

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Пришко Роман Володимирович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування та вибір методики визначення відмови ізоляторів повітряної
повітряної лінії електропередач
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Пришко Р. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Фомін Микола Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри прикладної та
вищої математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Пришко Р. В. Обґрунтування та вибір методики визначення відмови ізоляторів повітряної повітряної лінії електропередач. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Мета роботи - вдосконалення діагностики повітряної лінії електропередачі, систем централізації та блокування і промислових та сільськогосподарських споживачів шляхом контролю ізоляторів безконтактним способом.

Предмет дослідження - стан ізоляторів повітряних ліній 6-10 кВ в умовах експлуатації.

Ключові слова: ізолятори, повітряні лінії, методика діагностики, короткі замикання.

ABSTRACT

Pryshko R. V. Justification and selection of the method for determining the failure of overhead power line insulators. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of the work is to improve the diagnostics of overhead power lines, centralization and blocking systems and industrial and agricultural consumers by controlling insulators in a non-contact way.

The subject of the study is the condition of 6-10 kV overhead line insulators in operating conditions.

Keywords: insulators, overhead lines, diagnostic methods, short circuits.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯТОРІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ	6
1.1 Аналіз методів контролю ізоляції	6
1.2 Огляд способи діагностики ізоляторів	11
Висновки по розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ В ІЗОЛЯТОРАХ	17
2.1 Види несправності ізоляторів і фактори, що впливають на діелектричні властивості ізоляторів	17
2.2 Обґрунтування структури пристрою для визначення дефектів в ізоляторах	19
2.3 Схема заміщення ізолятора повітряної лінії електропередачі з вбудованим сигнальним пристроєм	21
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОГРАМІ MULTISIM ТРИФАЗНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З ІЗОЛЯТОРАМИ	27
Висновки по розділу 3	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

ВСТУП

Електропостачання промислових підприємств та сільськогосподарських споживачів представляє собою складний енергетичний комплекс. До основних елементів зовнішніх систем електропостачання відносяться лінії сигналізації, централізації і блокування (СЦБ), лінії поздовжнього електропостачання (ПЕ), трансформаторних підстанцій та розподільних пунктів. Робота ліній визначається як надійністю та якістю прийому та передачі електричної енергії, так і ізоляцією струмопровідних ліній.

Тривала експлуатація ізолюючого обладнання, зростання забрудненості атмосфери, збільшення вантажоперевезення, зміна природно-кліматичних умов часто призводить до порушень нормальної роботи ліній СЦБ і ПЕ. Особливо гостро виникають проблеми пошуку несправних ізоляторів в мережах 6-10 кВ через малий струм однофазного замикання, неоднорідності та протяжності лінії. Надійність ізоляції повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) повною мірою не досліджена, існуючі методи діагностики не дозволяють здійснювати оперативний контроль електричної міцності ізоляції і вимагають покращення. У зв'язку з вищевикладеним вдосконалення контролю ізоляції повітряних ліній є актуальною проблемою на сьогоднішній день.

Об'єкт дослідження – повітряні лінії електропередачі напругою 6-10 кВ промислових та сільськогосподарських споживачів.

Предмет дослідження - стан ізоляторів повітряних ліній 6-10 кВ в умовах експлуатації.

Мета роботи - вдосконалення діагностики повітряної лінії електропередачі, систем централізації та блокування і промислових та сільськогосподарських споживачів шляхом контролю ізоляторів безконтактним способом.

Для досягнення даної мети в кваліфікаційній роботі вирішені наступні **завдання** :

1. Виконано аналіз і дано узагальнення методів діагностики ізоляторів.

2. Виконано аналіз та дано узагальнення методів пошуку несправних ізоляторів в повітряної лінії електропередачі, в результаті яких запропоновано індивідуальна діагностика ізоляторів

3. Побудовано схему заміщення підключення сигнального пристрою до ізолятору повітряної лінії для визначення струму спрацьовування сигнального пристрої при виявленні несправного ізолятор.

Методологія та методи дослідження визначалися поставленими завданнями роботи і були засновані на теоретичних і експериментальні дослідження. Імітаційне моделювання процесів у програмному середовищі Multisim з урахуванням основних положень теорії лінійних електричних кіл.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Соколовський О. Ф., Пришко Р. В. ВИДИ НЕСПРАВНОСТІ ІЗОЛЯТОРІВ І ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ІЗОЛЯТОРІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 107-111.

Соколовський О. Ф., Пришко Р. В. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ В ІЗОЛЯТОРАХ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023». 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 206-808.

Пришко Р. В. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯТОРІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 188-191.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯТОРІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

1.1 Аналіз методів контролю ізоляції

Різноманітність видів та характеристик ушкоджень в даний час не дозволяє знайти який-небудь універсальний метод діагностики ізоляції, що ускладнює виявлення дефекту, збільшує час пошуку і наводить до економічних втрат [7].

Вплив зовнішніх і експлуатаційних факторів приводить до руйнування ізоляційних матеріалів і погіршує властивості ізоляції, які вимагають безперервного контролю. Знаходження несправного ізолятора необхідно здійснювати приладами, які мають достатню чутливістю в жорстких умовах експлуатації. Виявлення несправності бажано супроводжувати аналізом отриманих результатів з прогнозуванням і прийняттям подальших рішень: заміни ізолятора або перенесення на наступний термін ремонту ділянки ЛЕП. Відповідно до типових інструкцій експлуатації повітряної лінії електропередачі [1,4] до основних методів контролю технічного стану електрообладнання відносяться періодичні і позачергові огляди. Періодичність оглядів ПЛ має бути не рідше одного раз на рік, її передбачає річний план-графік на технічне обслуговування, де обсяг і норми профілактичних випробувань регламентовані ПУЕ і інструкціями [1]. Надалі обсяг робіт та випробувань визначається характером несправності або ушкодження обладнання.

Вплив на ізолятори зовнішніх факторів значно, тому старіння ізоляторів неминуче. При тривалому впливі численних експлуатаційних факторів відбуваються зміни властивостей ізоляторів, а саме [2]:

- а) трекінго-ерозійне старіння захисної оболонки під дією термічно окислювальних та гідрологічних процесів, вплив сонячної радіації;
- б) руйнування контактних зон тривало існуючими частковими розрядами;
- в) механічне руйнування тіла ізолятора в результаті виникнення мікротріщин (особливо у поєднанні з кислотним середовищем і електричним полем – так званий «крихкий злам»), багаторазові температурні коливання в

поєднанні зі значною механічною навантаженням.

Процеси, протікають в ізоляції під впливом різних експлуатаційних факторів, наводять до її руйнування і погіршують властивості ізоляції [3]. Контроль ізоляції визначається випробуванням, оцінкою стану ізоляції і прийняттям рішення о подальшої його експлуатації.

Були вивчені та проаналізовані методи оцінки стану ізоляції, на підставі яких запропоновано класифікація їх на контактні та безконтактні, електричні та неелектричні, звукові, візуальні, комбіновані (рисунок 1.11) [2,10]. Виконаний аналіз способів і пристрої пошуку місця замикання на землю та методи пошуку несправної ізоляції дозволили автору розробити інноваційний безконтактний спосіб контролю ізоляції, який передбачає застосування термофарби, використання електромеханічного, радіочастотного, електрохромного методу. Дані методи включені до розробленої схеми класифікації методів контролю ізоляції (рисунок 1.11) [2,10].

Контактні методи припускають безпосередній дотик до ізолятора приладу контролю, що представляє собою небезпеку при роботі на висоті та можливість попадання під напругу. До групи основних *електричних контактних методів* можна віднести випробування підвищеною напругою промислової частоти, вимір опору ізоляції з визначенням коефіцієнта абсорбції, приріст ємності, вимір тангенсу діелектричних втрат.

Неелектричні контактні методи – акустичної емісії, наскрізного прозвучування, віброакустичний, збудження вільних коливань – застосовують для вибіркової діагностики лінії або у разі пошуку несправної ізоляції. Прямі (контактні) методи діагностики використовують рідко, тільки при крайній необхідності.

Електричні параметри діелектриків в електричних методах аналізують спеціальними приладами. Наприклад, вимір опору ізоляції відбувається мегаомметром: визначаючи коефіцієнт абсорбції ($k_{\text{абс}}$), можна визначити вологість ізоляції [8]. Зміна величини коефіцієнта абсорбції залежить від розмірів. Ізоляції, структури, матеріалу. Вимірювання коефіцієнта засновано

на визначенні опору ізоляції в різні проміжки часу: 15 і 60 після застосування напруги, при цьому струм змінюється з часом. При сухій ізоляції коефіцієнт абсорбції значно перевищує одиницю, а у вологої ізоляції значення близько до одиниці.

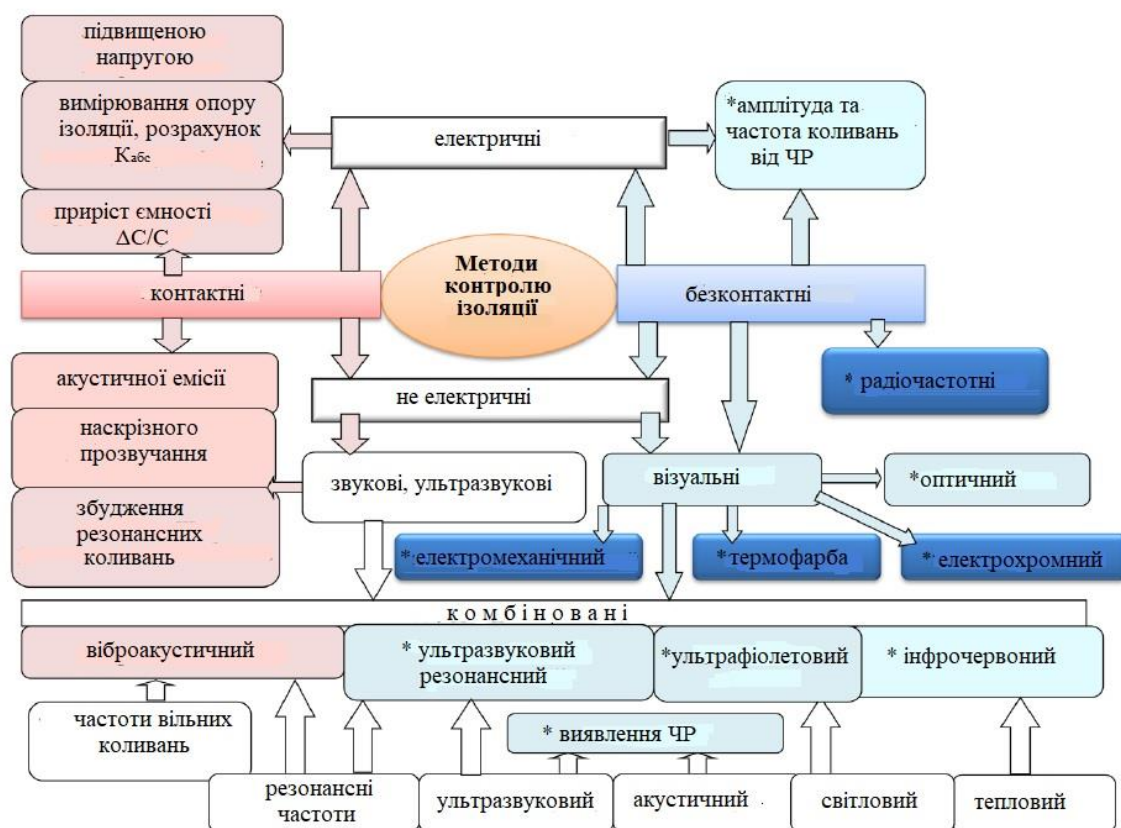


Рисунок 1.1 – Методи контролю ізоляції

* методи, не вимагають відключення напруги під час випробувань

$$k_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (1.1)$$

де R_{15} – опір ізоляції через 15 с;

R_{60} – опір ізоляції через 60 с.

У початковий момент пробою ізолятора переважає струм геометричної ємності, під дією зовнішнього електричного поля виникає поляризація діелектрика, при цьому струм абсорбції, що протікає має активну і ємнісну складову. Після 60 с поляризація припиняється через малого числа вільних зарядів і через ізолятор починає протікати струм витоку. Це пояснюється

дипольно-релаксаційним механізмом. При сухій ізоляції заряд абсорбційної ємності припиняється через 60 с, а у вологій ізоляції диполі води, орієнтація яких потребує значного часу та великих витрат енергії. Заряд абсорбційної ємності супроводжується проходженням великим по величині і тривалим струмом абсорбції [8]. Необхідно враховувати залежність коефіцієнта абсорбції від температури через поправочний коефіцієнт приведення k_2 , який залежить від різниці температури і для 10 кВ складає 1,5 [7];

$$R(t_1) = R(t_2) \cdot k_2 \quad (1.2)$$

$$R(t_2) = \frac{1}{k_2} \cdot R(t_1) \quad (1.3)$$

$$k_{\text{абс}}(t_2) = k_2 \cdot k_{\text{абс}}(t_1) \quad (1.4)$$

$$\frac{R_{60}(t_1)}{R_{15}(t_1)} = \frac{R_{60}(t_2) \cdot k_2}{R_{15}(t_2)} \quad (1.5)$$

де t_1 – температура, при якій відбувається випробування;

t_2 – температура заводських випробувань.

Слід враховувати, що вимір опору ізоляторів проводиться тільки при позитивній температурі навколишнього середовища та відсутності дощу. Даний факт може внести зміни в графік технічного обслуговування ЛЕП. Робота на висоті представляє небезпека, а з урахуванням того, що лінії сигналізації, централізації і блокування (СЦБ) та подовжнього електрозабезпечення (ПЕ) знаходяться у безпосередній близькості від контактної мережі або кріпляться на одні опори, то велика небезпека потрапляння людини під наведену напругу або під потенціал суміжної лінії під напругою. Вимір опору ізолятора ПЛЕП відносяться до особливо складним і небезпечним роботам, що вимагає постійного контролю за станом заземлюючих пристроїв, перевірки відсутності напруги і накладення на струмоведучі частини заземлення.

Ємнісно-частотний метод заснований на властивості зволоження діелектрика. Під дією змінної прикладеної напруги орієнтування диполів води можливо до частоти 8-10 Гц, після чого послаблюється орієнтування

вологи. При частоті 50 Гц не проявляється абсорбційних властивостей і обчислюється співвідношення C_2/C_{50} , яке визначає вологість діелектрика. Приріст ємності є критерієм зволоження ізоляції за рахунок явища абсорбції по закінченні певного часу, $\Delta C/C$. Приріст ємності ΔC досягається за рахунок заряду абсорбційної ємності у вологій ізоляції та відсутності заряду при сухій [8].

Таким чином, дані методи виявляють зволоженість ізоляції та очевидні дефекти, але визначити приховані дефекти ізолятора, як і раніше залишається складним завданням. Контактні методи контролю ізоляції не доцільні в випадку поточного ремонту і при діагностиці лінії електропередач. Дані випробування можуть виконуватися тільки по узгодженні з вибіркоким відбором ізоляторів (10 % загальної кількості) на досліджуваній ЛЕП. Електричні контактні методи можуть бути використані в якості профілактичного контролю.

Безконтактні методи – методи непрямої оцінки – дозволяють перевіряти стан ізоляції без відключення лінії, дистанційно. До таким методам можна віднести візуальний, ультрафіолетовий і інфрачервоний. *Звукові* методи в здебільшого застосовуються під час капітального ремонту лінії або за вхідного контролю ізоляторів. *Метод вільних коливань* може бути рекомендований для впровадження в експлуатацію після доопрацювання технології контролю і уточнення діагностичних критеріїв. *Комбіновані методи* сприяють знаходження дефекту пристроями, включаючи оптичний, акустичний, світловий, тепловий, ультразвуковий способи виявлення несправності, дані застосовуються при топографічному пошуку несправності та вимагають значного часу.

Якщо контактні методи контролю ізоляції в здебільшого застосовують при відключенні напруги на ділянці ЛЕП та супроводжуються зняттям ізоляторів з опор, то безконтактні методи застосовують без відключення напруги у ЛЕП. Виняток – оптичний контроль біноклем, який виявляє зовнішні дефекти ізолятора (у вигляді тріщин і сколів, в окремих випадках – забруднення

поверхні), тоді як внутрішні дефекти (зволоженість ізоляції або внутрішній пробій) оптичним контролем виявити неможливо.

1.2 Огляд способи діагностики ізоляторів

Для діагностики ізоляторів починають застосовувати спеціальні переносні камери, використовуючи методи безконтактного контролю – ультрафіолетової та інфрачервоної діагностики, метод виявлення часткових і коронних розрядів. Енергетичні компанії розробляють методичні вказівки щодо контролю ізоляції ЛЕП для профілактичного контролю ізоляції повітряних ліній електропередач [8]. Вважається, що інтенсивність розрядних процесів збільшується по мірі зниження ізолюючої здібності конструкції, а також внаслідок появи дефектів або забруднення і зволоження поверхні ізолятор. Таким чином, виникнення або збільшення інтенсивності корони або поверхневих часткових розрядів можна використовувати для непрямої оцінки ізолюючої здібності ізолятора і виявлення дефектів.

Реєструючи розрядні процеси в електронно-оптичному дефектоскопі (нічного бачення Філін, Коршун, CoronaScore, і денного DayCor II™), необхідно регулювати його чутливість з обліком завадостійкості і просторової роздільної здатності.

Дії оператора спрямовані на вимірювання тривалості імпульсів випромінювання ПЧ при регулюванні чутливості по амплітуді з підгонкою на показання цифрового індикатора 2,5 і вище. За тривалості оптичного випромінювання визначається величина амплітуди струму витоку [9]:

$$\ln I = 0,1 + 0,34 T_{\text{ПЧР}} \quad (\text{при } I > 2 \text{ мА}), \quad (1.5)$$

де $T_{\text{ПЧР}}$ – виміряна тривалість випромінювання ПЧР в мілісекундах (0,1 ... 9,9 мс).

Залежність (1.5) отримана за умови стійкого горіння ПЧР вигляді мікродужок, а також в умовах повного, до насичення, зволоження шару забруднення. Ця умова реалізується тільки при щільних туманах або рясному випаданні роси, що дає найбільш достовірні оцінки ступеня забруднення по

величині струму витоку, який визначаються по результатам вимірювання тривалості ПЧР.

При роботі з дефектоскопами «Філін», «Коршун» оцінку ступеня забруднення виробляють з допомогою спектродиспергуючого фільтра, встановлюваного перед вхідним об'єктивом. При цьому на екрані отримують два зображення ПЧР по областям спектру випромінювання. Зображення записують, оцифровують і визначають інтенсивність випромінювання ПЧР кількісно в двох ділянках спектру. Ступінь забруднення поверхні визначають з відношення [9]

$$\chi = 20,8 \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot I_{\text{чер}}}{I_{\text{чер}} \cdot I_{\text{син}}} \right) - 1 \right], \quad (1.6)$$

де , $I_{\text{чер}}$ і $I_{\text{син}}$ – інтенсивність випромінювання розрядів в червоній і синій областях спектра відповідно. Потім здійснюється виявлення дефектів ізоляторів та місць перекриття.

Слід відмітити, що переваги, пов'язані з високим просторовим розширенням та роботою без відключення обладнання в мережах 6-10 кВ, можуть бути недоліками. На пошук несправності потрібно час для огляду з різних оглядових майданчиків, контроль ізоляції рекомендовано виробляти в темний час доби при високій напруженості електричного поля, при цьому виявляються тільки поверхневі дефекти, а внутрішні через невеликі величини струму пробою ізолятора складно виявити.

У мережах 6-10 кВ для дистанційного та безконтактного визначення місць витоків електричного струму в енергетичному обладнанні застосовується спеціалізовані скануючі камери, які визначають несправність методом реєстрації часткових і коронних електричних розрядів при пробі ізоляторів [1]. Недолік цього пристрою – тривалість пошуку дефектного ізолятора, висока вартість приладу, тривалість записи сигналів, велика вага камери (2,5 кг), обмежений діапазон робочих температур від -10 °С до +40°С. Як і в випадку застосування оптико- електронних приладів нічного бачення, камера виявляє дефекти при великій напруженості електричного поля; складність

представляють пориви вітру, створюючи додаткові шуми.

На практиці як діагностичний прилад контролю ізоляції використовують тепловізор, який вимірює температуру об'єкта за силою його інфрачервоного випромінювання. При нормальній роботі електроустановок тепло виділяють всі струмопровідні елементи, до яких відносяться жорсткі або гнучкі провідники. Тепловізором можна виявити як погане контактне з'єднання, так і пробій ізоляторів за рахунок спектра випромінювання. Застосування в електроенергетиці інфрачервоного апарату дозволяє непрямим способом виявляти несправності в ізоляційних конструкціях [7]. Проте недоліком тепловізора, як і переносних дефектоскопів, є те, що оператор не знає, які параметри тепловізора він має вибрати при зйомці, необхідно враховувати умови зовнішнього середовища та розташування об'єкта зйомки щодо інших енергооб'єктів, а також відповідні кутові коефіцієнти випромінювання криволінійних поверхонь і виступів [7].

При діагностиці ізоляції ЛЕП складно врахувати вплив температур всіх елементів електроустановки, не припускаючи перекриття зображення струмопровідними елементами (наприклад, лінії СЦБ і поздовжнього електропостачання, які розташовані на одних опорах з контактною мережею). Виникає необхідність розгляду досліджуваних ліній із різних кутів. На достатньо близькій відстані, при цьому тепловізор не враховує багатьох фізичних ефектів, що виникають при випромінюванні, поглинанні та відображенні інфрачервоного (теплого) випромінювання. Крім того, програмне забезпечення тепловізора не враховує багато факторів через відсутності відповідних настановних параметрів, значення яких могли б задаватися до зйомки.

Таким чином, ультрачервоні і ультрафіолетові камери мають характерні недоліки при пошуку несправних ізоляторів: тривалість пошуку дефектного ізолятора, висока вартість приладів, тривалість запису сигналів, вага, обмежений діапазон робочих температур. Постійні зміни температури, вологості, швидкості вітру, грозові і комутаційні перенапруги викликають

необхідність обліку змін при налаштування дефектоскопічного обладнання, що може вплинути на результати зчитуваних параметрів та нести деяку ймовірність помилок при обробці. Для роботи з переносними приладами завчасно вивчається інформація про місцевість і плани розміщення контрольованої ізоляції, планується схема маршруту пересування, аналізуються дані показань приладів підстанцій, фіксуючих перекриття, враховується час доби. При наближенні грози заборонено застосування контролюючих приладів, так ж, як наближення до струмопровідних частин ближче, чим на відстань, зазначену у ПТЕЕС. Необхідність обліку всіх параметрів вимагає спеціального навчання персоналу навичкам оператора переносного приладу. Основним недоліком камер є те, що контроль ізоляції можна здійснювати тільки при включеній лінії. При спрацьовуванні релейного захисту на підстанціях фідерної зони при замиканні на землю лінія СЦБ та ПЕ відключається або в кращому разі пошук ізоляції може продовжуватися в перебіг двох годин з моменту настання однофазного замикання (споживачі другої категорії), цього часу мало через протяжність виділеної зони.

Оцінка надійності ізоляції по результатам випробування буває недостовірною на різних рівнях напруги. Ця проблема піднімалася на, міжнародних науково-технічних конференціях по полімерних, фарфорових та скляних ізоляторам та ізоляційним конструкцій високого напругою, де зазначалося, що проблеми вдосконалення системи діагностування ізоляторів залишаються актуальними [1,7]. Розробникам і виробникам апаратури рекомендувалося для контролю ізоляторів допрацювати існуючі методики з метою підвищення достовірності оцінки стани ізоляторів. Жоден із розглянутих методів оцінки стану ізоляторів не може бути визнаний абсолютним, тому що не дає 100%-ної гарантії розбракування ізоляторів на працездатні і дефектні при випробуваннях у польових умовах.

Висновки:

- 1 Діагностика контактним способом з відключенням ділянки лінії електропередачі складна, оскільки вона проводиться на висоті з дотриманням

всіх правил електробезпеки, через небезпеки попадання під напругу.

2 При діагностиці безконтактним способом необхідно враховувати особливості налаштування приладів контролю ізоляції, узгоджувати обходи і потрібно спеціальне навчання персоналу. Знаходження несправного ізолятора існуючими приладами при відключеною лінії неможливо.

3 Для вдосконалення діагностики ізоляторів і підвищення достовірності оцінки їх стану необхідно проводити контроль декількома методами або удосконалювати розроблені системи діагностики, або розробляти нові способи контролю.

4 На повітряних лініях електропередач важливою є проблема достовірного пошуку несправний ізоляції в лініях СЦБ, ПЕ споживачів 6-10 кВ. Знаходження несправного ізолятора найбільш утруднено через відсутності спеціальних приладів пошуку та малих струмів замикання на землю при великій протяжності та розгалуженості ЛЕП.

5 Контроль ізоляції здійснюється тільки під час обходів з оптичними приладами (бінокль), в рідкісних випадках ультрафіолетовими або інфрачервоними камерами нічного та денного бачення. Спеціальної безперервної діагностики ізоляторів в ЛЕП в даний час не ведеться, тому актуальна розробка безконтактного методу для знаходження несправних ізоляторів, яка б дозволила здійснювати безперервний контроль.

Висновки по першому розділу

1 Пробій ізоляції викликає однофазні замикання на землю, які наводять до економічним втрат, викликаних несподіваними відмовами електроустаткування, недовідпусткою споживачам електроенергії, руйнуванням елементів системи електропостачання, прискореним старінням ізоляції, виникненням явища ферорезонансу, від якого в мережах 6-10 кВ частіше всього пошкоджуються трансформатори напруги. При наближенні до місця замикання на землю виникає можливість попадання людей під небезпечно для життя крокове напруга і напруга дотику.

2 Час, який витрачається на пошук несправної ізоляції, значно перевищує

допустимі норми часу через недосконалості діагностичних приладів і складності їх застосування, приводять до помилкових дій персоналу.

3 Існуючі методи пошуку однофазного замикання через різноманітності видів і характеру ушкоджень вимагають індивідуального підходу до вибору дистанційних і топографічних методів. Різноманітність технічних рішень свідчить про складності проблеми визначення точного місця несправності повітряної лінії електропередач.

4 Для підвищення достовірності оцінки стану ізоляторів контроль необхідно проводити декількома методами або удосконалювати наявні системи діагностики, або розробляти нові методи контролю.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ В ІЗОЛЯТОРАХ

2.1 Види несправності ізоляторів і фактори, що впливають на діелектричні властивості ізоляторів

Як відомо з [1], значна частина відмов ПЛ обумовлена несправністю ізоляторів. Можна виділити два види несправностей ізоляторів: катастрофічні (швидкі) та повільні. Перший вид відмов обумовлений, наприклад пробоем ізоляції, в зокрема, через грозний розряд або дефекти матеріалу ізолятора. Другі викликаються поступовим зниженням опору ізоляції, наприклад, за рахунок поверхневого забруднення, виникнення провідних доріжок при часткових розрядах і ін. Якщо перший вигляд несправностей ізоляторів може бути зареєстрований контрольно-захисними пристроями і системами підстанцій, то реєстрація другого практично неможлива. Поверхнєве перекриття може привести до наступної катастрофічної відмови ізолятора зі усіма що впливають звідси негативними наслідками [1].

Процеси, протікають в ізоляції під впливом різних експлуатаційних (хімічних, теплових, механічних та електричних) факторів, що призводять до старіння діелектричних властивостей ізолятора та його перекриття або пробоем (рисунки 2.1) [2]. Основні причини перекриття або пробоем ізолятора: атмосферні та комутаційні перенапруги, заводський брак, ушкодження при транспортуванні і монтажі, забруднення, при цьому необхідно враховувати фактори, що впливають на працездатність електропостачання пристроїв сигналізації, централізації і блокування (СЦБ) і подовжнього електрозабезпечення (ПЕ) (малюнок 1.4).

До таких факторів відносяться метрологічні умови, недоліки експлуатації, дія сторонніх предметів, пошкодження пристроїв зовнішнього електропостачання, знос і старіння, помилки персоналу, вандалізм, недоліки монтажу, заводський брак, які супроводжують ушкодження ізоляційних

конструкцій.

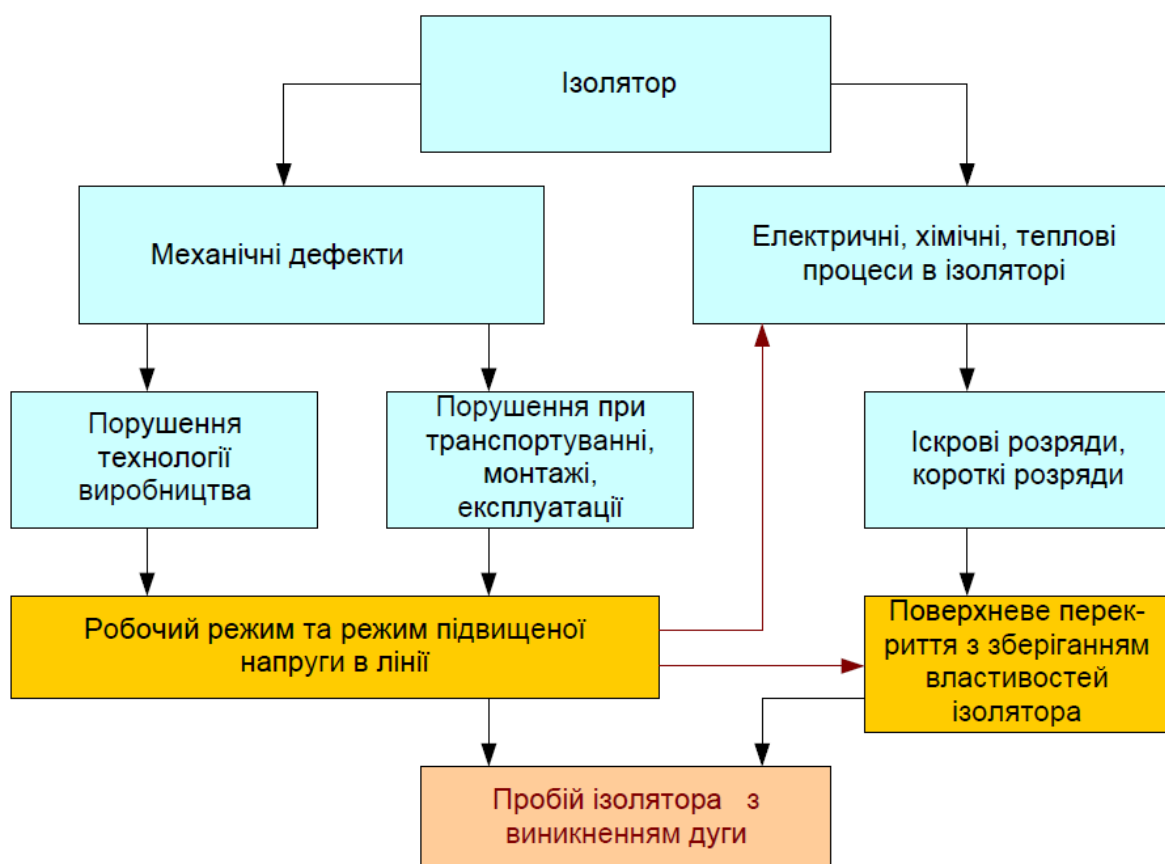


Рисунок 2.1 - Причини пробою ізолятора

Протікання поверхневого або наскрізного струму пробою супроводжується спрацюванням релейний захисту підстанцій від однофазного замикання та тривалим пошуком аварійної ділянки.

На рисунку 2.2 наведено узагальнену схему ділянки повітряної лінії електропередач. У якості прикладу на однолінійній схемі показано трифазна ЛЕП з двома живильними підстанціями (П/С).

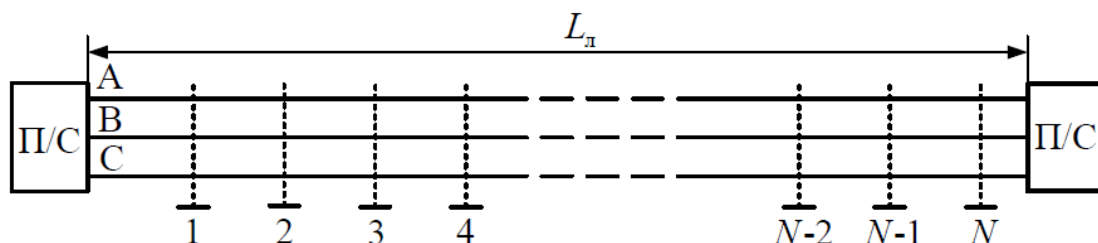


Рисунок 2.2 – Узагальнена схема високовольтний повітряної лінії 6-10 кВ

Протягом довжини лінії розміщені опори, умовно позначені як 1 ,

2 , ... (N -1), N. Довжина лінії $L_{\text{л}}$ може досягати декількох десятків кілометрів і залежить від багатьох факторів, у тому числі від виду струму. відповідно з цим кількість N опор на ділянці повітряної лінії електропередачі може досягати кількох сотень. Очевидно, що протяжність аварійної ділянки призводить до значних витрат часу для пошуку несправного ізолятора, що може викликати наступне порушення функціонування лінії електропостачання.

2.2 Обґрунтування структури пристрою для визначення дефектів в ізоляторах

Індикація кожного ізолятора дозволить здійснити індивідуальний підхід до його діагностики з обліком особливостей виготовлення, монтажу, експлуатації і місцевих зовнішніх впливаючих факторів, при цьому збільшиться точність знаходження місця ушкодження де конкретно відмовив ізолятор.

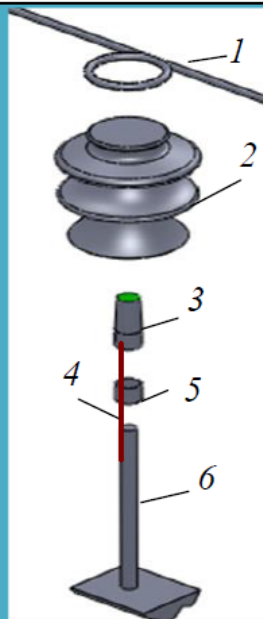
Пропонується в ізолятор вбудувати пристрій контролю [5]. Ціль пристрою - виявлення дефектів ізоляторів, скорочення часу виявлення дефекту. Зазначена мета досягається тим, що струм замикання наземлю направляють через сигнальний пристрій. На рисунку 2.3 наведено схема, ілюструюча принцип роботи запропонованого *пристрої для визначення дефектів в ізоляторах* ПЛ, який задовольняє викладеним вимог. На відміну від типового виконання у пристрої пропонується змінити кріпильний вузол ізолятора, не змінюючи форму ізолятора та зберігаючи елементи заземленої несучої конструкції (ЗНК) - (Штир, траверса, спуск і контур заземлення опори) (Таблиця 2.1). У штирьовому ізоляторі стандартний кріпильний вузол - пластмасовий ковпачок, що з'єднує корпус ізолятора зі штиром ЗНК шляхом різьбового з'єднання з боку шийки ізолятора та зазубрин з боку штиря . Не змінюючи різьбове з'єднання, пропонується подовжити ковпачок і покрити його струмопровідної плівкою. Покриття дозволить уловлювати струм пробойом ізолятора на поверхні кріплення. Подовження ковпачка дасть можливість контролювати не тільки наскрізний, але і поверхневий струм

пробою ізолятор.

Пристрій працює наступним чином: з проводу 8 лінії електропередачі через різницю потенціалів між пробитим ізолятором 1 і заземленою несучою конструкцією 6 при пробіі ізолятора починає протікати струм пробою, який проходить через струмопровідну плівку 3 кріпильного елемента 2, з виступаючої частини 9 якого по провіднику 4 через сигнальний пристрій 5 надходить на заземлену конструкцію 6. При проходженні однофазного струму пробою через сигнальний пристрій 5 останній спрацьовує.

Таким чином, запропонований пристрій дозволяє виявити дефект ізолятора за рахунок використання струму замикання на землю, тобто за рахунок самого дефект ізолятора.

Таблиця 2.1 - Структура кріплення сигнального пристрою до ізолятору

До модернізації	Після модернізації	
1 – ПЛ	1 – ПЛ (повітряна лінія)	
2 – тіло ізолятора	2 – тіло ізолятора	
3 – кріпильний вузол (ковпачок)	3 – кріпильний вузол – подовжений ковпачок, покритий струмопровідною плівкою з місцем кріплення провідника	
	4 – провідник	
	5 – сигнальний пристрій	
6 – ЗНК	6 – заземлена несуча конструкція (ЗНК)	

Застосування запропонованого вбудованого пристрою значно скоротить час пошуку пошкодженого ізолятора і може запобігти аварійному стану системи електропостачання [5,6].

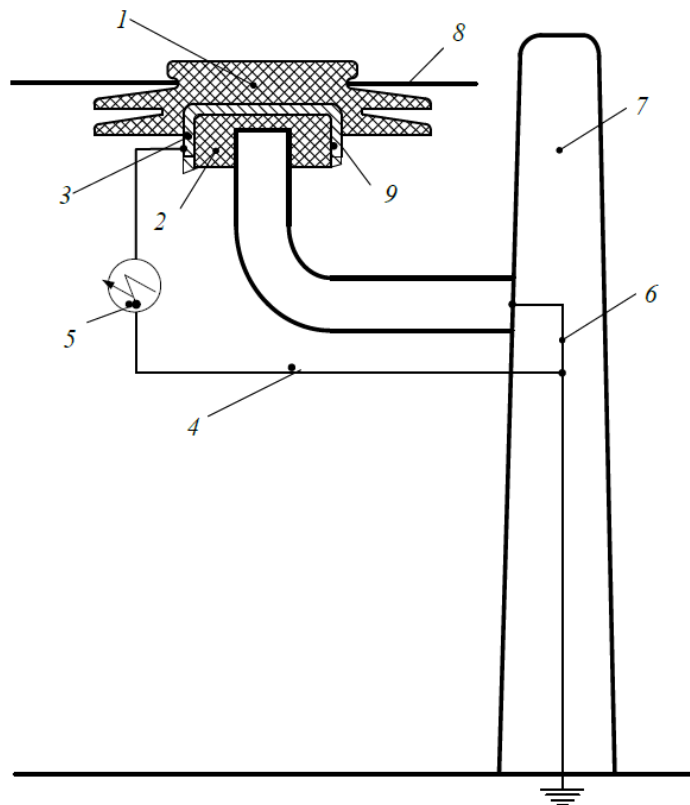


Рисунок 2.3 – Пристрій визначення дефектів в ізоляторах

Наскрізний або поверхневий, катастрофічний (швидкий) або повільний пробій ізоляції повинен реєструватися розробленим *пристроєм для визначення дефектів в ізоляторах*. Вбудований в ізолятор пристрій може визначити несправність ізолятора на ранній стадії розвитку дефекту і запобігти негативним наслідкам, які викликають відмови в лінії електропередачі, тим самим забезпечуючи надійність енергосистеми.

2.3 Схема заміщення ізолятора повітряної лінії електропередачі з вбудованим сигнальним пристроєм

Для побудови схеми заміщення підключення сигнального пристрою до ізолятора повітряної лінії електропередачі у встановленому режимі однофазного замикання обмежимося аналізом умов живлення лінії з однією підстанцією. На рисунку 2.4 розглянуті основні опори ізолятора, модернізованого кріпильного елемента і заземлювача.

Опір ізолятора включають активні і ємнісні складові, враховують проходження струму пробою як по поверхні - струм витoku, так і при

наскрізному пробі з урахуванням прикладеної напруги. З рисунку 2.4 видно, що в обмеженні змінних струмів ізолятора певну роль можуть грати параметри струмопровідної плівки, кріпильного елемента, сигнального пристрою і заземленою несучою конструкції.

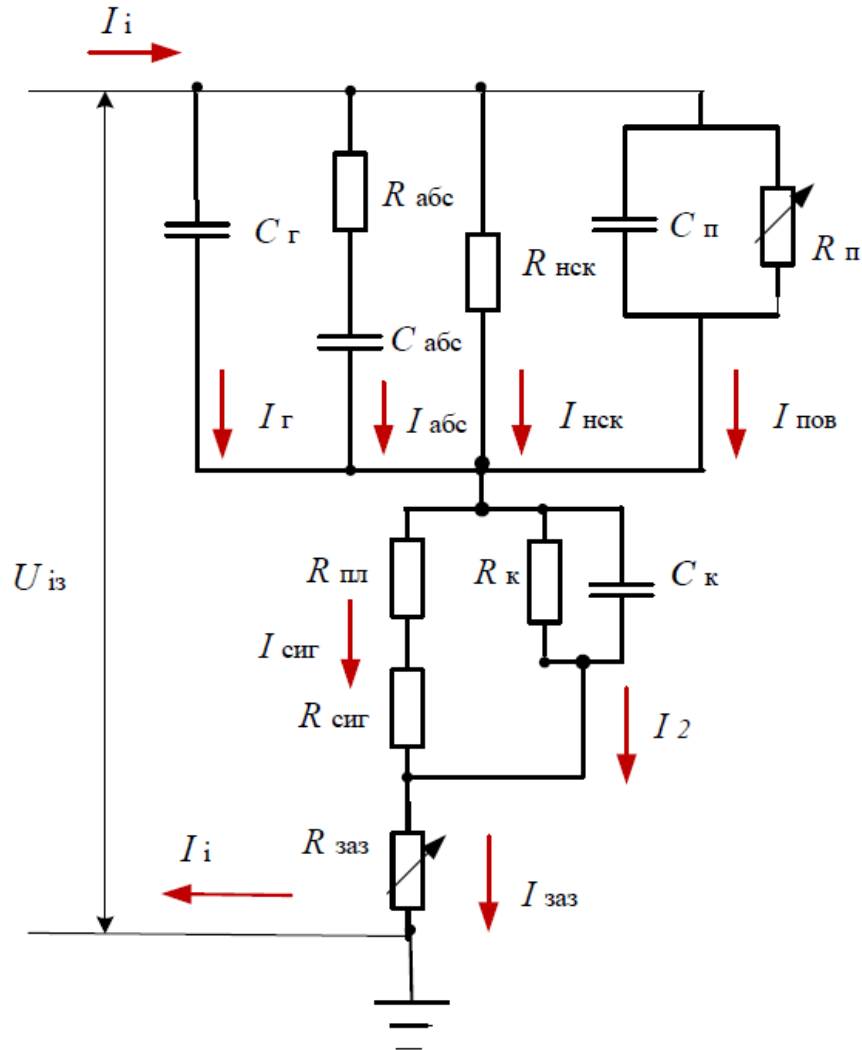


Рисунок 2.4 – Схема заміщення ізолятора повітряно лінії електропередачі з вбудованим сигнальним пристроєм

Ізолятор характеризується параметрами геометричної ємності $C_Г$, абсорбційними елементами $R_{абс}$ та $C_{абс}$, опором для наскрізного струму провідності $R_{нск}$, поверхневими параметрами $R_п$ і $C_п$. На рисунку 2.4 позначені опір струмопровідної плівки ковпачка $R_{пл}$, активний опір $R_к$ і ємність пластмасового ковпачка $C_к$, опір сигнального пристрою $R_{сиг}$, опір заземленої несучою конструкції $R_{пр}$ і опір заземлювача $R_{заз}$.

Струм пробою ізолятора складається з струму заряду геометричної ємності I_{Γ} , струму абсорбції $I_{абс}$, струму наскрізний провідності $I_{нск}$ і поверхневого струму пробою $I_{п}$.

Струм заряду геометричної ємності C_{Γ} визначається геометричними розмірами ізолятора [8]. Струм заряду геометричної ємності C_{Γ} визначається матеріалом та розмірами ізолятора. Ємнісна складова цього струму практично незмінна в процесі експлуатації і визначається за формулою

$$i_2 = \omega \cdot C_2 \cdot U_{із}. \quad (2.1)$$

Можливі зміни струму геометричної ємності можуть бути обумовлені лише коливаннями прикладеного напруги $U_{із}$.

Значення струму абсорбції залежить від наявності дефектів, неоднорідностей в ізоляції, ізоляційного матеріалу. У полярних діелектриках, до яких відноситься електротехнічний фарфор і скло, струм абсорбції додатково створюється за рахунок орієнтації дипольних молекул під впливом змінного електричного поля. На параметри $R_{абс}$ і $C_{абс}$ значною мірою впливає на зволоження, особливо при наявності відкритих пор через неякісне виготовлення чи порушення покриття при монтажі та експлуатації.

Струм конденсатора змінюється в часі через процеси орієнтування диполів в електричному полі: чим більше величина опору абсорбції $R_{абс}$, тим більший час заряду.

При змінному напрузі струм абсорбції складається з активного

$$i'_{абс} = U_{із} \cdot \frac{G_{абс} \omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1}, \quad (2.2)$$

і реактивної складової [8]

$$i''_{абс} = U_{із} \cdot \frac{B_{абс} \omega \tau}{\omega^2 \tau^2 + 1}, \quad (2.3)$$

де $G_{бс}$ - активна провідність, яка відповідає струму абсорбції,

$B_{абс}$ - реактивна провідність, відповідна струму абсорбції,

τ - час згасання струму абсорбції до її початкового значення.

Струм наскрізної провідності $I_{нск}$ визначається опором постійному струму

ізоляції $R_{нск}$, який залежить від стану ізоляції матеріалу ізолятора

$$i_{нск} = \frac{U_{нск}}{R_{нск}} = U_{із} \cdot G_{із}, \quad (2.4)$$

де $G_{із}$ - провідність ізоляції,

$U_{із}$ - прикладена напруга.

Складові поверхневого струму змінюються в широких межах. Вплив надають об'єм та вид забруднення, вологість та кліматичні. умови навколишнього середовища, радіація і механічні дії. Комплекс загального опору поверхневого шару можна представити в наступному вигляді :

$$Z_{п} = \frac{R_{п} \cdot (-jX_{п})}{R_{п} - jX_{п}} \cdot \frac{R_{п} + jX_{п}}{R_{п} + jX_{п}} = \frac{R_{п} \cdot jX_{п}^2}{R_{п}^2 + jX_{п}^2} - j \frac{R_{п}^2 \cdot jX_{п}}{R_{п}^2 + jX_{п}^2} = R'_{п} - jX'_{п}, \quad (2.5)$$

де $R'_{п}$ - активна складова еквівалентного поверхневого опору, яка дорівнює

$$R'_{п} = \frac{R_{п} \cdot jX_{п}^2}{R_{п}^2 + jX_{п}^2}, \quad (2.6)$$

$X'_{п}$ - реактивна складова еквівалентного поверхневого опору, яка відповідно дорівнює

$$X'_{п} = \frac{R_{п}^2 \cdot jX_{п}}{R_{п}^2 + jX_{п}^2}. \quad (2.7)$$

Тоді складники поверхневого струму будуть визначатися з рівнянь:

$$i'_{пов} = \frac{U_i}{R'_{п}} = U_i \cdot \frac{R_{п}^2 + jX_{п}^2}{R_{п} \cdot X_{п}^2} \quad (2.8)$$

та

$$i''_{пов} = \frac{U_i}{X'_{п}} = U_i \cdot \frac{R_{п}^2 + jX_{п}^2}{R_{п}^2 \cdot X_{п}}. \quad (2.9)$$

Результатуючий активний струм ізолятора дорівнює

$$I_a = I_{нск} + I'_{пов} + I'_{абс}, \quad (2.10)$$

а реактивний струм ізолятора

$$I_p = I_{нск} + i'_{пов} + i''_{пов}. \quad (2.11)$$

Таким чином, активна і реактивна складова будуть формувати результуючий струм ізоляції в усталеному режимі роботи. Комплекс даного струму визначається рівнянням

$$\dot{I}_i = \dot{U}_{iz} (\dot{I}_a + j\dot{I}_p), \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_i = U_{iz} \cdot \left(\frac{1}{R_{нск}} + \frac{G_{абс} \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{\omega^2 \cdot \tau^2 + 1} + \frac{R_n^2 + X_n^2}{R_n \cdot X_n^2} + j \frac{B_{абс} \cdot \omega \cdot \tau}{\omega^2 \cdot \tau^2 + 1} + j\omega C_\Gamma + j \frac{R_n^2 + X_n^2}{R_n \cdot X_n} \right).$$

Струм, проходить через струмопровідне покриття ковпачка і сигнальний пристрій, можна знайти, прирівнявши напруги відповідних гілок кріпильного елемента

$$\dot{I}_{1cu2} (R_{пл} + R_{сиг}) = \dot{I}_2 \left(\frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right). \quad (2.14)$$

Виразим струм I_2 із

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{зз} = \dot{I}_{1cu2} + \dot{I}_2. \quad (2.15)$$

Тоді

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_i - \dot{I}_{1cu2}. \quad (2.16)$$

Підставимо отриманий вираз I_2 в (2.14)

$$\dot{I}_{1cu2} (R_{пл} + R_{сиг}) = (\dot{I}_i - \dot{I}_{1cu2}) \left(\frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right), \quad (2.17)$$

$$\dot{I}_{1cu2} \left(R_{пл} + R_{сиг} + \frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right) = \dot{I}_i \left(\frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right). \quad (2.18)$$

Розрахуємо струм спрацьовування сигнального пристрої в випадку пробою ізоляції

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1cu2} &= \frac{\dot{I}_i \left(\frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right)}{R_{пл} + R_{сиг} + \frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa}} = \frac{\left(\frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right) \cdot U_{iz} \cdot \left(\frac{1}{R_{нск}} + G_{абс} \cdot \frac{\omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1} + \frac{R_n^2 + X_n^2}{R_n \cdot X_n^2} \right)}{R_{пл} + R_{сиг} + \frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa}} + \\ &+ \frac{\left(\frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa} \right) \cdot U_{iz} \cdot \left(jB_{абс} \cdot \frac{\omega \tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} + j\omega C_\Gamma + j \frac{R_n^2 + X_n^2}{R_n \cdot X_n} \right)}{R_{пл} + R_{сиг} + \frac{R_\kappa \cdot (-jX_\kappa)}{R_\kappa - jX_\kappa}}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Тангенс кута діелектричних втрат ($\operatorname{tg}\delta$) визначається ставленням активних струмів ізоляції до реактивних складовим. У робочому стані ця величина для ізоляції з електротехнічної порцеляна, скла і полімеру складає 0,01-0,03. Отже, в нормальному режимі активними складовими струмів ізоляції можна знехтувати з достатнім ступенем точності [7, 8].

Для проходження струму пробою при однофазному замиканні на землю необхідно, щоб сумарні опори пробитого ізолятора, кріпильного вузла та заземленої несучої конструкції були відносно менше ємнісного опору пошкодженої фази. Тому слід виставити обмежувальні умови вибору струму спрацьовування сигнального пристрої $I_{\text{сиг}}$.

При контролі ізолятора величина діагностичного струму розраховується за виведеною формулою. Для вибору струму спрацьовування сигнального пристрою величина струму уставки може бути уточнено.

Висновки по другому розділу

Наведена еквівалентна схема ізолятора зі вбудованим сигнальним пристроєм, виконаний її аналіз і знайдені основні закономірності електричних процесів при пробі ізолятор. Визначено вплив параметрів елементів схеми - геометричної ємності, абсорбційних опорів, наскрізної провідності і зміни поверхневого опору - на функціонування вбудованого сигнального пристрою.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОГРАМІ MULTISIM ТРИФАЗНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З ІЗОЛЯТОРАМИ

Перекриття ізоляції можна віднести до нестійких однофазних замикань на землю (ОЗЗ). Такі замикання можуть самоусуватися, залишатися нестійкими і при деяких умовах переходити в стійкі. Нестійкі замикання можуть мати характер одноразового імпульсного перекриття (пробою) з наступним відновленням міцності ізоляції або багаторазового повторюваного перекриття.

Дугові ОЗЗ відбуваються при відсутності надійного гальванічного зв'язку пошкодженої фази з землею в результаті перекриття ізоляції. Гасіння дуги в основному відбувається при проходженні змінного струму через нуль (напівперіод $\approx 0,5-1$ мс), у деяких випадках за рахунок деіонізації пошкодженої ізоляції гасіння відбувається швидше [2]. При струмах 5 А дуга може згаснути та ОЗЗ самоусунутись, супроводжується тривалим горінням дуги, викликаючи стійке замикання на землю.

Дугові замикання в мережах 6-10 кВ представляють собою складні процеси, залежні від параметрів і структури мережі, режиму нейтралі, величини перехідного опору у місці замикання та інших зовнішніх експлуатаційних факторів. Опис цих процесів представляється важким завданням, яке до теперішнього часу до кінця не вирішено.

Для складання схеми заміщення пропонується змоделювати роботу ЛЕП системи з ізолюваною нейтраллю в нормальному та усталеному режимі однофазного замикання на землю при змінах наскрізного і поверхневого опорів ізолятор. Опис процесів, що відбуваються при роботі в системі із ізолюваною нейтраллю, наводиться в джерелах [6].

У режимі *нормальною роботи* передбачається, що мережа має симетричне навантаження по фазам. Джерелом живлення для розглянутих мереж може служити трансформатор тягової підстанції, обмотки якого з'єднані в зірку, а

нейтраль ізольовані. Розподіл ємностей фаз ліній електропередачі залежить від довжини l та питомого опору C_0 ліній $C=C_0 \cdot l$. При симетричному навантаженні фаз можна записати вектори струмів в проводах фаз

$$\dot{I}_{\Sigma A} = \dot{I}_{AC_0} + \dot{I}_A; \quad \dot{I}_{\Sigma B} = \dot{I}_{BC_0} + \dot{I}_B; \quad \dot{I}_{\Sigma C} = \dot{I}_{CC_0} + \dot{I}_C. \quad (3.1)$$

де $\dot{I}_{\Sigma A}, \dot{I}_{\Sigma B}, \dot{I}_{\Sigma C}$ – вектори струмів в проводах фаз зі сторони джерела живлення; $\dot{I}_{AC_0}, \dot{I}_{BC_0}, \dot{I}_{CC_0}$ – вектори ємнісних струмів фаз ЛЕП; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – вектори струмів навантаження в проводах фаз ЛЕП [26] (рисунок 2.6).

Ємнісний струм кожної фази при симетричності системи фазних напруг дозволяє записати

$$I_{C_0} = U_{\phi} / X_C = U_{\phi} \cdot \omega \cdot C_0 \cdot l, \quad (3.2)$$

де U_{ϕ} – модуль фазної напруги; X_C – ємнісний опір проводу фази ЛЕП; ω – кутова частота, l – довжина ЛЕП.

Вектори ємнісних струмів фаз складають симетричну зірку (рисунок 3.1), дані струми частково компенсують індуктивне навантаження споживачів і зменшують модулі векторів струмів в проводах фаз зі сторони джерела живлення. Сума ємнісних струмів дорівнює нулю, а напруги проводів фаз по відношенню до землі рівні фазним напругам.

За допомогою програми *Multisim* змодельована спрощена модель роботи трифазної повітряної ЛЕП у системі із ізольованою нейтраллю (рисунок 2.7) з обліком вбудованого в ізолятор сигнального пристрою. Модель передбачає пофазні еквівалентні індуктивності джерела живлення та провідників лінії L_E . Розподілені ємності фаз наведені в вигляді еквівалентних ємностей лінії C_E моделюється ділянки.

Для вибору струму уставки сигнального пристрою обмежимося живленням ліній з однієї з підстанцій. Моделюючи несправність ізолятора, передбачимо можливість зміни в складових опорі ізолятора, які включають в себе опір геометричної ємності C_p , абсорбційні опору $R_{абс}$ і $C_{абс}$, опору наскрізний провідності $R_{нск}$, поверхневі опору

ізолятора $R_{\text{пл}}, C_{\text{пл}}$.

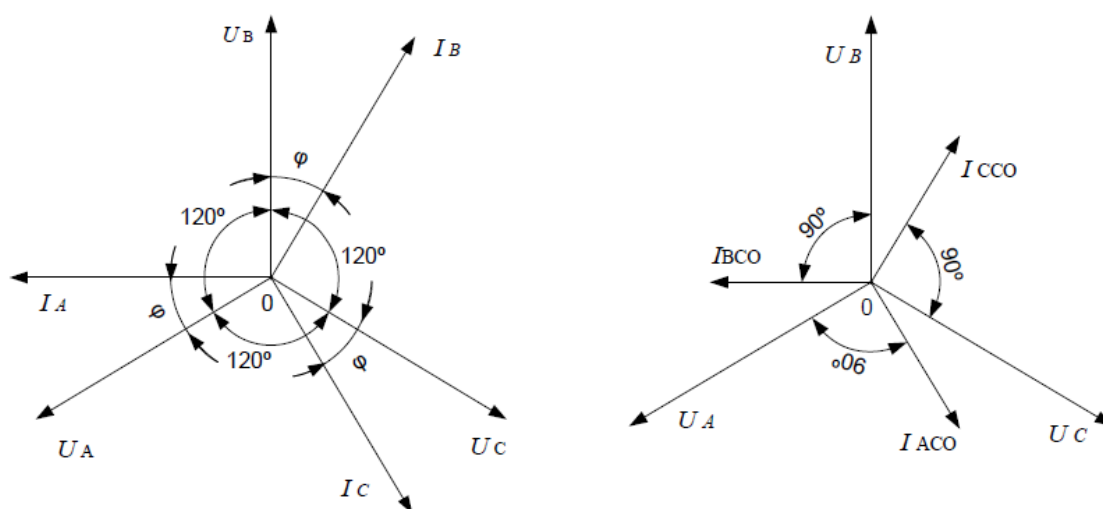


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма нормального режиму роботи системи з ізольованою нейтраллю

У розроблену модель схеми трифазної лінії включені опору модернізованого кріпильного вузла R_k і C_k з струмопровідною плівкою $R_{\text{пл}}$ і сигнального пристрої $R_{\text{сиг}}$. У схемі заміщення враховано можливість зміни опору заземлювача $R_{\text{заз}}$ через вплив зовнішніх і внутрішніх експлуатаційних факторів.

Програма *Multisim* дозволяє моделювати як зміну властивостей ізоляторів у вигляді зменшення або збільшення опору, так і повний пробій ізолятора - режим замикання (функцію КЗ). Завдання моделювання схеми – показати умови вибору струму спрацьовування сигнального пристрою вбудованого в ізолятор на ділянці ЛЕП

Можливість встановлення вимірювальних приладів цієї програми дозволяє спостерігати за змінами параметрів ЛЕП і робити відповідні висновки. Для спостереження за розподілом струму в ізоляторі передбачені амперметри на приєднаннях, які враховують його опори (поверхневі, геометричної ємності, абсорбційні, наскрізної провідності), вольтметри контролюють зміни напруги. У моделі вимірювальні прилади позначені по їх розташуванню в представлений схемі трифазної ЛЕП (рисунок 2.7). Амперметри, вимірюючі

струми габаритної ємності ізоляторів по фазах A , B , C , позначені $I_{ГА}$, $I_{ГВ}$, $I_{ГС}$, вимірювальні струми абсорбції за відповідними фазами – $I_{абсА}$, $I_{абсВ}$, $I_{абсС}$. Аналогічно прийняті позначення амперметрів для вимірювання наскрізних струмів $I_{нскА}$, $I_{нскВ}$, $I_{нскС}$ та поверхневих струмів ізолятора $I_{пА}$, $I_{пВ}$, $I_{пС}$. Струми сигнального пристрої у фазах A , B і C вимірюються відповідними амперметрами $I_{сигА}$, $I_{сигВ}$, $I_{сигС}$, а струми, що приходять на підстанцію, - амперметрами, що знаходяться у джерела живлення $I_{джА}$, $I_{джВ}$, $I_{джС}$. Для визначення фазної напруги встановлені в відповідних фазах вольтметри V_A , V_B і V_C , а для лінійної напруги – V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} .

Модель схеми трифазної лінії дозволяє змінювати відповідні параметри як самої ЛЕП залежно від довжини, так і опір ізоляторів при наскрізному або поверхневому пробі в фазі з допомогою функції «КЗ» та «Виток».

Розроблена схема дозволяє з деякою ступенем точності враховувати опір лінії і ізолятора, а також вбудованого сигнального пристрою та опір заземлювача, тому в кожному з фазних приєднань встановлені амперметри, які показують відповідні зміни струмів при моделюванні зміни в опорі ізолятора.

Для *нормальної* роботи системи з ізолюваною нейтраллю характерний великий опір ізоляції, тому сумарний струм при симетричному навантаженні дорівнює нулю і захист від ОЗЗ не спрацює (рисунок 3.3).

На схемі можна змоделювати пробій ізолятора у *встановленому режимі однофазного замикання*. У випадку наскрізного пробією ізолятора фази A на землю напруга на пошкодженій фазі A близько до нуля $U'_A = 0$, тоді між непошкодженими фазами і землею встановлюється новий зв'язок між новою системою фазних напруги. При цьому вектори напруг непошкоджених фаз, U'_B, U'_C збільшуються по модулю в $\sqrt{3}$ рази і кут зсуву між ними складе 60° , замість 120° у нормальному режимі (рисунок 3.3).

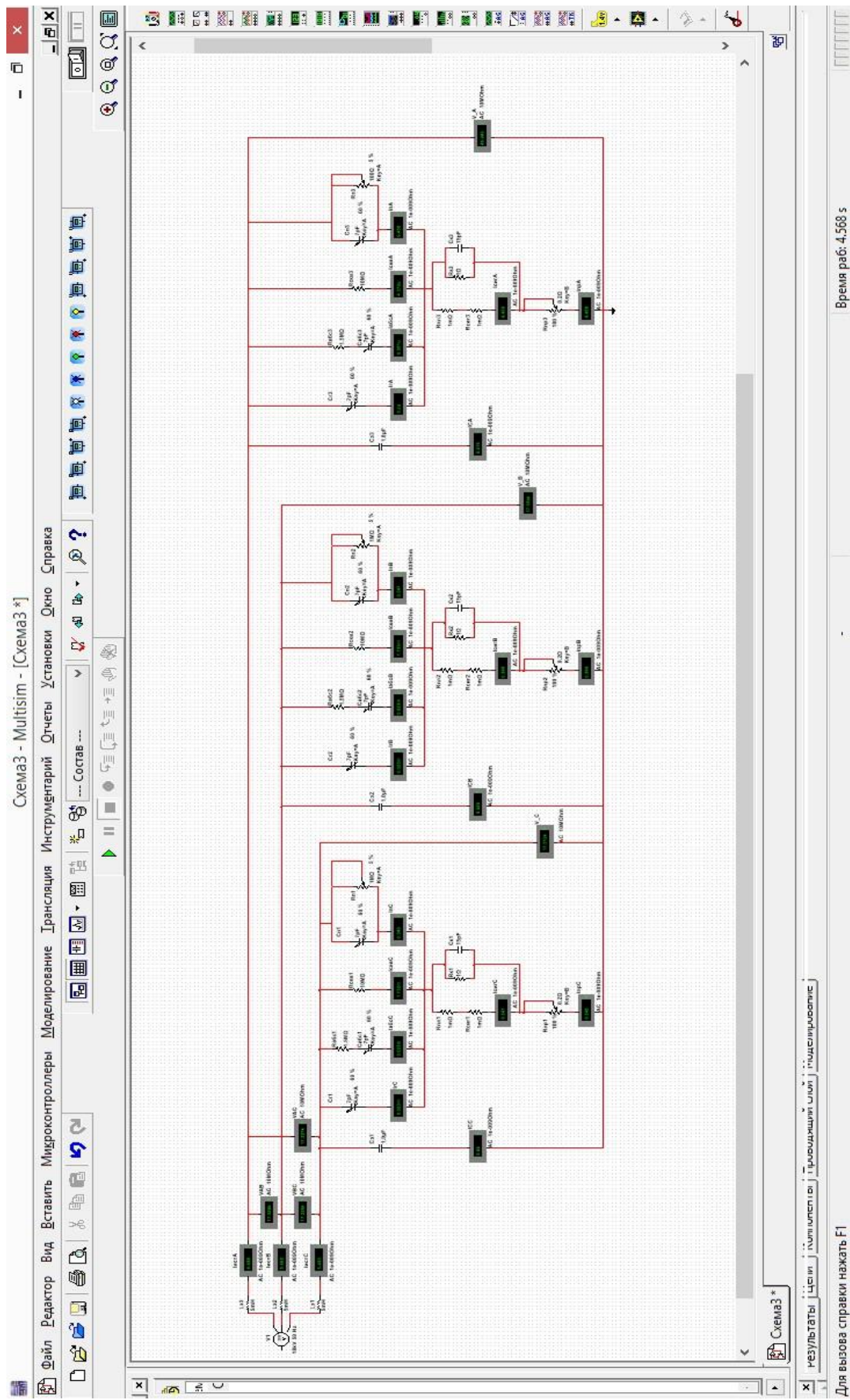


Рисунок 3.2 – Спрощена схема у програмі Multisim трифазної повітряної лінії електропередачі в системі з ізольованою нейтраллю з вбудованими в ізолятори сигнальними пристроями

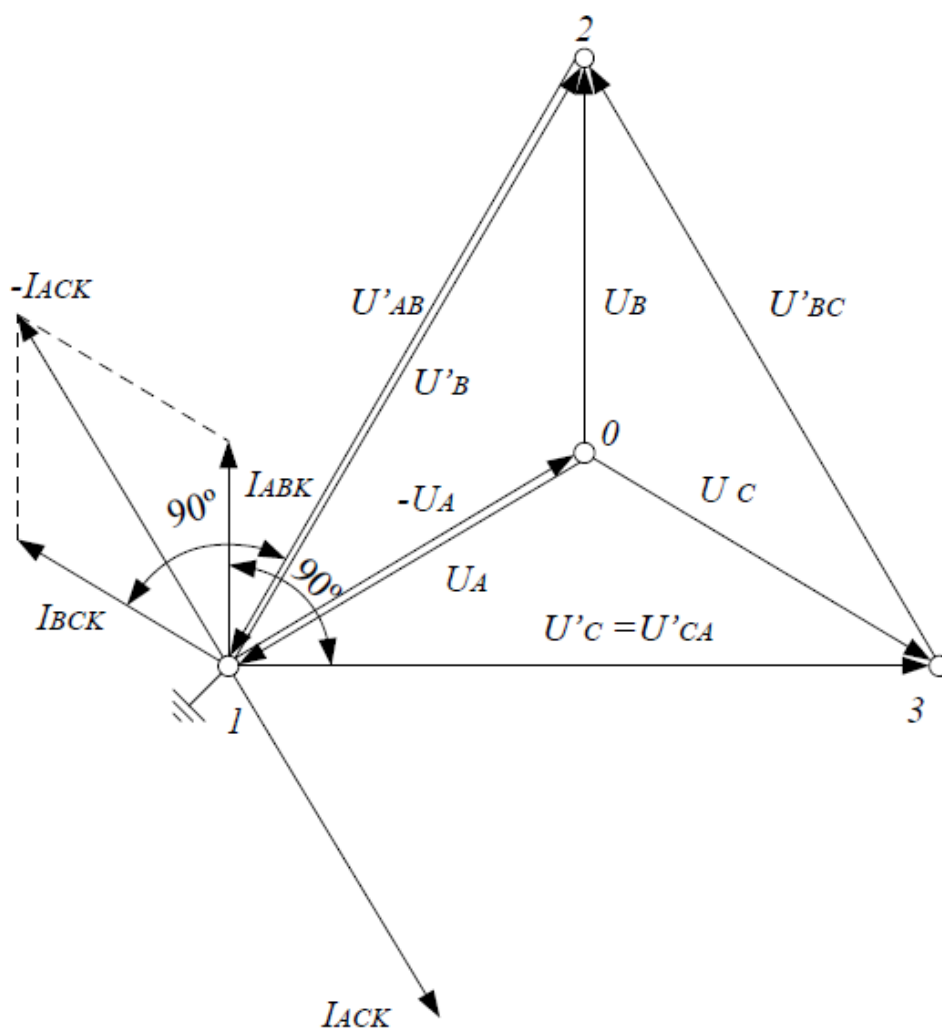


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма струмів та напруг у встановленому режимі однофазного замикання фази A

Струми в що встановилися режимі ОЗЗ визначаються в здебільшого ємнісним опором фаз по відношенню до землі, опір проводів фаз ЛЕП і джерела живлення зневажливо малі. Це ствердження в загальному вигляді підтверджується отриманими результатами моделювання. Наприклад, обрана функція КЗ на схемі в місці знаходження наскрізного опору ізолятора фази A (Таблиця 3.1).

У випадку моделювання пробою в фазі A модулі ємнісних струмів непошкоджених фаз B і C стають вищими, чим в нормальному режимі.

У таблиці 3.1 показані струми відповідних приєднань схеми: габаритної ємності I_{Γ} , абсорбції $I_{абс}$, наскрізний $I_{нск}$ і поверхневий струм $I_{п,струм}$, який проходить через сигнальний пристрій $I_{сиг}$, струм розподіленою ємності

відповідних фаз I_C , фазний струм ЛЕП $I_{дж}$. Моделювання передбачає зміни в індуктивних і ємнісних складових ЛЕП. Змодельована зміна розподіленої ємності фаз лінії в результаті якої змінюються величини струмів та напруг (таблиця 3.1). Отримані результати при моделюванні наскрізного пробію ізолятора відповідають основним положенням однофазного замикання на землю в системі з ізольованою нейтраллю [6,10]. У результаті моделювання замикання в фазі А фазні напруги в непошкоджених фазах C і B збільшилися на $\sqrt{3}$ раз і стали відповідати лінійним $U_B = 10$ кВ, $U'_B = \sqrt{3} \cdot U_B = 17,32$. З таблиці 3.1 значення становили від 17,32 кВ до 17,342 кВ. Напруга в фазі A поменшала з 10 кВ при нормальному режимі до 0,722 кВ при пошкодженному ізоляторі та прийнятій розподіленій ємності фази ЛЕП, рівною 0,4 мкФ, з збільшенням ємності до 1,0 мкФ значення напруги ушкодженої фази становило 1,91 кВ. Отриманий результат показує взаємозв'язок довжини ЛЕП і величини розглянутого напруги (рисунк 3.4).

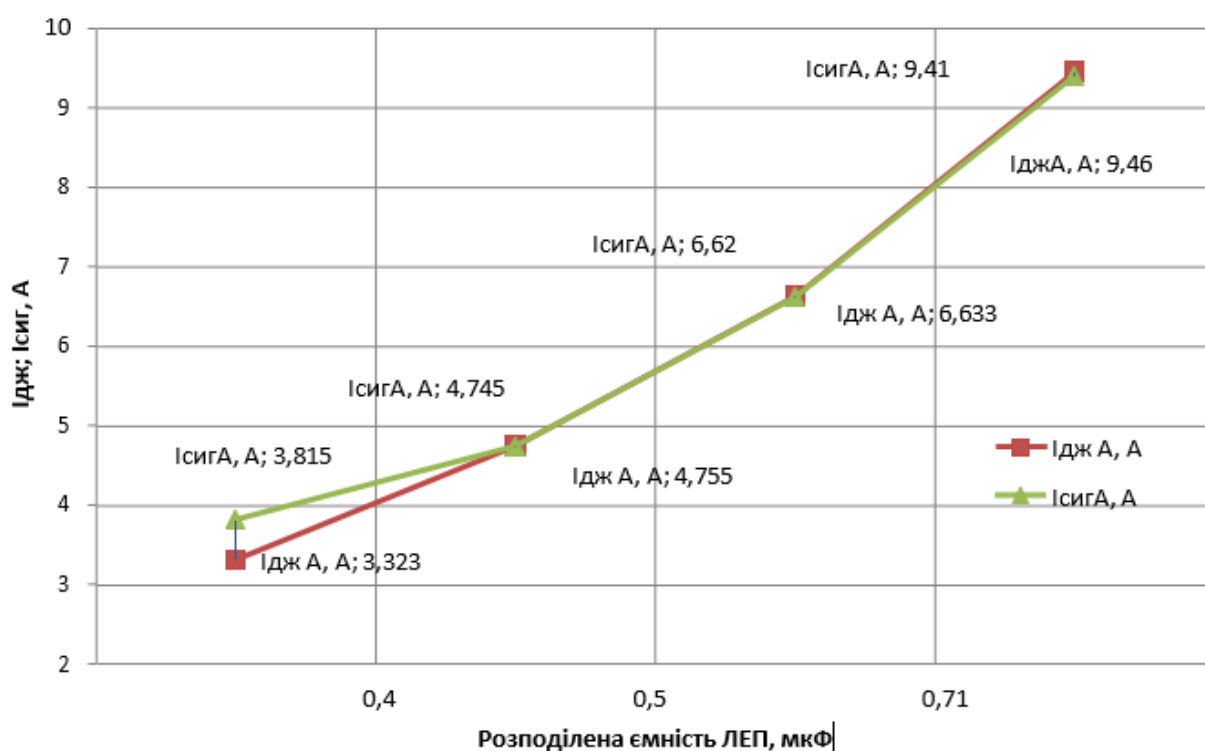


Рисунок 3.4 – Порівняння струмів джерела живлення та сигнального пристрою за результатами моделювання при наскрізному пробію ізолятора з вбудованим сигнальним пристроєм в фазі A

Таблиця 3.1 - Результати моделювання програмою Multisim наскрізного пробую ізолятора повітряної лінії з вбудованим сигнальним пристроєм в системі з ізольованою нейтраллю напругою 10 кВ

Фаза	U_{Φ} , кВ	I_r , А	$I_{абс}$, А	$I_{нск}$, А	I_p , А	$I_{сиг}$, А	$I_{пр}$, А	I_c , А	$I_{дж}$, А	Розподілена ємність ЛЕП, мкФ
С	17,320	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	2,178	2,208	0,4
В	17,328	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	2,178	2,205	0,4
А	0,722	$0,035 \cdot 10^{-6}$	$0,138 \cdot 10^{-6}$	3,823	$0,127 \cdot 10^{-6}$	3,815	3,823	$0,097 \cdot 10^{-3}$	3,823	0,4
С	17,300	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	2,721	2,747	0,5
В	17,300	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	2,721	2,747	0,5
А	0,960	$0,036 \cdot 10^{-6}$	$0,165 \cdot 10^{-6}$	4,755	$0,2 \cdot 10^{-6}$	4,745	4,755	$0,150 \cdot 10^{-3}$	4,755	0,5
С	17,300	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	3,812	3,830	0,7
В	17,300	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	3,812	3,828	0,7
А	1,370	$0,08 \cdot 10^{-6}$	$0,187 \cdot 10^{-6}$	6,633	$0,25 \cdot 10^{-6}$	6,620	6,633	$0,295 \cdot 10^{-3}$	6,634	0,7
С	17,338	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	2,721	2,747	1,0
В	17,342	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,348	2,721	2,747	1,0
А	1,91	$0,08 \cdot 10^{-6}$	$0,330 \cdot 10^{-6}$	9,460	$0,29 \cdot 10^{-6}$	9,410	9,460	$0,600 \cdot 10^{-3}$	9,46	1,0

Струми габаритної ємності I_{Γ} та абсорбції $I_{\text{абс}}$ у непошкоджених фазах склали $0,023 \cdot 10^{-3}$ А. У пошкодженій фазі А струм габаритної ємності $I_{\Gamma A}$ змінювався від $0,035 \cdot 10^{-6}$ А до $0,08 \cdot 10^{-6}$ А, при цьому струм абсорбції $I_{\text{абс} A}$ зменшився з $0,138 \cdot 10^{-6}$ до $0,330 \cdot 10^{-6}$ А при відповідній зміні ємнісного опору лінії від 0,4 мкФ до 1,0 мкф. Імітація ОЗЗ здійснювалася моделюванням наскрізного пробую ізолятора $I_{\text{нск}}$; струм наскрізний провідності в непошкоджених фазах B $I_{\text{нск}B}$ і C $I_{\text{нск}C}$ мав значення $1,73 \cdot 10^{-3}$ А. Струм в пошкодженій фазі A $I_{\text{нск}A}$ змінювався в відповідно з змінами параметрів лінії від 3,823 А для розподіленої ємності фаз 0,4 мкф, до 9,460 А при розподіленій ємності 1,0 мкф.

Отримана величина наскрізного струму пробую ізолятора $I_{\text{нск}}$ може задавати уставку спрацьовування вбудованого в ізолятор сигнального пристрою, так як вона відповідає струму замикання на землю у джерела живлення $I_{\text{дж}}$ і близька до величини струму сигнального пристрою $I_{\text{сиг}}$; різниця між струмами становить менше 0,5% (рисунок 3.5). При виборі уставки спрацьовування отримане відхилення необхідно враховувати.

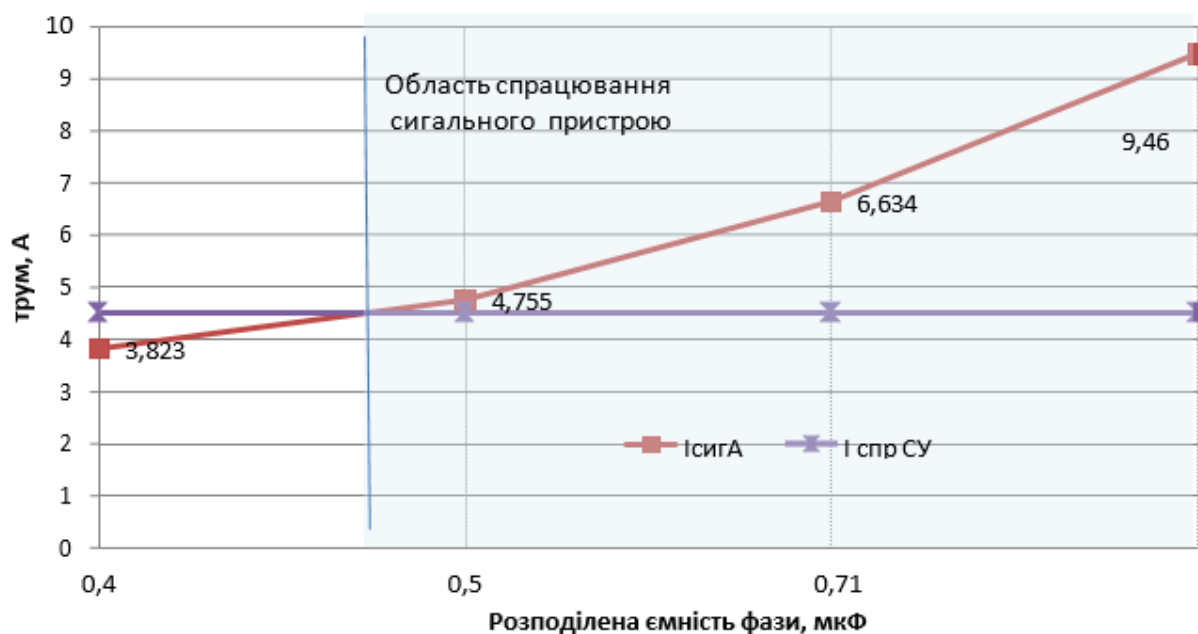


Рисунок 3.5 – Вибір струму спрацьовування вбудованого в ізолятор сигнального пристрою за результатами наскрізного моделювання пробую ізолятора

Вибір уставки струму спрацьовування сигнального пристрою можна здійснити на прикладі отриманих результатів. Побудуємо графік залежності струму замикання на землю $I_{\text{сиг } A}$ від опору розподіленої ємності фази (рисунок 3.5).

У результаті моделювання схеми трифазний лінії в системі з ізольованою нейтраллю (малюнок 3.2) по струму однофазного замикання можна вибрати величину струму уставки для спрацьовування сигнального пристрою, вбудованого в ізолятор з обліком впливу експлуатаційних факторів і параметрів ЛЕП.

Перехідний (нестійкий) режим однофазного замикання на землю виникає у разі дуги. У мережах із ізольованою нейтраллю найбільш часто відбуваються ОЗЗ з перехідним опором величиною 5 ком. Перехідні процеси відбуваються до моменту встановленого режиму. У випадку відновлення опору ізоляції невстановлений режим замикання на землю може перейти в режим нормальної роботи. Якщо опір ізолятора знижується, то нестійке замикання переходить до стійкого режиму однофазного замикання на землю [34].

У розробленій схемі можна зменшити поверхневий опір ізолятора, спостерігати за тим, як проходять змінами з допомогою встановлених вимірювальних приладів (рисунок 3.2).

При моделюванні пробою встановлено поверхневий опір ізолятора 100 Ом при розподіленій ємності фаз від 0,5 до 1,0 мкф. Дані моделювання наведено в таблиці 3.2, по яким побудовані графіки порівняння струмів джерела живлення та струму сигнального пристрою забрудненого ізолятора фази A (рисунки 3.5 та 3.7).

На спрощеній схемі струми розподіляються в відповідно з моделюванням поверхневого пробою ізолятора в фазі A . Напругав пошкодженій фазі зменшується з 10 кВ до 0,189 і 0,488 кВ, а в неушкоджених фазах збільшується до лінійного 17,312 - 17,359 кВ, при цьому нейтраль системи кілька зміщується і створює труднощі в визначенні несправності.

Таблиця 3.2 - Результати моделювання програмою *Multisim* поверхневого пробую ізолятора повітряної лінії звбудованим сигнальним пристроєм в системі з ізолювані нейтраллю напругою 10 кВ

Фаза	U_{Φ} , кВ	I_r , А	$I_{абс}$, А	$I_{нск}$, А	$I_{п}$, А	$I_{сиг}$, А	$I_{пр}$, А	I_c , А	$I_{дж}$, А	розподілена ємність ЛЕП, мкФ
С	17,318	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,346	0,348	0,347	2,72	2,207	0,4
В	17,312	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,347	2,732	2,206	0,4
А	0,189	$0,101 \cdot 10^{-6}$	$0,191 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	3,822	3,814	3,822	3,822	3,822	0,4
С	17,318	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,347	2,178	2,208	0,5
В	17,342	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,347	2,178	2,205	0,5
А	0,236	$0,062 \cdot 10^{-6}$	$0,191 \cdot 10^{-6}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	4,56	4,746	4,759	0,074	4,731	0,5
С	17,343	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,346	0,347	0,348	3,808	3,826	0,7
В	17,347	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,349	3,816	3,831	0,7
А	0,399	$0,114 \cdot 10^{-6}$	$0,204 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^{-6}$	6,632	6,619	6,632	0,072	6,632	0,7
С	17,312	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,346	0,347	0,348	5,440	5,453	1,0
В	17,359	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$0,023 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	0,347	0,348	0,349	5,455	5,455	1,0
А	0,488	$0,206 \cdot 10^{-6}$	$0,381 \cdot 10^{-6}$	$4,37 \cdot 10^{-6}$	9,458	9,439	9,758	0,015	9,458	1,0

Наприклад, при забрудненні ізолятора поверхневий опір змінюється під дією зовнішніх умов експлуатації (ступеня забруднення, інтенсивності зволоження, напруги)[3, 6].

Результати моделювання показали можливість використання даних струму замикання на землю від джерел живлення, до яких відносяться розподільні підстанції. Збіг величини струму джерела живлення $I_{джА}$ і струму, що проходить через сигнальний пристрій $I_{сигА}$, близькі і складають не більше 0,5 % (рисунок 2.11).

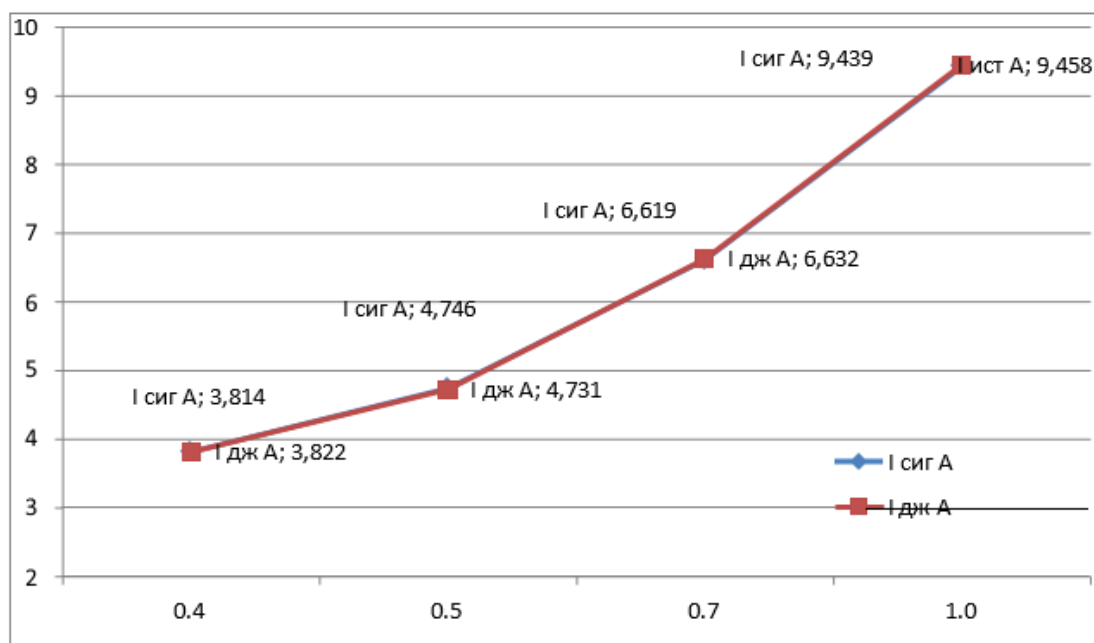


Рисунок 3.6 – Порівняння струмів джерела живлення та сигнального пристрої за результатами моделювання при поверхневому пробіі ізолятора з вбудованим сигнальним пристроєм в фазі А

Для вибору уставки струму спрацьовування сигнального пристрої при забрудненні ізолятора пропонується застосувати таке значення струму пробію ізолятора, яке при експлуатаційних впливах ще не викликає перекриття ізолятора. Наприклад, для штирьових ізоляторів повітряної лінії 10 кВ можна прийняти струм спрацьовування пристрою струмом витoku, що дорівнює 0,5 А. Вибір струму уставки попереджувального стану системи при однофазному замиканні можна моделювати шляхом зміни опору ізолятор.

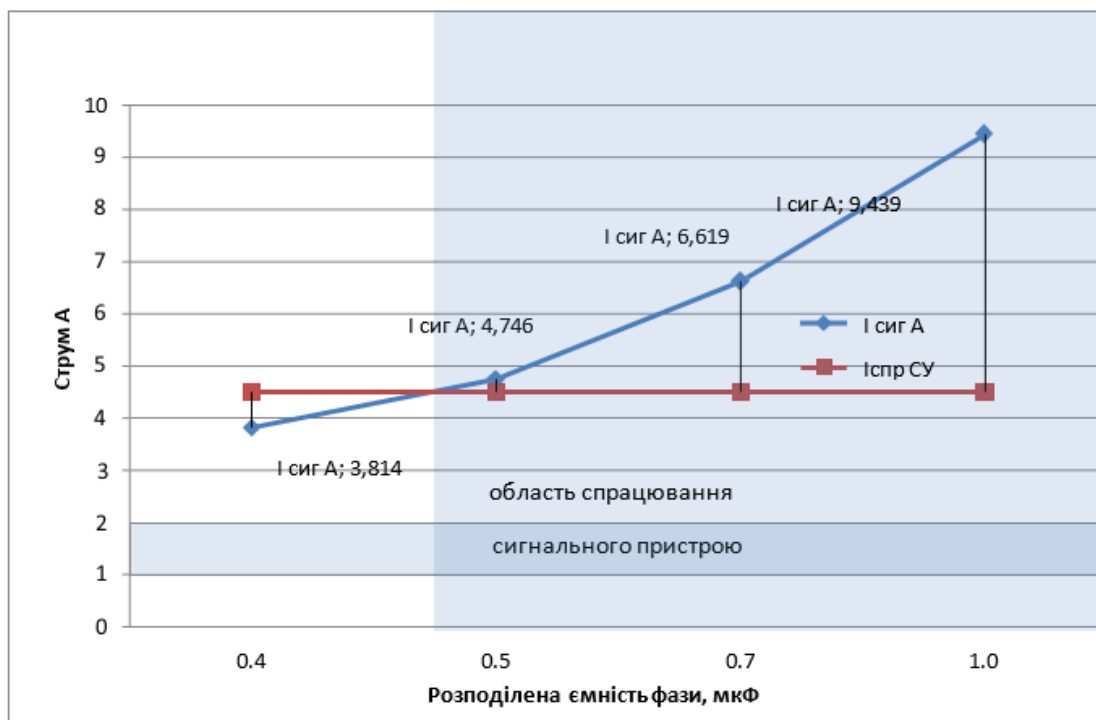


Рисунок 2.12 – Вибір струму спрацювання вбудованого в ізолятор сигнального пристрої по результатам моделювання поверхневого пробую ізолятора

Існує велика кількість методик та програм для моделювання процесів, що відбуваються в ЛЕП, які враховують параметри обладнання та провідників для конкретного ділянки ЛЕП.. Розрахунок струмів однофазного замикання дозволить вибрати уставку спрацювання вбудованого в ізолятор сигнального пристрої.

Висновки по третьому розділу

Розроблена в програмі *Multisim* спрощена схема заміщення трифазної повітряної лінії електропередачі в системі з ізольованою нейтраллю дозволить уточнити струм спрацювання вбудованого в ізолятор сигнального пристрою як при наскрізному, так і при поверхневому пробі з обліком зміни діелектричних властивостей ізолятор.

ВИСНОВКИ

1 Розглянуто катастрофічні та повільні несправності ізоляторів та фактори, що впливають на їх діелектричні властивості.

2 Розроблено безконтактний спосіб контролю ізоляції, який передбачає використання струму пробою ізолятор. Розглянуте технічне рішення дозволяє визначити місце відмови з точністю до ізолятора опори повітряної лінії електропередачі, що дозволяє суттєво скоротити час пошуку несправностей в лінії і забезпечити більше надійне енергопостачання систем енергетичної інфраструктури, включаючи пристрої СЦБ.

3 Наведено еквівалентна схема ізолятора зі вбудованим сигнальним пристроєм, виконаний її аналіз і знайдені основні закономірності електричних процесів при пробі ізолятора. Визначено вплив параметрів елементів схеми - геометричної ємності, абсорбційних опорів, наскрізний провідності і зміни поверхневого опору - на функціонування вбудованого сигнального пристрою.

4 Для вибору струму установки сигнального пристрої змодельована в програмі *Multisim* трифазна схема заміщення з підключенням сигнального пристрої до ізолятору повітряної лінії електропередачі в системі з ізольованою нейтраллю.

5 Запропоновано задавати значення струму спрацьовування сигнального пристрою для виявлення попереджувального стану ізолятора, що сприяє запобіганню однофазного замикання і знаходження опори з несправним ізолятором штатом дистанцій електропостачання за мінімальний час. Це винахід не дозволить ненормальному режиму роботи, до якого відноситься ОЗЗ, перерости в системну аварію – двох або трифазне замикання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-46:2011 Контроль технічного стану опорно-стрижневих ізоляторів за допомогою ультразвукового (акустичного) методу та засобами інфрачервоної техніки. Норми їх дефектації// Наказ від 12.05.2011 № 120
2. Р.М. Галаган, В.С. Єременко. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ПРИ КОНТРОЛІ ПОРЦЕЛЯНОВИХ ІЗОЛЯТОРІВ/ ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 23, 2009
3. Лабзун, М. П. Методи та засоби діагностування опорно-стрижневих ізоляторів: монографія / М. П. Лабзун, О. Є. Рубаненко, В. М. Кутін – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 323 с. Л 12 ISBN 978-966-641-361-4
4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Техніка та електрофізика високої напруги». Частина 1. «Ізоляція установок високої напруги» (для студентів 4-5 курсів денної та заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; В. Ф. Рой, Ю. П. Кравченко, Д. В. Рум'янцев. – Х.: ХНАМГ, 2009. – 51 с.
5. Костюков, І. (2021). Абсорбційні методи контролю технічного стану електричної ізоляції. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (6), 45–50. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.2.09>
6. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.
7. ДІАГНОСТИКА СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ОПОРНИХ ІЗОЛЯТОРІВ ЗА СТРУМАМИ ВИТОКУ /А. І. Котиш, К. Г. Петрова, І. В. Савеленко, С. В. Серебренніков, // Центральноукраїнський національний технічний університет- "Енергетика і автоматика", №2 2023 р.
8. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. –Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

9. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.

10. Техніка високих напруг: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів факультету електроенерготехніки та автоматики / Уклад. : В. О. Бржезицький, В. Б. Абрамов, В. М. Козюра, О. Р. Проценко, В. І. Хомініч, В. О. Шостак, І. М. Маслюченко. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 85 с.