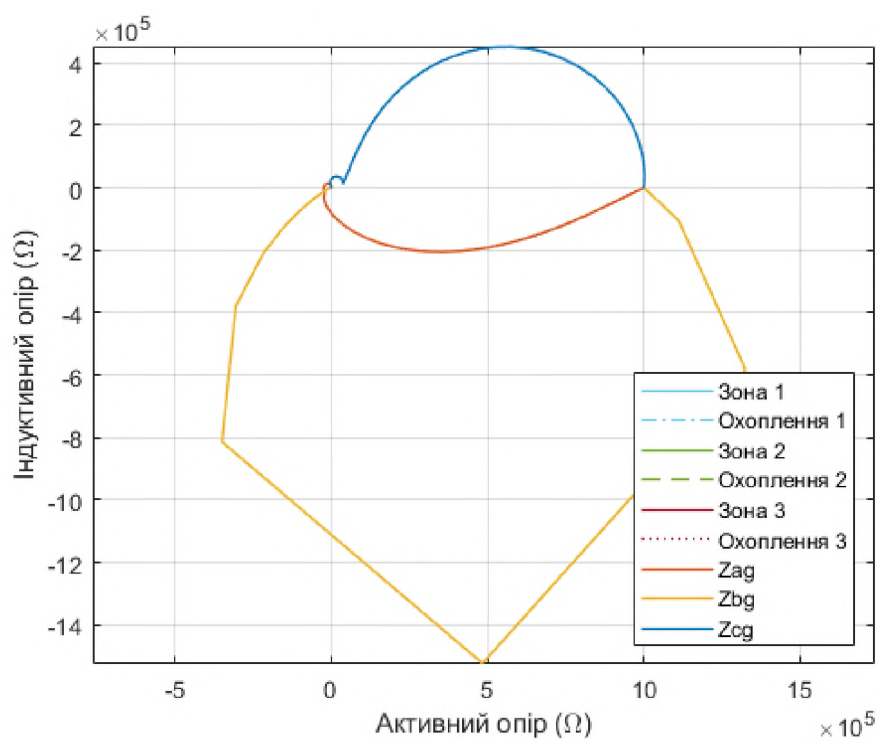


Рисунок 3.14 – Характеристика Mho-реле при замиканні на землю

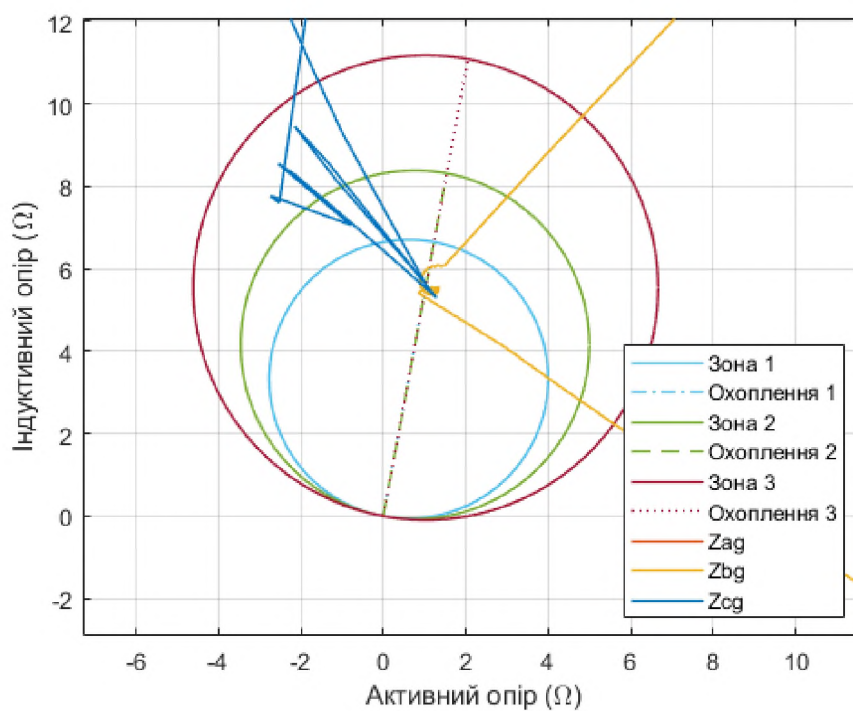


Рисунок 3.15 – Характеристика Мґо-реле при замиканні на землю (збільшена частина)

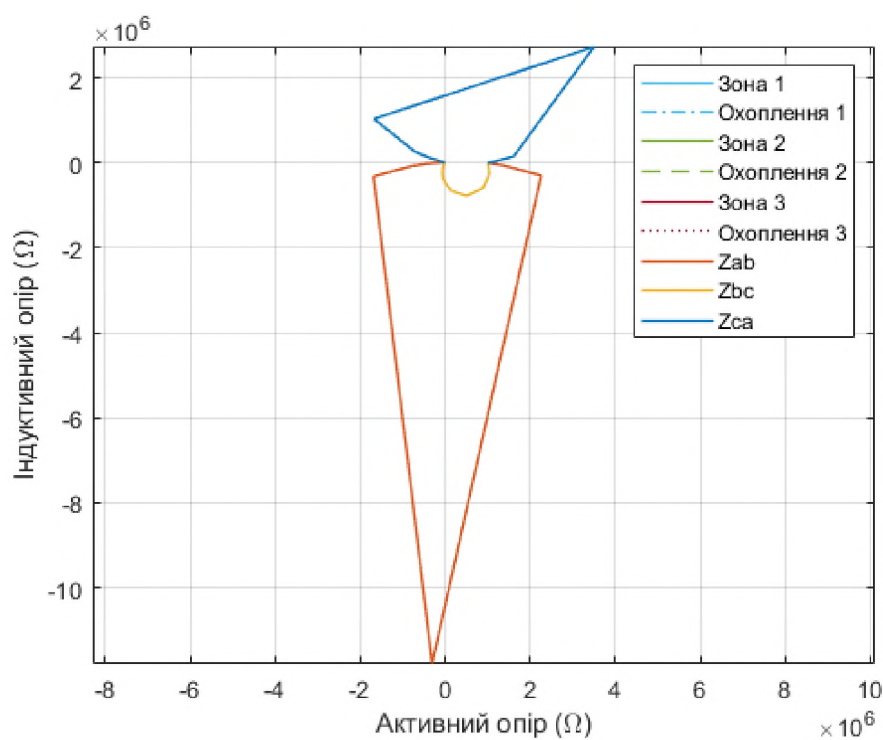


Рисунок 3.16 – Характеристика Мґо-реле при міжфазному замиканні

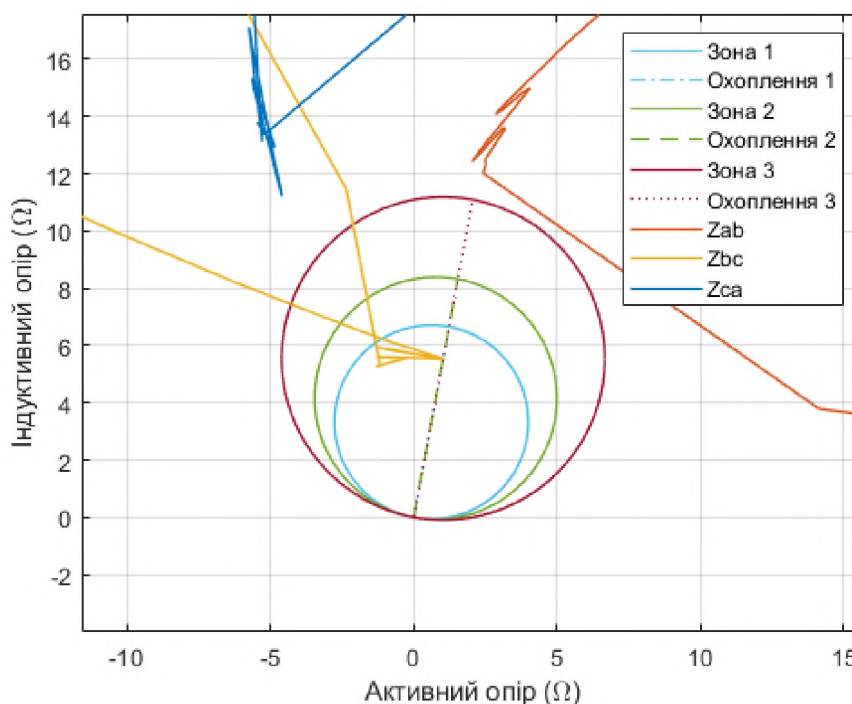


Рисунок 3.17 – Характеристика Mho-реле при міжфазному замиканні (збільшена частина)

Порівняльний аналіз результатів симуляції показав чіткі відмінності між класичним імпедансним реле та реле типу Mho. Імпедансне реле має просту кругову характеристику з центром у початку координат комплексної площини імпедансів, що робить його дуже чутливим до змін напруги та струму, але водночас схильним до помилкових спрацьовувань під час коливань потужності або при високому опорі дуги в місці КЗ. У той же час реле типу Mho має кругову характеристику, що проходить через початок координат, і як опорну величину застосовує власну напругу лінії. Це надає йому кращої стійкості до зовнішніх збурень і змін у мережі.

У симуляціях при однофазних КЗ на землю реле Mho демонструвало більш стабільну роботу в умовах високого опору замикання, тоді як імпедансне реле іноді не спромагалося виявити віддалені КЗ через зсув імпедансу за межі зони спрацьовування.

При двофазних КЗ, особливо міжфазних, обидва типи реле показували схожу ефективність, проте реле Mho краще справлялося з визначенням

напрямку ушкодження завдяки вбудованій напрямковій властивості, що є частиною його характеристики. Крім того, у разі коливань у системі (наприклад, при великих пускових струмах або перехідних процесах) реле Mho значно рідше давало хибні спрацювання, оскільки його характеристика «нахилена» у напрямку реальної лінії передачі.

Таким чином, хоча обидва типи реле забезпечують надійний захист при типових аваріях, реле типу Mho є більш сучасним і надійним рішенням для магістральних ЛЕП із високими вимогами до стійкості та селективності.

Висновки до розділу 3

У розділі проведено оцінку якості дистанційного захисту лінії 330 кВ завдовжки 42 км з урахуванням реальних умов: наявності трансформатора 750/330 кВ, навантаження 20 МВт з індуктивним характером та різних видів коротких замикань. Для аналізу використано імпедансне (з напрямними елементами) та Mho -реле з трьома зонами захисту. Симуляції показали, що обидва типи реле надійно виявляють однофазні та двофазні замикання, правильно відносячи їх до відповідних зон із відповідними часовими затримками. При однофазних замиканнях аналізуються фазна напруга та струм ушкодженої фази, при двофазних – міжфазні величини з компенсацією за струмом нульової послідовності. Імпедансне реле, хоча й чутливе, схильне до помилкових спрацювань під час коливань потужності або при високому перехідному опорі. Mho -реле, завдяки нахиленій характеристиці, що проходить через початок координат, має вбудовану спрямованість, кращу стійкість до збурень і точніше визначає напрямок пошкодження. Тому воно є більш надійним для застосування на магістральних лініях із високими вимогами до селективності.

ВИСНОВКИ

Проведені в магістерській роботі теоретичні та модельні дослідження дозволили зробити такі висновки:

1. Для лінії 330 кВ завдовжки 42 км, що з'єднує підстанції «Дніпровська-750» і «Першотравнева-330», теоретично обґрунтовано параметри дистанційного захисту: розраховано погонні та повні імпеданси, струми короткого замикання, враховано коефіцієнти трансформації трансформаторів напруги і струму, що дозволило коректно налаштувати реле дистанційного захисту.

2. Порівняльний аналіз імпедансного та Mho-реле показав, що обидва типи забезпечують високу селективність при низькому перехідному опорі, проте Mho-реле має вбудовану спрямованість, тоді як імпедансне реле без додаткового напрямного елемента може помилково спрацювати при зворотних замиканнях.

3. У реалістичній моделі з урахуванням трансформатора 750/330 кВ, навантаження 20 МВт та різних видів КЗ (однофазних, двофазних, на землю) обидва типи реле ефективно виявляють КЗ, правильно відносячи їх до відповідних зон захисту з урахуванням часових затримок.

4. Mho-реле демонструє переваги в умовах високого перехідного опору, коливань потужності та несиметричних режимів завдяки самополяризації та нахиленій характеристиці, що проходить через початок координат, що робить його стійкішим до зовнішніх збурень і більш придатним для сучасних магістральних ліній.

5. Дистанційний захист забезпечує високу селективність, швидкодію та надійність при різних типах коротких замикань в магістральних лініях електропередачі завдяки багатозонній структурі (перша зона – 80...85% лінії, миттєве спрацювання; друга – 120%, із затримкою; третя – до 200%, для резервування).

6. Отримані результати підтверджують доцільність використання Mho-реле як основного рішення для дистанційного захисту високовольтних

магістральних ліній електропередачі в умовах сучасної енергосистеми, де високі вимоги до надійності, селективності та стійкості до складних аварійних режимів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ENTSO-E (n.d.) Retrieved October 15, 2025, from <https://www.entsoe.eu/>
2. Schweitzer, E. O., & Kasztenny, B. (2018). Distance protection: Why have we started with a circle, does it matter, and what else is out there? 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 1–19. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2018.8349791>
3. Calero, F., & Altuve, H. J. (2012). Identifying the Proper Impedance Plane and Fault Trajectories in Distance Protection Analysis. 66th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference. 66th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, Georgia.
4. Fentie, D. D. (2016). Understanding the dynamic mho distance characteristic. 2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 1–15. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2016.7914922>
5. Abo-Hamad, G. M., Ibrahim, D. K., Aboul Zahab, E., & Zobaa, A. F. (2021a). Adaptive Mho Distance Protection for Interconnected Transmission Lines Compensated with Thyristor Controlled Series Capacitor. *Energies*, 14(9), 2477. <https://doi.org/10.3390/en14092477>
6. Abo-Hamad, G. M., Ibrahim, D. K., Aboul Zahab, E., & Zobaa, A. F. (2021b). Dynamic Quadrilateral Characteristic-Based Distance Relays for Transmission Lines Equipped with TCSC. *Energies*, 14(21), 7074. <https://doi.org/10.3390/en14217074>
7. Araújo, M. R., & Pereira, C. (2020). Distance Protection Algorithm for Long Parallel Transmission Lines With No Common Bus. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(2), 1059–1061. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2903932>
8. Arumuga, M., & Reddy, M. J. B. (2022). Distance Protection Methodology for Detection of Faulted Phase and Fault Along With Power Swing Using Apparent Impedance. *IEEE Access*, 10, 43583–43597. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3168563>

9. Chen, Y., Wen, M., Wang, Z., & Yin, X. (2022). A novel instantaneous value based incremental quantities distance protection for AC transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107385. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107385>
10. Ghorbani, A., Ebrahimi, S. Y., & Ghorbani, M. (2017). Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s41601-017-0034-4>
11. Ghorbani, A., & Mehrjerdi, H. (2023). Distance protection with fault resistance compensation for lines connected to PV plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108976. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.108976>
12. Hernández-Santafé, J. D., & Sorrentino, E. (2025). Problems and Solutions Concerning the Distance Protection of Transmission Lines Connected to Inverter-Based Resources. *Energies*, 18(6), 1375. <https://doi.org/10.3390/en18061375>
13. Liang, Y., Li, W., Lu, Z., Xu, G., & Wang, C. (2020). A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(2), 774–786. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2926295>
14. Liang, Y., Li, W., & Zha, W. (2021). Adaptive Mho Characteristic-Based Distance Protection for Lines Emanating From Photovoltaic Power Plants Under Unbalanced Faults. *IEEE Systems Journal*, 15(3), 3506–3516. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3015225>
15. Liang, Y., Lu, Z., Li, W., Zha, W., & Huo, Y. (2020). A Novel Fault Impedance Calculation Method for Distance Protection Against Fault Resistance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(1), 396–407. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2920690>
16. Ma, J., Xiang, X., Li, P., Deng, Z., & Thorp, J. S. (2017). Adaptive distance protection scheme with quadrilateral characteristic for extremely high-

voltage/ultra-high-voltage transmission line. IET Generation, Transmission & Distribution, 11(7), 1624–1633. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0373>

17. Magagula, X. G., Nicolae, D. V., & Yusuff, A. A. (2015). The performance of distance protection relay on series compensated line under fault conditions. AFRICON 2015, 1–6. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2015.7332035>

18. Ngo, T., Lwin, M., & Santoso, S. (2016). Analysis of distance protection in low frequency AC transmission systems. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741423>

19. Ostojić, M. M., & Stojanović, Z. N. (2023). An algorithm for distance protection based on the change of the voltage phase angle. Electric Power Systems Research, 223, 109674. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109674>

20. Pujari, R., & Nabab Alam, M. (2025). Distance Relaying for the Protection of Modern Power System Networks. IEEE Access, 13, 28861–28893. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3539919>

21. Sinclair, A., Finney, D., Martin, D., & Sharma, P. (2014). Distance Protection in Distribution Systems: How It Assists With Integrating Distributed Resources. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(3), 2186–2196. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2288426>

22. Song, G., Chu, X., Gao, S., Kang, X., Jiao, Z., & Suonan, J. (2013). Novel Distance Protection Based on Distributed Parameter Model for Long-Distance Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 28(4), 2116–2123. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2251370>

23. Zhong, Y., Kang, X., Jiao, Z., Wang, Z., & Suonan, J. (2014). A Novel Distance Protection Algorithm for the Phase-Ground Fault. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(4), 1718–1725. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2286627>

24. Distance Relay Protection in AC Microgrid. (n.d.). MathWorks. Retrieved October 15, 2025, from <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/relay-distance-protection.html>

25. Distance Protection Relay (n.d.). MathWorks. Retrieved October 15, 2025, from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/112610-distance-protection-relay>