

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій»

КНУ.МР.141.24.779-05

Виконав студент II курсу , групи СЕР-23м /Андрій КАРПЕЦЬ/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Системи електропостачання промислових підприємств,

міст та локальних об'єктів»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Нормоконтролер:

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Олексій МИХАЙЛЕНКО/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КАРПЕЦЬ Андрій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та
аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах
електричних станцій та підстанцій

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження методів
визначення омичного опору ізоляції та аналіз засобів забезпечення
селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та
підстанцій
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції в умовах
електричних станцій та підстанцій; II. Аналіз засобів забезпечення
селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та
підстанцій.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції; II.
Аналіз засобів релейного захисту; III. Вдосконалення методу визначення
омичного опору ізоляції; IV. Аналіз засобів забезпечення селективності дії
релейного захисту; V. Результати дослідження; VI. Оцінювання
ефективності методів визначення омичного опору ізоляції. -

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Загальна характеристика методів	10.09.24
2	Аналіз існуючих методів	12.09.24
3	Аналіз існуючих засобів захисту	17.09.24
4	Методи визначення омичного опору	19.10.24
5	Метод безперервного контролю	24.10.24
6	Дослідження селективності релейного захисту	26.10.24
7	Аналіз результатів дослідження	28.11.24
8	Вибір засобів релейного захисту	01.12.24
9	Оцінювання результатів дослідження	04.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Андрій КАРПЕЦЬ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи магістра на тему: «Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій»

Мета роботи. Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

Об'єкт дослідження. Процес зміни омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій.

Предмет дослідження. Вдосконалення засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

Задачі дослідження.

1. Аналіз існуючих методів визначення омичного опору ізоляції та засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

2. Оцінка ефективності методів визначення омичного опору ізоляції та засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ТА ПІДСТАНЦІЇ, ОПІР ІЗОЛЯЦІЇ, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, СЕЛЕКТИВНІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій.....	11
1.1. Загальна характеристика методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій	11
1.2. Аналіз існуючих методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій.....	15
1.3. Аналіз існуючих засобів забезпечення захисту в умовах електричних станцій та підстанцій	21
1.4. Методи визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій	26
Розділ 2. Аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій	27
2.1. Загальна характеристика засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.....	27
2.2. Обґрунтування вибору засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.....	28
2.3. Дослідження можливості забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій	32
2.4. Аналіз результатів дослідження методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій	36
2.5. Аналіз результатів дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та вибір засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій	40

2.6. Оцінювання результатів дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та вибору засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій	43
2.7. Алгоритм визначення методичної похибки при безперервному контролі параметрів опору ізоляції.....	46
Висновки	47

Вступ

Системи електропостачання з джерелами постійного струму забезпечують живлення споживачів різних галузей промисловості невеликої, середньої та великої потужності.

Також ці системи важливі для забезпечення працездатності систем розподілу та генерації електричної енергії.

На електричних станціях та підстанціях використовують спеціальні схеми, що забезпечують працездатність відповідальних електричних систем та комплексів.

Живлення таких схем забезпечується як від перетворювачів електричної енергії так й за допомогою підтримки акумулюючих елементів з можливим використанням систем відновлювальної генерації електричної енергії.

Системи постійного струму мають розгалужену комунікаційну мережу, що складається з джерел електричної енергії та споживачів за допомогою двопровідних ліній.

Як для систем електропостачання трифазних ліній так й мереж постійного струму у дводротовому виконанні найпоширенішими є ушкодження, що пов'язані з однофазними замиканнями на землю ушкодженого дроту.

До таких ушкоджень можна віднести 95% загальних аварійних ситуацій у таких системах.

Для забезпечення працездатності таких систем у аварійних ситуаціях використовують спеціалізовані діагностичні комплекси, що допомагають виявити початок аварійної ситуації та запобігти її розвитку або навіть прояву

при роботі з електричним навантаженням під час його експлуатації або виводу у резерв.

Такі системи використовують спеціальні схеми щодо виконання конкретних завдань.

Основна задача діагностики запобігти прояву аварійної ситуації щодо ушкодження обладнання.

Одним з підходів щодо припинення або запобігання аварійних ситуацій при виникненні однофазних замикань на землю пошкодженого дроту є циклічна перевірка працездатності приєднань навантаження із визначенням омичного опору.

Такий спосіб контролю ізоляції має забезпечуватись спеціальними схемами вимірювань.

Для визначення необхідно забезпечити певну чутливість елементів що складають спеціалізовані схеми.

Розрізняють роботу таких систем у циклічному, безперервному стані, або використовують періодичну вибірку при певних умовах експлуатації обладнання.

При цьому може бути задіяний протокол попередньої перевірки стану ізоляції мережі живлення при підготовці до пуску обладнання або при зміні навантаження.

Системи діагностики настроюються із застосуванням захисного вимкнення працюючого обладнання або з переведенням його на резервне живлення.

Роботу при цьому забезпечують спеціальні апарати спрацьовування у аварійних ситуаціях, що мають на меті виявлення їх можливого виникнення

здійснюючі відповідні розрахунки щодо визначення параметрів та характеристик.

На практиці більш застосований метод безперервного контролю стану ізоляції мережевих дротів.

Але забезпечення такого функціонування має забезпечуватись відповідними пристроями, що мають на меті забезпечити швидке прийняття рішень щодо алгоритму дій та функціонування обладнання у відповідності до отриманих розрахунків.

Методи безперервного контролю стану ізоляції забезпечуються негайними алгоритмами дії, що налаштовуються виходячи з параметрів навантаження.

Такі системи використовують спеціальні діагностичні засоби та апарати запису та зберігання інформації.

Отримана інформація зберігається та використовується для порівняльного аналізу та слідкування за поточним станом та динамікою зміни процесу зношування електричного опору.

Можна використовувати як апарати фіксації так й спеціалізовані схеми щодо визначення дослідних параметрів мережі.

Оскільки процес функціонування таких систем записується у робочі цикли то такий розподіл зберігається на зазначеному заздалегідь рівні обладнання.

При періодичному контролі стану ізоляції такого розподілу робити не потрібно.

Але для забезпечення працездатності таких підходів необхідно дотримання відповідних процедур.

Такі процедури заздалегідь визначаються та оговорюються виходячи з позиції характерних режимів роботи при суттєвій зміні навантаження з відповідною фіксацією розрахункових значень.

У будь-якому випадку обидва методи потребують перевірки на точність вимірювань та відповідність функціонування їх окремих елементів апарату визначення.

Такі перевірки можна робити при використанні досліджень на діючому обладнанні, або з використанням методів моделювання на етапі попереднього визначення.

Розділ 1. Дослідження методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій

1.1. Загальна характеристика методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій

Системи постійного струму на електричних станціях та підстанціях є дуже важливими для забезпечення їх працездатності та правильної роботи обладнання.

Вони забезпечують живленням роботу таких важливих систем як релейний захист, автоматичні системи контролю та управління апаратами аварійного та основного обладнання.

Також системи постійного живлення більш прості при аварійному відключенні та переході на резервне живлення, яке доволі часто вони самі й забезпечують.

Тому при такому підході важливим є забезпечення правильного визначення рівнів навантаження системи.

Запишемо вираз для визначення напруги при розряді що утворюється у середовищі:

$$U_{1(0)} = U \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}; U_{2(0)} = U \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (1.1)$$

де C_1, C_2, R_1, R_2 –ємність та опір у середовищі.

Тоді у каналі високої провідності можна визначити встановлену напругу:

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_e}; U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_e}, \quad (1.2)$$

де $R_e = R_1 R_{\text{зм}} / (R_1 + R_{\text{зм}})$

Значення складової струму:

$$i_{\text{ст}} = U / (R_1 + R_2) \quad (1.3)$$

Провідний струм:

$$i_{\text{пр}} = U \cdot G \cdot \exp(-t/\tau), \quad (1.4)$$

де G - провідність,

$$\tau = \frac{R_2 R_e}{R_2 + R_e} \cdot (C_1 + C_2) \quad \text{- стала.}$$

Тоді струм витоку:

$$i_{\text{в}} = \frac{U}{R_2 + R_e} + \frac{U_{1(0)} \cdot (C_2 R_e^2 - C_1 R_2 R_e) + U_{2(0)} \cdot (C_1 R_2^2 - C_2 R_2 R_e)}{R_2 R_e (R_2 + R_e) (C_1 + C_2)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.5)$$

При цьому:

$$i_c = \frac{U}{R_2 + R_e} + \frac{U_{1(0)} \cdot (R_e^2 - R_2 R_e) + U_{2(0)} \cdot (R_2^2 - R_2 R_e)}{2R_2 R_e (R_2 + R_e)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.6)$$

Для початкових умов:

$$i_{R(0)} = U \frac{R_2 + R_e}{4R_2 R_e} \quad , \quad (1.7)$$

А струм провідний:

$$i_{абс} = G \int_{-\infty}^T \exp\left(\frac{t_{п} - T}{\tau}\right) \frac{dU}{dt} \quad , \quad (1.8)$$

де $t_{п}$ - час;

T - період.

При синусоїдальному живленні:

$$i_{абс} = U_m G \omega \int_{-\infty}^T \cos(\omega t) \cdot \exp\left(\frac{t - T}{\tau}\right) dt \quad . \quad (1.9)$$

Маємо:

$$I_{\text{а.а.б.с}} = UG \frac{\omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (1.10)$$

За складовими:

$$I_{\text{л.а.б.с}} = UG \frac{\omega \tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (1.11)$$

У загальній формі:

$$I_{\text{а}} = I_{\text{п}} + I_{\text{а.а.б.с}} = U \left(G \frac{\omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1} + \frac{1}{R_1 + R_2} \right); \quad (1.12)$$

Ємнісна складова:

$$I_{\text{р}} = I_{\text{емн}} + I_{\text{л.а.б.с}} = U\omega \left(C_{\text{геом}} + G \frac{\tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} \right), \quad (1.13)$$

де - $I_{\text{емн}}$ ємнісний струм;

$$I_{\text{р}} = I_{\text{емн}} = U\omega C_{\text{геом}} ;$$

$C_{\text{геом}}$ - ємність ізоляції.

1.2. Аналіз існуючих методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій

Методи контролю стану ізоляції базуються на визначенні її омичного опору.

Розглянемо розрахункові рівняння щодо розрахунку параметрів у таких системах.

$$R_1 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_2} ; \quad (1.14)$$

де $R = R_{\text{д}} + R_{\text{т}}$;

U_0 – напруга;

I_1, I_2 – струм для SA1 та SA2;

$R_{\text{п}}$ – опір.

Представимо розрахункову схему.

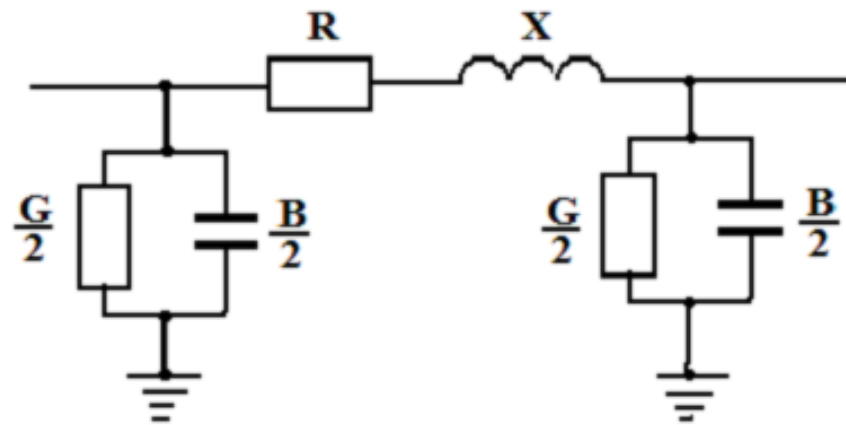


Рисунок 1.1 – Розрахункова схема

Тоді складова струму:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{R_2 + R(1 + 2R_2/R_1)} \left(1 + \frac{R_2}{R(1 + 2R_2/R_1)} e^{-t/\tau} \right); \quad (1.15)$$

де $\tau = \frac{2\epsilon R R_1 R_2}{R_1 R_2 + R(R_1 + R_2)}$ – стала;

ϵ – відносна ємність.

Представимо схему заміщення розрахункової схеми.

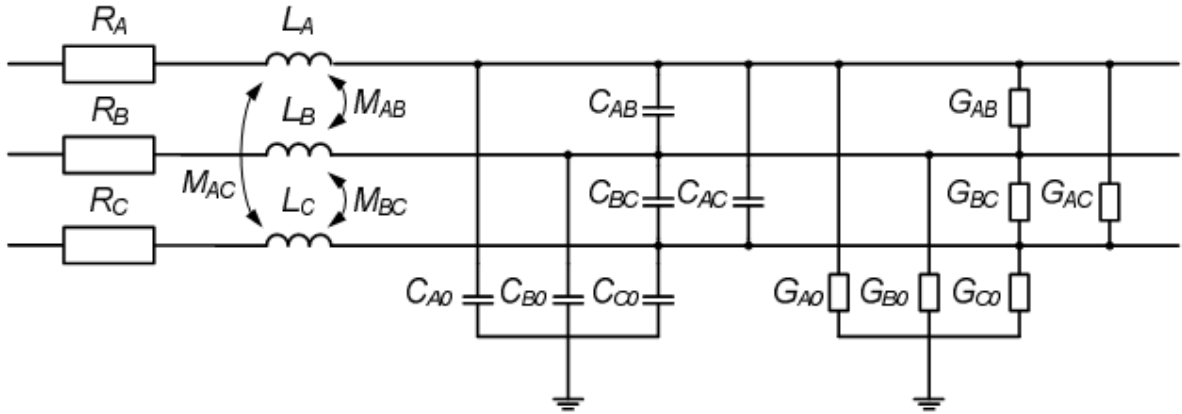


Рисунок 1.2 – Схема заміщення розрахункової схеми

Відповідно до схеми заміщення розрахункової схеми визначимо похибку:

$$\varepsilon_{R_1} = \left| \varepsilon_{U_0} (1 + \alpha_1(1 + \alpha)) \right| + \left| -\varepsilon_{I_1} \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right| + \left| -\varepsilon_{I_2} \frac{1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 \alpha_2^2 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_1^2} \right| + \left| -\varepsilon_{R_g} \frac{\alpha_1 (1 + 2\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_2))}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right|, \quad (1.16)$$

де $\alpha_1 = R/R_1$;

$\alpha_2 = R_1/R_2$;

ε_{U_0} – гранична похибка;

$\varepsilon_{I_1} = \varepsilon_{I_2} = \varepsilon_I$ – відносна похибка за струмом;

ε_{R_g} – відносна похибка за опором R_d .

Визначимо похибку вимірювань:

$$\varepsilon_{R_1} = \left| \varepsilon_{U_3} \frac{1 + \alpha_1(1 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1\alpha_2} \right| + \left| -\varepsilon_{I_2}(1 + \alpha_2\alpha_2)(1 + \alpha_1(1 + \alpha_2)) \right| \\ + \left| \varepsilon_R \frac{1 + \alpha_2 + \alpha_1\alpha_2(1 + \alpha_2)}{(1 + \alpha_1\alpha_2)^2} \right| \quad (1.17)$$

$$\varepsilon_{U_3} = \pm 5\%, \quad \varepsilon_{I_2} = \pm 2.5\%, \quad \varepsilon_R = \pm 5\%, \quad \alpha_2 = 0,1 \div 10.$$

Розрахункове значення:

$$I_{r.o.} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{\quad}} \quad (1.18)$$

де U_{\sim} – напруга джерела;

R_{Σ} – опір ізоляції;

R_{cx} – активний опір;

$\omega = 2\pi f$ – частота;

C_{ϕ} – ємність;

$C = C_1 + C_2$;

Визначимо рівняння струму:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{R_2(1 + 2C/C_0)^2} e^{-\tau t} \quad ;(1.19)$$

$$i_2(t) = \frac{U_0}{R_1(1 + 2C/C_0)^2} e^{-\tau t}, \quad (1.20)$$

де $\tau = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_0 + 2C)}$ - стала.

Представимо схему заміщення розрахункової схеми пристрою контролю ізоляції.

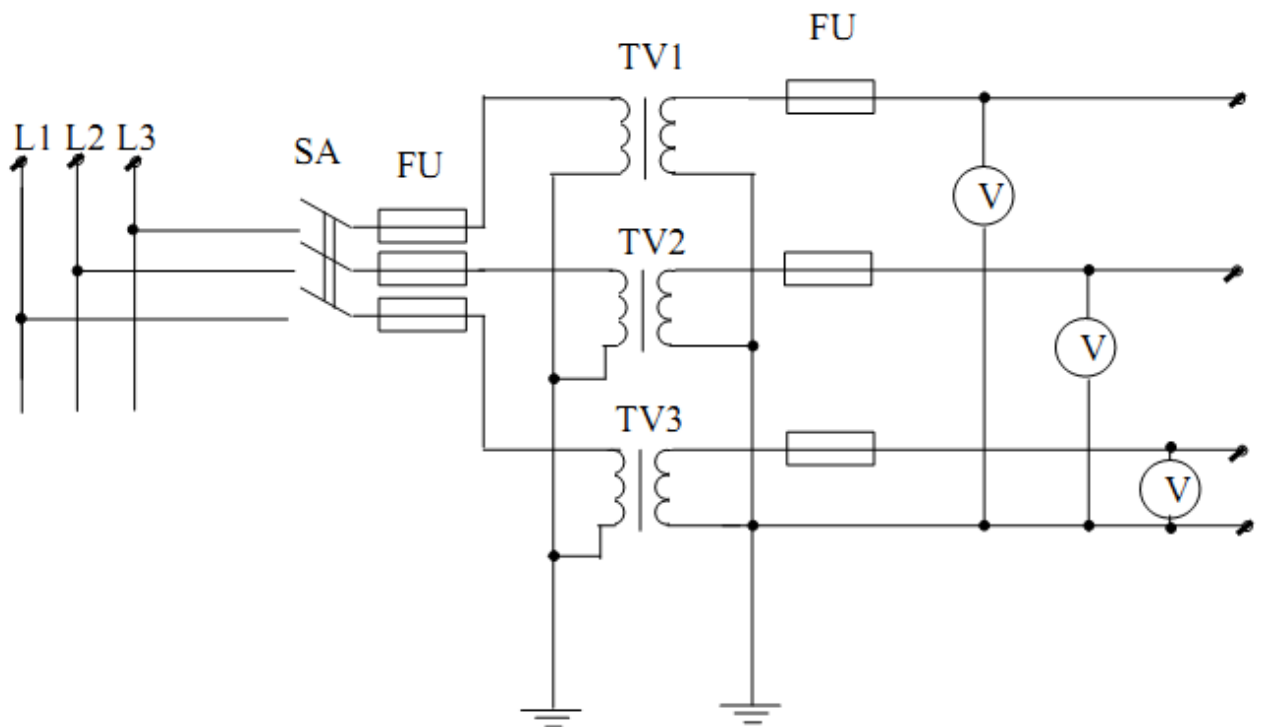


Рисунок 1.3 – Схема заміщення розрахункової схеми пристрою контролю ізоляції

Тоді відшукуванні значення опорів:

$$R_2 = \frac{U_0}{i_1(0)(1 + 2C/C_0)^2} ; (1.21)$$

$$R_1 = \frac{U_0}{i_2(0)(1 + 2C/C_0)^2} . (1.22)$$

Отже, можна вважати що розрахунки є завершеними.

1.3. Аналіз існуючих засобів забезпечення захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

Розподіл значень визначених параметрів мережі живлення можна зробити виходячи з їх приналежності.

Таблиця 1.1 – Розподіл значень визначених параметрів мережі живлення в аварійному режимі роботи

Рід струму	Нормована величина	Тривалість дії, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Понад 1,0
Постійний	$U_{д.т.}, В$ $I_{н.}, мА$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
Випрямлений опівперіодний	$U_{д.т.}, В$ $I_{н.}, мА$	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	-
Випрямлений повіперіодний	$U_{д.т.}, В$ $I_{н.}, мА$	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	15

Розрахуємо кратність струмів для налаштування системи захисту обладнання мережі.

$$k = I_{р.о.} / I_{в.в.} = \text{const} \quad (1.23)$$

$I_{р.о.}$ - струм пристрою захисту;

$I_{в.в.}$ - струм витоку.

Для випрямляча:

$$k = \frac{I_R}{I_{p.o.}} = \frac{R_1(R_g + R_2)}{R_g(R_2 - R_1) + R_1R_2} \quad (1.24)$$

Тоді кратність струмів:

$$k = \frac{I_R}{I_{p.o.}} = \frac{R_g + R_i}{R_i} = \frac{R_{i+1}}{R_i} \quad (1.25)$$

де $R_i = R_i / R_g$.

Отже:

$$I_{p.o.} = \frac{U_c}{R_{\Sigma}} = \frac{U_c [R_h + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)]}{R_1 R_2 R_h / (R_1 + R_2)} \quad (1.26)$$

де R_h - опір шунту.

Тоді:

$$k_{\sim} = \frac{I_R}{I_{p.o.}} = E_0 R_{k_{\sim}} \frac{R_{i+1}}{U_c} \quad (1.27)$$

$$R_{L*} = \frac{R_B}{R_{доп}}$$

де ;

$$R_{із*} = \frac{R_{із}}{R_{доп}}$$

- відносна величина;

$$R_{доп} = 6 \text{ кОм.}$$

Тоді струм мережі:

$$I_{в.о.} = U_{\sim} \cdot \sqrt{1/R_{із*}^2 + (2\omega C - k_{LC}/\omega L_{др})^2} \quad (1.28)$$

де U_{\sim} - напруга змінного струму,

$R_{із}$ - опір ізоляції;

$L_{др}$ - індуктивність;

k_{LC} - коефіцієнт що враховує співвідношення LC.

Представимо схему системи захисту.

$$J_{\text{н}} = i_{\text{н}}(0) \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R'_{\text{н}}}, \quad (1.30)$$

де $i_{\text{н}}(0)$ - значення струму при $t=0$;

$R'_{\text{н}}, R_{\text{н}}$ - опір ізоляції до та після дотику.

1.4. Методи визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій

У двопровідних лініях електропередач може бути застосований комбінований метод визначення омичного опору ізоляції.

При цьому використовуються як спеціальні схеми так й апарати визначення параметрів мережі.

Застосування комбінованого методу дозволяє розширити сферу застосування спеціальних схем вимірювання та забезпечує необхідну точність при визначенні омичного опору та унеможлиблює виникнення аварійного стану у роботі обладнання.

Розділ 2. Аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

2.1. Загальна характеристика засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

При застосуванні комбінованого методу щодо визначення омичного опору ізоляції необхідно розраховувати як активну так й реактивну складові струмів витоку.

Для цього застосовуються дві різні схеми вимірювань, що забезпечують відповідну обробку досліджуваної інформації а також спеціальні алгоритми розрахунків.

Математичний апарат щодо забезпечення подібних розрахунків було представлено у попередньому розділі.

2.2. Обґрунтування вибору засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

Безпосередній контроль омичного стану ізоляції має бути забезпечено відповідними виразами щодо розрахунку.

При визначенні важливим є можливість компенсації ємнісної складової струму, що негативно впливатиме на точність визначення параметрів мережі живлення.

Розрахуємо комплексне значення струму:

$$j = \frac{U}{R_{\text{из}}} \left(\frac{4\omega^2 R_{\text{из}}^2 C_{\psi}^2}{1 + 4\omega^2 R_{\text{из}}^2 (C_{\phi} + C)^2} \right) + +j \left(\frac{2\omega C_{\phi} (1 + 2\omega^2 C (C_{\psi} + C) R_{\text{из}}^2)}{1 + 4\omega^2 R_{\text{из}}^2 (C_{\phi} + C)^2} - \frac{1}{\omega L_{\kappa}} \right) \quad (2.1)$$

Представимо схему пристрою безпосереднього захисту та контролю омичного стану ізоляції, а також розрахункову схему заміщення.

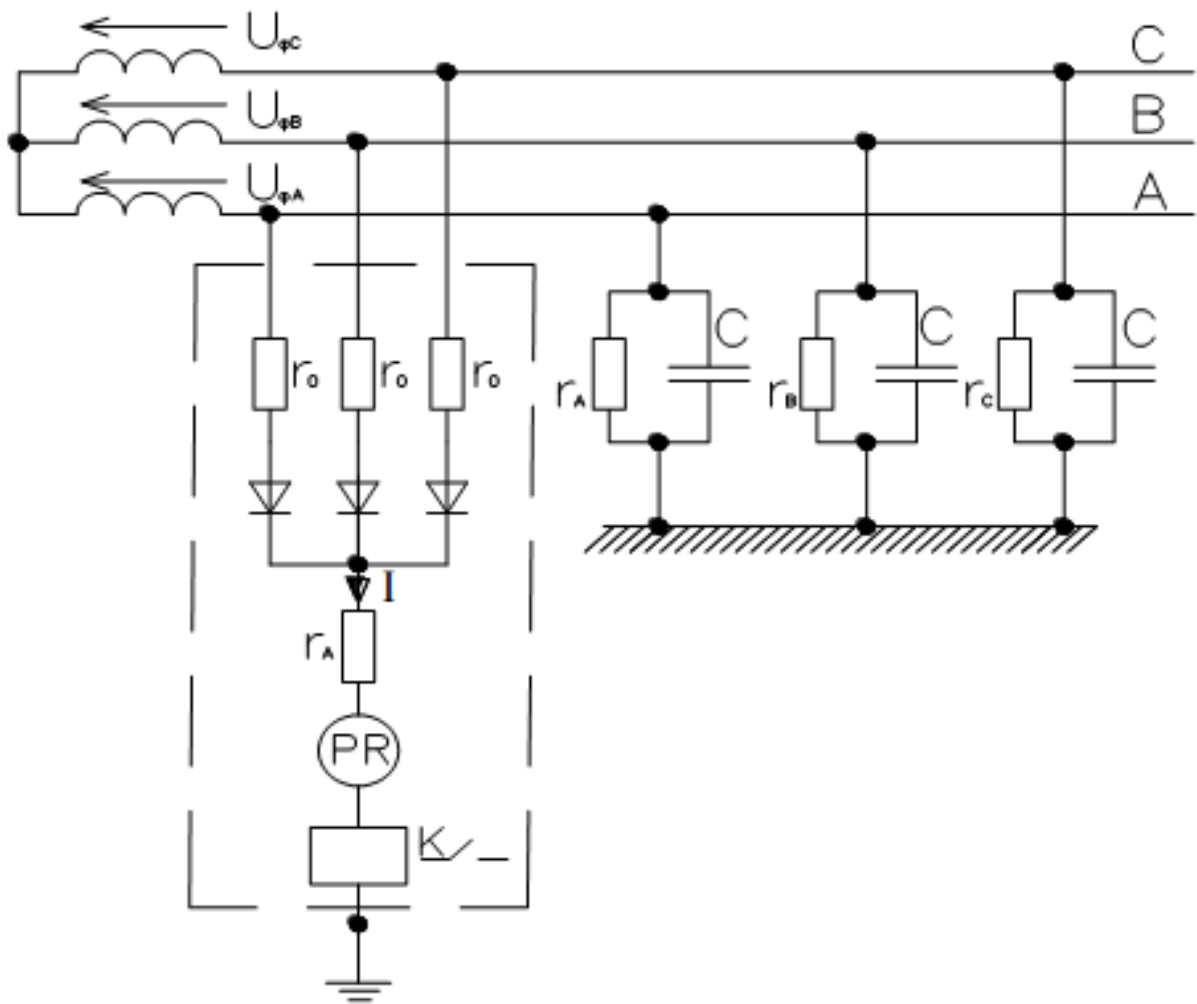


Рисунок 2.1 – Схема пристрою безпосереднього захисту та контролю омичного стану ізоляції

де R_1, R_2 – опір ізоляції;

$R_{i\bar{z}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ - загальний опір ізоляції;

C, C_ϕ – ємність фільтра;

L_k - індуктивність;

\dot{U} - напруги джерела.

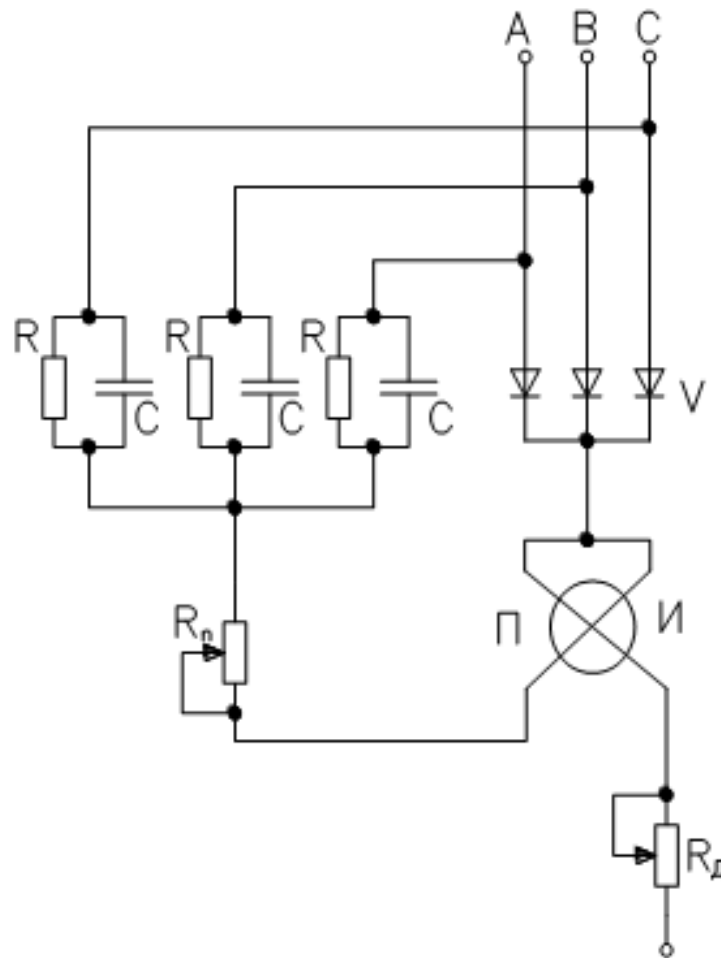


Рисунок 2.2 – Схема заміщення пристрою безпосереднього захисту та контролю омичного стану ізоляції

Активна складова струму:

$$I_a = \frac{U}{R_{i3}} \left(\frac{4\omega^2 R_{i3}^2 C_{\psi}^2}{1 + 4\omega^2 R_{i3}^2 (C_{\phi} + C)^2} \right) \frac{1}{n_{TA}}, \quad (2.2)$$

де n_{TA} - коефіцієнт трансформації

Визначимо опір:

$$R_{\text{вим}} = \frac{U}{I_a} = R_{\text{вн}} \left(\frac{1 + 4\omega^2 R_{\text{вн}}^2 (C_{\text{вн}} + C)^2}{4\omega^2 R_{\text{вн}}^2 C_{\text{ф}}^2} \right) n_{\text{ТЛ}} \quad (2.3)$$

Так як $4\omega^2 R_{\text{вн}}^2 (C_{\text{вн}} + C)^2 \gg 1$

Отримаємо:

$$R_{\text{вим}} = R_{\text{вн}} \frac{(C_{\text{вн}} + C)^2 n_{\text{ТЛ}}}{C_{\text{ф}}^2} = R_{\text{вн}} (1 + 2n + n^2) n_{\text{ТЛ}} \quad (2.4)$$

де $n = C/C_{\text{вн}}$ похибка.

2.3. Дослідження можливості забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

Методи безпосереднього контролю омичного стану ізоляції ґрунтуються на використанні спеціалізованих схем щодо визначення параметрів.

Наведемо схему безпосереднього контролю омичного стану ізоляції.

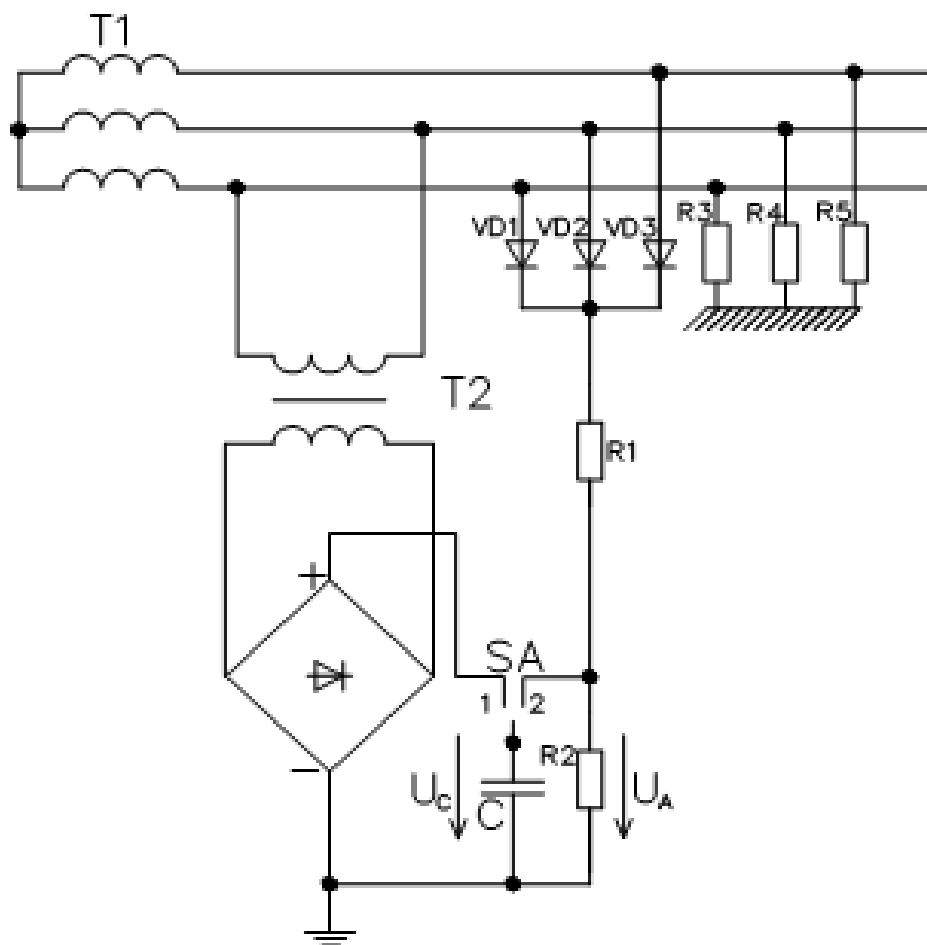


Рисунок 2.3 – Схема безпосереднього контролю омичного стану ізоляції

Представимо схему заміщення системи контролю опору ізоляції.

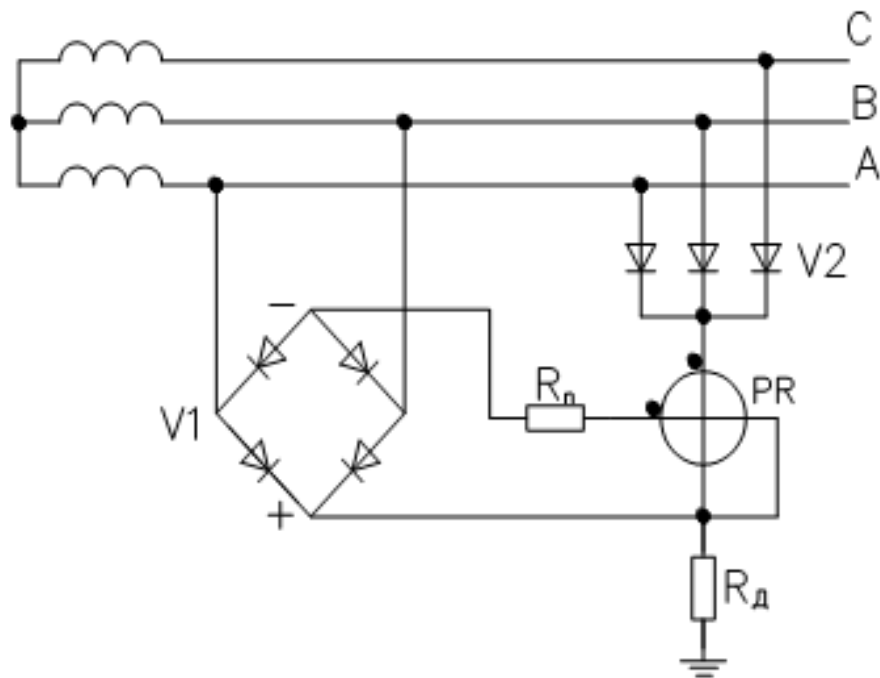


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема безпосереднього контролю омичного стану ізоляції

Час спрацьовування:

$$i_{11} = Y_{11} \left[\dot{U} - i_c \left(-\frac{j}{2\omega C_{\phi}} \right) \right] = \dot{U} Y_{11} \left(1 + \frac{j}{2\omega C_{\phi} Z} \right) \quad (2.5)$$

де \dot{U} - напруга джерела;

i_c - струм фільтру;

$i_{ек}$ - струм ізоляції;

Y_{11} - провідність ізоляції

$$Y_{11} = 1/R_{іс.11} + 2j\omega C_{11}$$

$$R_{іс.11} = \frac{R_{1.п} \cdot R_{2.п}}{R_{1.п} + R_{2.п}} - \text{опір ізоляції};$$

Z- еквівалентний опору ізоляції .

Тоді рівняння щодо визначення комплексного значення опору ізоляції мережі живлення:

$$Z = \frac{R_{із.п} \cdot R_{із.ек}}{R_{із.п} + R_{із.ек} + j2\omega(C_{п} + C_{ек}) \cdot 2R_{із.п}R_{із.ек}} - \frac{j}{2\omega C_{ф}} \quad (2.6)$$

де $R_{із.ек} = \frac{R_{1.ек} \cdot R_{2.ек}}{R_{1.ек} + R_{2.ек}}$ - опір ізоляції;
 $C_{ек}$ - ємність ізоляції.

Тоді, з врахуванням комплексного значення опору ізоляції мережі живлення, час спрацьовування складатиме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{п} = & \left(\frac{1}{R_{із.п}} + 2j\omega C_{п} \right) \times \\ & \times \left[1 - \frac{2\omega(C_{п} + C_{ек})R_{із.п} \cdot R_{із.ек}}{2\omega(C_{п} + C_{ек} + C_{ф})R_{із.п} \cdot R_{із.ек} - j(R_{із.п} + R_{із.ек})} \right. \\ & \left. + +j \frac{R_{із.п} + R_{із.ек}}{2\omega(C_{п} + C_{ек} + C_{ф})R_{із.п} \cdot R_{із.ек} - j(R_{із.п} + R_{із.ек})} \right] \cdot \dot{U} = \frac{\dot{U}}{R_{із.п}} \\ & \left[\frac{4\omega^2 C_{ф} (C_{п} + C_{ек} + C_{ф}) R_{із.п}^2 R_{із.ек}^2}{4\omega^2 (C_{п} + C_{ек} + C_{ф})^2 R_{із.п}^2 R_{із.ек}^2 + (R_{із.п} + R_{із.ек})^2} + \frac{\pm 4\omega^2 C_{п} C_{ф} R_{із.п}^2 R_{із.ек} (R_{із.п} + R_{із.ек})}{\dots} + \right. \\ & \left. \frac{j2\omega C_{ф} R_{із.п} R_{із.ек} (R_{із.п} + R_{із.ек}) + 8\omega^3 C_{п} C_{ф} (C_{п} + C_{ек} + C_{ф}) R_{із.п}^3 R_{із.ек}^2}{4\omega^2 (C_{п} + C_{ек} + C_{ф})^2 R_{із.п}^2 R_{із.ек}^2 + (R_{із.п} + R_{із.ек})^2} \dots \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Спростивши отримаємо наступне рівняння:

$$\begin{aligned}
 j_{a.к.} &= \frac{U}{R_{ТЛ} R_{із.П}} \times \frac{4\omega^2 C_{\phi} R_{із.П} R_{із.ек}}{4\omega^2 (C_{П} + C_{ек} + C_{\phi})^2 R_{із.П}^2 R_{із.ек}^2 + (R_{із.П} + R_{із.ек})^2} \\
 &\frac{(R_{із.П} R_{із.ек} (C_{П} + C_{ек} + C_{\phi}) - R_{із.П} C_{П} (R_{із.П} + R_{із.ек}))}{4\omega^2 (C_{П} + C_{ек} + C_{\phi})^2 R_{із.П}^2 R_{із.ек}^2 + (R_{із.П} + R_{із.ек})^2} \\
 &= \frac{U}{R_{із.П} R_{ТЛ}} \mathcal{N}.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

2.4. Аналіз результатів дослідження методів визначення омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій

Розглянемо питання щодо визначення похибки вимірювань при застосуванні безперервного методу контролю та визначенні стану омичного опору ізоляції.

Похибка вимірювань буде складати:

$$\varepsilon_{R_{\text{із}}} = \frac{1}{R_{\text{із}}} \left(\left| \frac{\partial R_{\text{із}}}{\partial U} dU \right| + \left| \frac{\partial R_{\text{із}}}{\partial I_{\text{а}}} dI_{\text{а}} \right| \right) = |\varepsilon_U| + |\varepsilon_{I_{\text{а}}}| ,$$

де $\varepsilon_U = \frac{dU}{U}$ - гранична похибка;

$\varepsilon_{I_{\text{а}}} = \frac{dI_{\text{а}}}{I_{\text{а}}}$ - відносна похибка.

Отже:

$$\varepsilon_{\text{м}} = \frac{I_{\text{зд}} - I_{\text{зв}}}{I_{\text{зд}}} = 1 - \frac{4\omega^2 C_{\text{ф}}^2 R_{\text{із}}^2}{1 + 4\omega^2 R_{\text{із}}^2 (C_{\text{ф}} + \Delta C)^2} , \quad (2.9)$$

де $I_{\text{зд}}, I_{\text{зв}}$ - дійсне значення струму;

ΔC - ємність.

Представимо у зручному для програмного обчислення вигляді математичне рівняння:

$$\varepsilon'_M = 1 - \frac{4m^2 C_\phi (C_{II} + C_{ЕК} + C_\phi) R_{из.П}^2 R_{из.ЕК}^2}{4\omega^2 (C_{II} + C_{ЕК} + C_\phi)^2 R_{из.П}^2 R_{из.ЕК}^2} - \frac{4\omega^2 C_\phi C_{II} R_{из.П}^2 R_{из.ЕК} (R_{из.П} + R_{из.ЕК})}{4\omega^2 (C_{II} + C_{ЕК} + C_\phi)^2 R_{из.П}^2 R_{из.ЕК}^2 + (R_{из.П} + R_{из.ЕК})^2} = 1 - \frac{4\omega^2 C_\phi (C_\phi + C) - 4\omega^2 C_\phi C_{II} (K + 1)}{4\omega^2 (C_\phi + C)^2 + \frac{K^2 + 2K + 1}{R_{из.П}^2}}, \quad (2.10)$$

де $K = R_{из.П} / R_{из.ЕК}$;

$$C = C_{II} + C_{ЕК} .$$

Представимо розрахунки отриманих похибок у тривимірному просторі моделі в залежності від зміни параметрів моделювання для застосування безперервного методу контролю та визначенні стану омичного опору ізоляції мережі живлення.

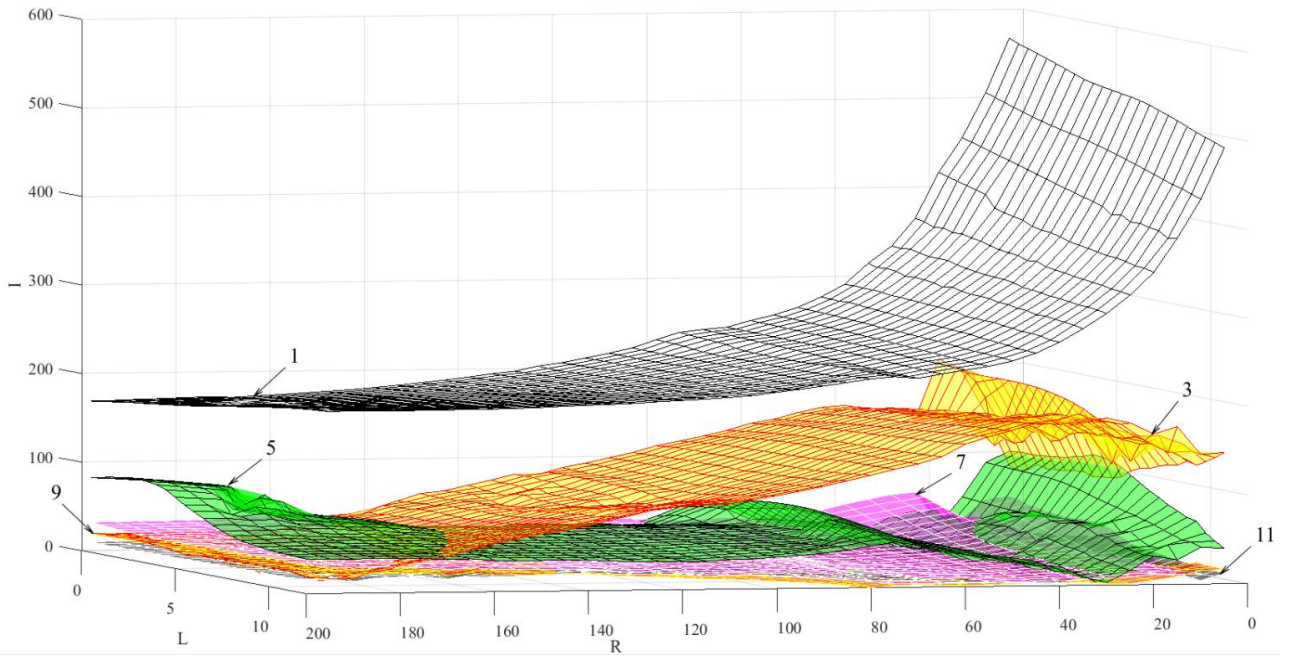


Рисунок 2.5 – Представлені розрахунки отриманих похибок у тривимірному просторі моделі в залежності від зміни параметрів моделювання для застосування безперервного методу контролю та визначенні стану омичного опору ізоляції мережі живлення ($C_{\phi}=40$ мкФ)

Також:

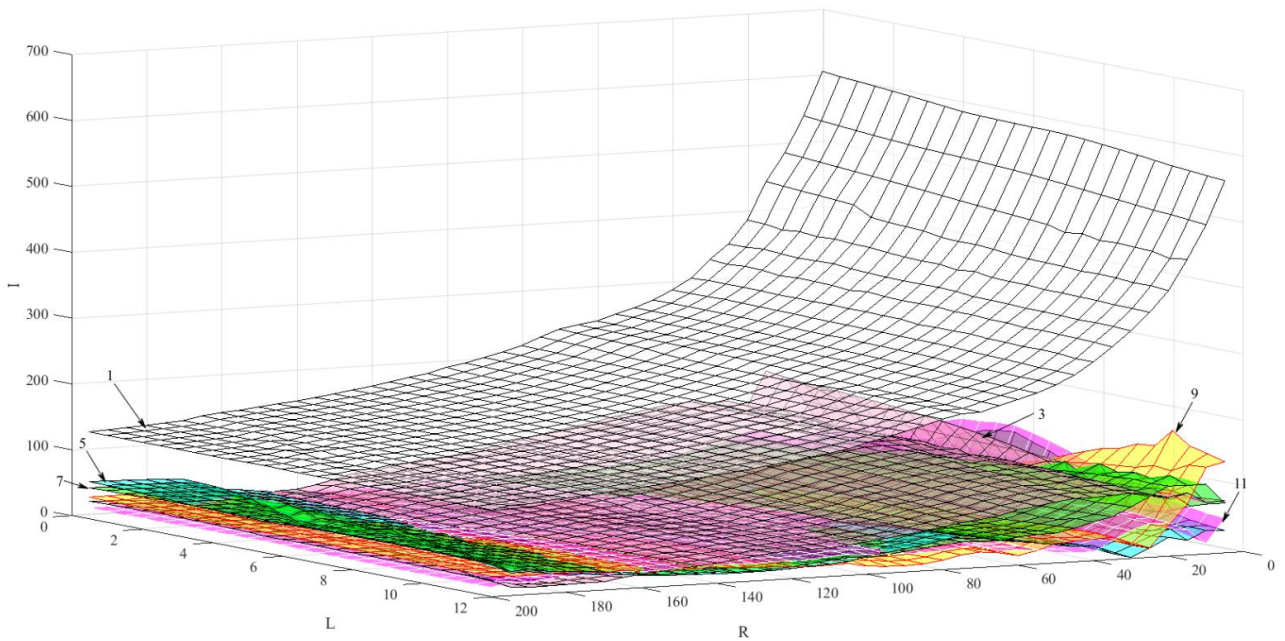


Рисунок 2.6 – Представлені розрахунки отриманих похибок у тривимірному просторі моделі в залежності від зміни параметрів моделювання для застосування безперервного методу контролю та визначенні стану омичного опору ізоляції мережі живлення ($C_{ек}=2$ мкФ)

Тоді остаточно:

$$\varepsilon_{R_{\text{в}}} = \sqrt{\varepsilon_U^2 + (\varepsilon_{J_a} + \varepsilon_M)^2} 100\% , \quad (2.11)$$

2.5. Аналіз результатів дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та вибір засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

Розглянемо перехідні процеси, що виникають при накладанні сигналу постійного струму від джерела що забезпечує контроль мережі при надходженні сигналів різної полярності.

Наведемо рівняння для контуру напруги:

$$U_{\text{в}} = \frac{U_0}{2(R_1 + R_2)} (R_2 - R_1) \quad , (2.12)$$

А також для контуру струму:

$$I = \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2R_1R_2 + R_d(R_1 + R_2)} \quad , (2.13)$$

Тоді отримаємо рівняння для визначення опору:

$$R_{\text{із.в}} = \frac{U_{\text{в}}}{I} = \frac{2R_1R_2 + R_d(R_1 + R_2)}{2(R_1 + R_2)} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_d}{2} = R_{\text{із}} + \frac{R_d}{2}$$

де R_d - опір ділянки.

Отже:

$$R_{\text{вз}} = \frac{U_{\text{в}}}{I} - \frac{R_{\text{л}}}{2} \quad (2.14)$$

Перехідний процес за струмом:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{R_2(1 + 2C/C_0)^2} e^{-t/\tau_i} \quad (2.15)$$

де $\tau = \frac{R_2 R_1 (C_0 + 2C)}{R_1 + R_2}$ - стала.

Тоді характеристичний коефіцієнт рівняння дорівнюватиме значенню опору:

$$R_2 = \frac{U_0}{i_1(0)(1 + 2C_1/C)^2} \quad (2.16)$$

Складемо схему системи захисту для джерела що забезпечує контроль мережі при надходженні сигналів різної полярності.

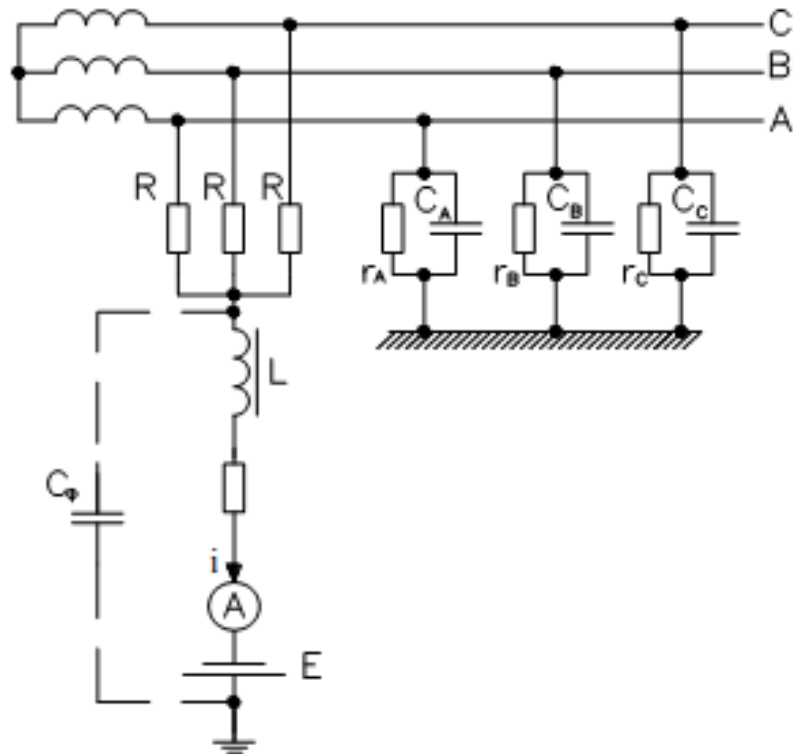


Рисунок 2.7 – Схема системи захисту для джерела що забезпечує контроль мережі при надходженні сигналів різної полярності

Тоді опір, що відшукується:

$$R_2 = \frac{U_{01}}{i_1(0)}; R_1 = \frac{U_{01}}{i_2(0)}, (2.17)$$

2.6. Оцінювання результатів дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та вибору засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій

При періодичному контролі зазначена похибка вимірювань може бути визначена виходячи з диференційної складової визначених розрахункових опорів.

$$\varepsilon_{R_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial U_R} \frac{dU_R}{R_{i3}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial I} \frac{dI}{R_{i3}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial R_A} \frac{dR_A}{R_{i3}}\right)^2} = \sqrt{\varepsilon_{I^2} + \varepsilon_{U_s^2} + \varepsilon_{R_A^2}} \quad (2.18)$$

Для контуру напруги:

$$U_{из} = \frac{U_d}{\left(\frac{R_d}{R_V} + \frac{2R_1}{R_V} + 2\right)} \cdot \left[\frac{(R_2 - R_1) \left(\frac{R_d}{2R_V} + 1\right) + \frac{R_1 R_2 - R_1^2}{R_V}}{(R_1 + R_2) \left(\frac{R_d}{2R_V} + 1\right) + \frac{R_1 R_2}{R_V}} \right] \\ = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{(R_2 - R_1)}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_d}{2R_V} + 1\right)} = U_n \cdot k \quad (2.19)$$

де R_V – опір вольтметра,

U_d - значення напруги:

$$U_n = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{(R_2 - R_1)}{R_1 + R_2} ;$$

$$k = \frac{1}{\left(\frac{R_d}{2R_V} + 1\right)}$$

Для контуру струму:

$$I_u = \frac{U_0}{R_{\pi} + 2R_1 + 2R_a} \cdot \left[1 - \frac{2R_1(R_{\pi} + R_1 + 2R_a)}{(R_1 + R_2)(R_{\pi} + 2R_a) + 2R_1R_2} \right] \\ = \frac{U_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + R_2)(R_{\pi} + 2R_a) + 2R_1R_2} \quad (2.20)$$

де R_a - опір амперметра.

Отже, похибка складатиме:

$$\varepsilon_U = |\varepsilon_V| + \left| \frac{U_{\pi} - U_u}{U_u} \right| = |\varepsilon_V| + |1 - k_U| \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_I = |\varepsilon_I| + \left| \frac{I_{\pi} - I_u}{I_u} \right| = |\varepsilon_I| + |1 - k_I| \quad (2.22)$$

де
$$I_{\pi} = \frac{U_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + R_2)R_{\pi} + 2R_1R_2};$$

$$k_I = \frac{I_u}{I_{\pi}} = \frac{R_{\pi} + 2R_{1a}}{R_{\pi} + 2R_{1a} + 2R_a}.$$

Для середньоквадратичного відхилення:

$$\varepsilon_{R_1} = \frac{1}{R_1} \left\{ \left[\left| \frac{\partial R_1}{\partial U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{\partial R_1}{\partial I_2(0)} di_2(0) \right| + \left| \frac{\partial R_1}{\partial \alpha} d\alpha \right| \right]; \right\} \quad (2.23)$$

Отже:

$$\varepsilon_{R_1} = \varepsilon_{R_2} = |\varepsilon_{U_c}| + |\varepsilon_{i(0)}| + \left| \varepsilon_C \frac{2m^2}{1+m+m^2} \right|, (2.24)$$

де ε_{U_0} , $\varepsilon_{i(0)}$ – відносна похибка;

ε_C – гранична похибка;

$$\alpha = 2C/C_0.$$

2.7. Алгоритм визначення методичної похибки при безперервному контролі параметрів опору ізоляції

Методичну похибку при визначенні розрахунків слід також враховувати при налагодженні систем діагностики.

Для визначення методичної похибки застосовують безперервний контроль параметрів опору ізоляції при їх визначенні та досліджують отримані розбіжності.



Рисунок 2.8 – Алгоритм визначення методичної похибки, що застосовують безперервний контроль параметрів опору ізоляції при їх визначенні та дослідженні отриманих розбіжностей

Висновки

У роботі проведено дослідження методів визначення омичного опору ізоляції та аналіз засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

Об'єктом дослідження був процес зміни омичного опору ізоляції в умовах електричних станцій та підстанцій.

Предметом дослідження було вдосконалення засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

У роботі було вирішено такі задачі:

1. Аналіз існуючих методів визначення омичного опору ізоляції та засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.

2. Оцінка ефективності методів визначення омичного опору ізоляції та засобів забезпечення селективності дії релейного захисту в умовах електричних станцій та підстанцій.