

ДІАГНОСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ ОПЕРАТИВНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І ПІДСТАНЦІЙ

Л. Н. Добровольська, к.т.н., доц., М. В. Романюк, асп.

Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, 43018, м. Луцьк, Україна

E-mail: nickrom86@mail.ru

Запропоновано метод неперервного контролю опору ізоляції двопровідної розподільної мережі постійного струму ґрунтується на принципі накладання гармонічного сигналу промислової частоти з компенсацією ємності мережі і вимірюванні активної складової струму на кожному приєднанні.

Ключові слова: розподільні мережі постійного струму, контроль ізоляції.

Вступ. Розподільні мережі постійного струму знайшли широке застосування на електричних станціях і підстанціях, на підприємствах гірничорудної, вугільної, хімічної промисловості. Вони конструктивно складні, мають два-три структурно-ієрархічних рівні, мають високу ціну відмови, автономні. Досвід експлуатації розподільних мереж постійного струму (РМПС) на електричних станціях і підстанціях [1] засвідчує, що однією з причин втрати їх робоздатності є пошкодження ізоляції полюсів відносно землі. Вони складають 80–90 % від загальної кількості пошкоджень.

Аналіз попередніх досліджень. Умови робоздатності РМПС для даного виду пошкоджень визначають як обмеження на зміну омичного опору ізоляції полюса мережі відносно землі. Згідно [2], пристрій контролю ізоляції на шинах постійного оперативного струму повинен діяти на сигнал після зниження опору ізоляції полюсів до уставки 20 кОм у мережі 220 В, 10 кОм у мережі 110 В, 6 кОм у мережі 60 В, 5 кОм у мережі 48 В, 3 кОм у мережі 24 В. Під час роботи опір ізоляції мережі постійного струму повинен бути не нижчим, ніж дворазове значення уставки пристрою контролю ізоляції. У випадку спрацювання пристрою сигналізації, внаслідок зниження рівня ізоляції відносно землі в колі оперативного струму, повинні бути негайно вжиті заходи для усунення несправностей. У цьому випадку виконання робіт без зняття напруги у цій мережі за винятком пошуку місця пошкодження заборонено.

Для контролю ізоляції оперативних мереж постійного струму застосовують мостову схему [3, 4], важелями якої є опори ізоляції полюсів. На рис. 1 зображена схема пристрою контролю ізоляції, який здійснює сигналізацію зниження рівня опору ізоляції полюса мережі відносно землі за допомогою двох реле: KV1 і KV2. Якщо вважати, що $R = R_0 + R_p$, $i R_p$ – відповідно внутрішній омичний опір реле KV1 і KV2, і знехтувати індуктивністю обмоток реле і внутрішнім опором міліамперметра PA, то струм через реле KV1 і KV2 можна визначити як

$$I_{KV1} = \frac{U_0 R_1 (R + R_2)}{R [R (R_1 + R_2) + 2R_1 R_2]}; \quad (1)$$

$$I_{KV2} = \frac{U_0 R_2 (R + R_1)}{R [R (R_1 + R_2) + 2R_1 R_2]}. \quad (2)$$

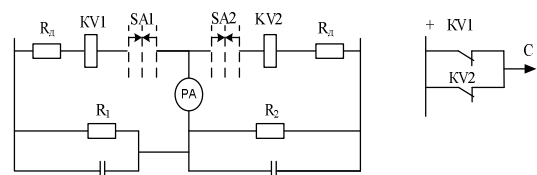


Рисунок 1 – Заступна схема пристрою контролю ізоляції мережі постійного струму

Визначимо чутливість струму через обмотку реле KV1 до зміни опору полюса мережі відносно землі R_1, R_2 , використовуючи рівняння (1, 2):

$$S_1 = \frac{dI_{KV1}}{dR_1} = U_0 \frac{R_2 (R + R_2)}{[R (R_1 + R_2) + 2R_1 R_2]^2}; \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{dI_{KV1}}{dR_2} = -U_0 \frac{R_1 (R + R_1)}{[R (R_1 + R_2) + 2R_1 R_2]^2}. \quad (4)$$

Для електричної мережі постійного струму з напругою 220 В в якості реле KV1, KV2 використовують реле мінімальної напруги типу РН 51/М78 з додатковим опором до обмотки реле, тому загальний опір плеча моста буде $R = 16$ кОм [4]. На рис. 2 побудована залежність а) $S_1 = f(R, R_1)$ при $R_2 = \text{const}$ і б) – $S_1 = f(R, R_2)$ при $R_1 = \text{const}$. Із рис. 2 а), б) видно, що пристрій має різну чутливість до зміни омичного опору полюса мережі. Враховуючи фіксоване значення уставки спрацювання пристрою, в області великих значень опору будемо мати хибне спрацювання; крім цього, пристрій не реагує на симетричне зниження опору ізоляції полюсів. Тому в цьому пристрої здійснюють періодичний контроль рівня ізоляції полюсів мережі відносно землі за допомогою перемикачів SA1, SA2 і міліамперметра PA шляхом вимірювання струмів, по яких визначають опори ізоляції полюсів за рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_2} \\ R_2 &= \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_1} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

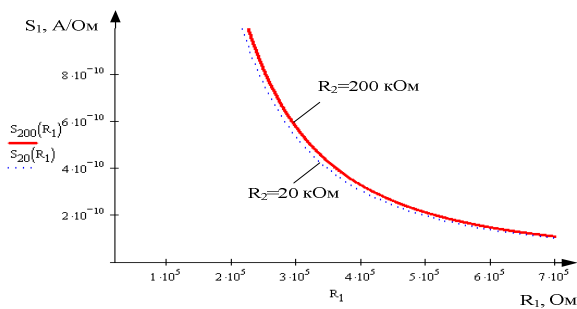
де I_2, I_1 – струм в міліамперметрі при розриві ланцюга відповідно перемикачем SA1 та SA2.

Основним недоліком схеми періодичного контролю ізоляції є низька точність вимірювання. Дійсно, при почерговому вимиканні ланцюгів перемикачами SA1, SA2 через вимірювальний орган РА будуть протікати струми перехідного процесу:

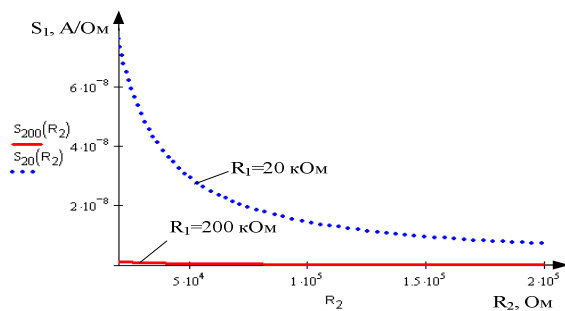
$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U_0}{R_2 + R(1 + 2R_2/R_1)} \left(1 + \frac{R_2}{R(1 + 2R_2/R_1)} e^{-t/\tau} \right); \\ i_2(t) &= \frac{U_0}{R_1 + R(1 + 2R_1/R_2)} \left(1 + \frac{R_1}{R(1 + 2R_1/R_2)} e^{-t/\tau} \right), \end{aligned} \right\}$$

де $\tau = \frac{2CRR_1R_2}{R_1R_2 + R(R_1 + R_2)}$ – стала часу; C – ємність

полюса мережі відносно землі.



а)



б)

Рисунок 2 – Залежність чутливості струму в діагоналі моста до зміни опору полюсів:

а) – $S_1=f(R,R_1)$ при $R_2=const$; б) – $S_1=f(R,R_2)$ при $R_1=const$.

У цьому випадку для визначення опору ізоляції R_1, R_2 необхідно знати тільки постійну складову системи рівнянь (5), тому відлік струму виконують після закінчення перехідного процесу, час якого невизначений, закінчення його складно фіксувати за відхиленням стрілки приладу у зв'язку з коливанням напруги мережі та навантаження. У сталому режимі граничну відносну похибку,

наприклад, визначення R_1 із рівнянь (5) можна записати як

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R_1} &= \left| \varepsilon_{U_0} (1 + \alpha_1 (1 + \alpha_2)) \right| + \left| -\varepsilon_{I_1} \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right| + \\ &+ \left| -\varepsilon_{I_2} \frac{1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 \alpha_2^2 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_1^2} \right| + \\ &+ \left| -\varepsilon_{R_s} \frac{\alpha_1 (1 + 2\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_2))}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right|, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\alpha_1 = R/R_1$; $\alpha_2 = R_1/R_2$; ε_{U_0} – гранична відносна похибка, зумовлена коливанням напруги мережі постійного струму; $\varepsilon_{I_1} = \varepsilon_{I_2} = \varepsilon_I$ – гранична відносна похибка вимірювання струму; ε_{R_s} – гранична відносна похибка встановлення значення опору R .

Гранична відносна похибка ε_{R_1} при визначенні R_1 за усталеною величиною струму $I_2 = i_2(t)$ із системи (5):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R_1} &= \left| \varepsilon_{U_0} \frac{1 + \alpha_1 (1 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2} \right| + \left| -\varepsilon_{I_2} (1 + \alpha_1 \alpha_2) (1 + \alpha_1 (1 + \alpha_2)) \right| + \\ &+ \left| \varepsilon_R \frac{1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_2)}{(1 + \alpha_1 \alpha_2)^2} \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

Для реальних умов є прийнятним: $\varepsilon_U = \pm 5\%$, $\varepsilon_I = \pm 2,5$, $\varepsilon_R = \pm 5$, $k_2 = 0,1 \div 10$. Для схеми пристрою УКИ-1 [4] $R=16$ кОм. Аналіз виразів (6) та (8) показав, що похибка визначення ε_{R_1} може перевищувати 40%.

Відомі також методи неперервного контролю ізоляції, що використовують накладання на контрольовану мережу змінного струму промислової та зниженої частоти [3, 5, 6, 7] з вимірюванням активної складової струму. Особливістю застосування цих методів є можливість селективного визначення пошкодженого приєднання до шин підстанції.

Основною проблемою використання цього методу є виділення активної складової із повного струму, що протікає через ланцюг вимірювання, оскільки реактивна складова в десятки й сотні разів перевищує активну. Тому принципово ці методи не забезпечують достатньої чутливості. Крім цього, під час вимірювання струму витікання в приєднанні давач струму вносить кутову похибку, яка в ряді випадків у декілька разів перевершує похибку вимірювання активної складової струму витікання в мережі.

З метою зменшення похибки визначення активної складової струму намагаються зменшити частоту сигналу накладання і компенсувати кутову похибку різними методами. Наприклад, у [6] вимір активної складової струму витікання здійснюють за допомогою спеціального диференційного трансформатора струму нульової послідовності (ДТНП). Схема пристрою показана на рис. 3.

На контрольовану мережу через дугогасниковий реактор ДГР накладають напругу низької частоти 1,5 – 3 Гц, під дією якої через ізоляцію мережі протікають ємнісний I_C та активний струм I_a . Одночасно для роботи давача струму по його додатковій обмотці ($D1, D2$) пропускають струм $I_{a,d}$ від джерела пониженої частоти, який співпадає по фазі коливання із струмом, який протікає по активному опорі ізоляції. Тоді по одній із додаткових обмоток протікає струм

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_a + \dot{I}_{a,d} + \dot{I}_C,$$

а по другій

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_a - \dot{I}_{a,d} + \dot{I}_C.$$

Оскільки додаткові обмотки ввімкнені протилежно, то магнітопровід ДТНП буде додатково підмагнічуватись різницею цих струмів, модуль яких може бути визначений як

$$\Delta I = |\dot{I}_1| - |\dot{I}_2| = I_C \left[\sqrt{1 + \left(p + \frac{I_a}{I_C}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(p - \frac{I_a}{I_C}\right)^2} \right], \quad (8)$$

де $p = \frac{I_{a,d}}{I_C}$.

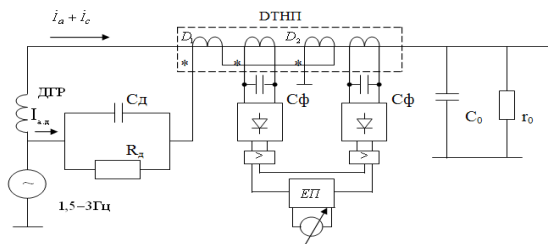


Рисунок 3 – Схема пристрою неперервного контролю ізоляції з диференціальним трансформатором нульової послідовності та накладанням низькочастотного сигналу

Із формули (8) видно, що величина ΔI залежить від реактивного додаткового струму. Шляхом зміни $I_{a,d}$ можна розширити межі вимірюваного струму I_a . Наприклад, чим більшу величину I_a необхідно виміряти, тим більшу величину $I_{a,d}$ необхідно ввести, але при цьому розширенні меж вимірювання I_a в області великих струмів втрачається чутливість при вимірюванні малих за величиною струмів. Крім цього, повинна виконуватись і інша умова: $\frac{I_{a,d}}{I_C} \gg 1$. Частково остання умова виконується завдяки зниженню частоти накладеного сигналу. Але зниження частоти погіршує трансформацію сигналу, виникають додаткові втрати, і струм накладеного сигналу наближається за величиною до струму небалансу промислової частоти. Для виділення корисного сигналу потрібно застосовувати спеціальні фільтри. Суттєвим недоліком методу є складність реалізації і налаштування.

Мета роботи. Підвищення точності визначення ємнісного опору полюсів РМПС шляхом зменшення

впливу ємності мережі і перехідних процесів на результати вимірювання.

Матеріал і результати дослідження. Запропоновано метод неперервного контролю ізоляції омичних опорів полюсів мережі відносно землі, який ґрунтується на відомому принципі накладання джерела змінного струму промислової частоти на РМПС, але з метою зменшення впливу ємності мережі на результати контролю передбачається автоматична компенсація ємнісної складової та вимірювання активної складової струму від стороннього джерела живлення.

У дублюючому експерименті при визначенні омичного опору окремих полюсів відносно землі використовується метод періодичного контролю, який ґрунтується на підключенні незарядженої ємності до полюса мережі й вимірюванні максимального значення струму заряду конденсатора і напруги РМПС. Відношення їх значень дозволяє визначити омичний опір полюса мережі відносно землі. При цьому виключається вплив перехідних процесів і перевіряється результат неперервного контролю. На основі отриманих даних за результатами неперервного і періодичного контролю формується діагноз відносно технічного стану ізоляції РМПС. Принципова схема пристрою неперервного контролю ізоляції зображена на рис. 4.

Змінний оперативний струм з вторинної обмотки W_1 трансформатора ТЛ накладається на РМПС через фільтри приєднання C_ϕ . Вимірювання ємності РМПС здійснюється LC генератором, який містить у собі триод VT1 з ємнісним зворотнім зв'язком. Ємність контрольованої мережі C через конденсатори C_ϕ фільтра приєднання, конденсатор $C1$, додаткову індуктивність W_d , конденсатор $C2$ приєднана паралельно опорі $R3$ зворотного зв'язку генератора LC. Ця напруга, пропорційна ємності мережі, підсилюється за допомогою транзистора VT2 і подається на обмотку керування W_k дроселя L . Таким чином, струм в обмотці керування W_k дроселя L і його індуктивність будуть змінюватись у залежності від ємності мережі. Магнітопровід дроселя набрано із ш-подібних пластин. На крайніх стержнях магнітопроводу розташована обмотка W_{dp} , яка має дві секції (на рис. 4 не показано), що з'єднані зустрічно для компенсації змінної ЕРС в обмотці керування W_k .

Змінюючи струм в обмотці W_k , можна змінювати індуктивність дроселя. Якщо для простоти аналізу знехтувати втратами в дроселі L і ємністю приєднання C_ϕ , то діюче значення струму визначається як

$$I = U_1 \sqrt{\frac{1}{R_{13}^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L_{dp}} \right)^2},$$

де $R_{13} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$; L_{dp} – індуктивність дроселя; U_1 – напруга на обмотці W_1 трансформатора ТЛ.

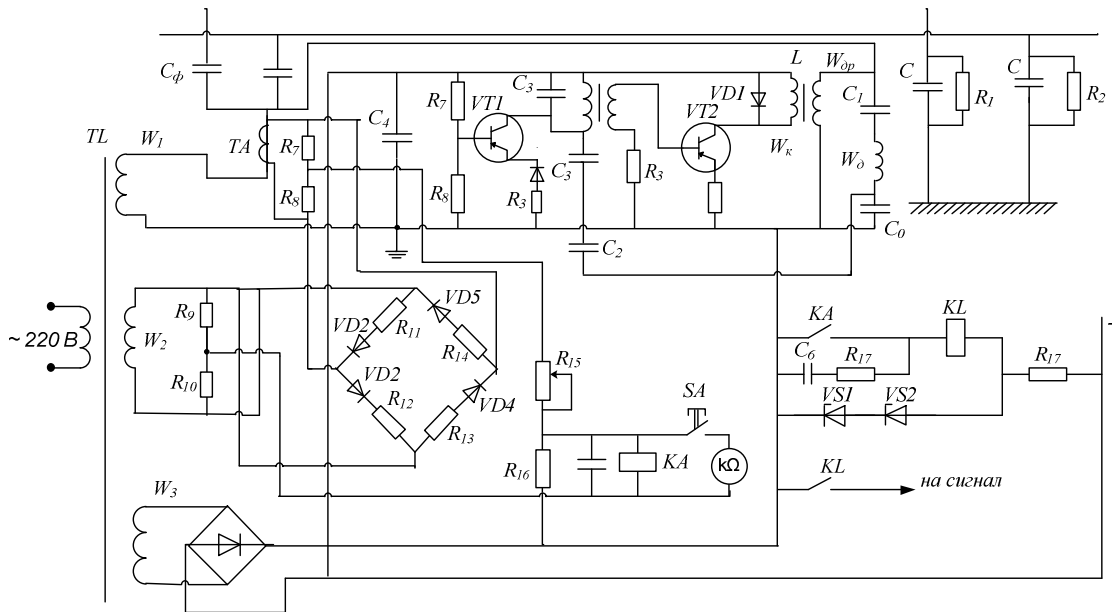


Рисунок 4 – Принципова схема пристрою неперервного контролю ізоляції

При умові $\omega C = \frac{1}{\omega L_{\text{др}}}$ струм буде визначатись

тільки активним опором. Якщо враховувати ємність приєднання, то діюче значення струму в колі контролю визначається як

$$I = U_1 \sqrt{\frac{1}{R_{13}^2} + \left(\omega C_{\phi} - \sqrt{\frac{1}{R_{13}^2} + \omega^2 C_{\phi}^2} \right)^2}$$

і точність компенсації буде залежати від співвідношення R_{13} і C_{ϕ} . При зниженні опору ізоляції полюсів по відношенню до значення ωC_{ϕ} точність компенсації зменшується. Для подальшого зменшення впливу ємності мережі і втрат у дроселі метод передбачає виділення активної складової струму у вимірювальному каналі за допомогою фазочутливої схеми. Фазочутлива схема складається з діодів VD2-VD4 і баластних резисторів R11-R14. Навантаження фазочутливої схеми підключене до середніх точок дільників напруги R7-R8 і R9-R10. Напруга, яка подається від вторинної обмотки W_2 TL, значно більше напруги вторинної обмотки TA, яка завантажена дільником напруги. У зв'язку з цим напруга від обмотки W_2 є керуючою, тобто вона тільки відкриває або закриває діоди, а струм у колі навантаження фазочутливої схеми створюється меншою напругою і протягом кожного напівперіоду проходить через відкриті діоди. При такому режимі, як показано у [8], середнє значення напруги на виході фазочутливої схеми $U_{\text{вих}} = I \cos \varphi$, де φ – кут між напругою, що керується, і створеним нею струмом. Таким чином, на вихідне реле контролю KA подається активна складова струму. Активний опір ізоляції можна виміряти за допомогою кілометра $k\Omega$. За допомогою потенціометра R15 можна змінювати уставку

спрацювання реле KA. Напруга на виході фазочутливої схеми порівнюється з еталонною стабілізованою напругою від дільника напруги R15- R16, на результат порівняння реагує чутливе реле KA. Вихідне реле KL діє на сигнал.

Для визначення опору ізоляції кожного полюса відносно землі використовують пристрій, схема якого зображена на рис. 5.

Алгоритм роботи пристрою наступний. Для визначення опору ізоляції R_2 перемикач SA ставимо в положення 1 і, натискаючи кнопку SB, підключають конденсатор між додатним полюсом мережі з напругою U_0 і землею. Струм заряду конденсатора можна визначити як

$$i_1(t) = \frac{U_0}{R_2 (1 + 2C_1/C_0)^2} e^{-t/\tau},$$

$$\text{де } \tau = \frac{R_1 R_2 (C_0 + 2C_1)}{R_1 + R_2}.$$

По відношенню напруги живлення U_0 і максимального значення струму заряду конденсатора $i_1(0)$ можна визначити омичний опір полюса R_2 як

$$R_2 = \frac{U_0}{i_1(0)} = \frac{U_0}{i_1(0)(1 + 2C_1/C_0)^2}.$$

У реальних умовах не існує обмеження на вибір значення C_0 , тому можна підібрати його значення так, щоб $2C_1/C_0 \rightarrow 0$ тоді $R_2 = U_0 / i_1(0)$ і похибка вимірювання опору ізоляції полюса буде залежати лише від класу точності кілометра $k\Omega$. Для вимірювання ізоляції полюса з опором R_2 перемикач SA треба установити в положення 2 і натиснути кнопку SB. Опір R призначений для розряду конденсатора C_0 . Перед початком вимірювання конденсатор C_0 необхідно розрядити.

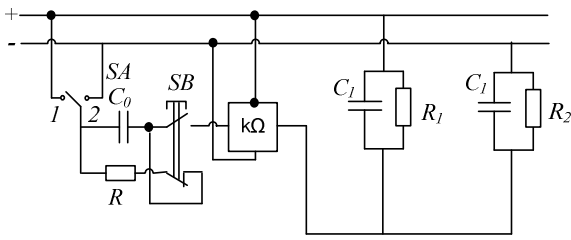


Рисунок 5 – Принципова схема пристрою для вимірювання омичного опору полюсів

Висновки. Для підвищення точності неперервного контролю ізоляції полюсів відносно землі у двопровідній мережі постійного струму доцільно використовувати принцип накладання змінного струму промислової частоти з автоматичною компенсацією ємності мережі відносно землі і вимірювання активної складової струму від стороннього джерела живлення.

Для підвищення вірогідності діагнозу необхідно провести дублюючий експеримент по виключенню впливу коливання напруги і навантаження мережі постійного струму, а також ємності мережі шляхом вимірювання омичного опору окремих полюсів відносно землі R_1 і R_2 , використовуючи метод, який ґрунтується на підключенні незарядженої ємності між полюсом мережі і землею та вимірюванні напруги мережі і максимального значення струму заряду конденсатора. За співвідношенням цих величин визначають омичний опір полюса.

ЛІТЕРАТУРА

1. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила: Об'єднання енергетичних

підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики": ГДК 34.20.507 – 2003. – Київ: 1998. – 329 с.

2. Антипов К.М. О повышении надежности работы устройств релейной защиты, автоматики и технологических защит при замыканиях на землю в сети постоянного тока. // Противоаварийный циркуляр № Ц-10-87(Э). – 2.10.87. – 4 с.

3. Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор-трансформатор. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 256 с.

4. Дорогунцев В.Г., Овчаренко Н.И. – Элементы автоматических устройств энергосистем / 2-е изд. – М.: Энергия, 1979. – 520 с.

5. Кобылянский А.В., Рубаненко А.Е. Поиск места повреждения в сетях постоянного тока // Энергетик. – 1987. – С. 17–19.

6. Цапенко Е.Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. – М.: Энергия, 1972. – 130 с.

7. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.

8. Шулика Н.М., Сирота И.М., Богаченко А.Е. – Контроль состояния изоляции электрических сетей: Препр. 632 ИЭД АН УССР. – Киев, 1990. – 42 с.

Стаття надійшла 06.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Бялобржеським О.В.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ОПЕРАТИВНЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

*Л. Н. Добровольская, к.т.н., доц., М. В. Романюк, асп.
Луцкий национальный технический университет
ул. Львовская, 75, 43018, г. Луцк, Украина
E-mail: nickrom86@mail.ru*

Предложенный метод непрерывного контроля сопротивления изоляции двухпроводной распределительной сети постоянного тока основывается на принципе наложения гармонического сигнала промышленной частоты с компенсацией емкости сети и измерении активной составляющей тока на каждом присоединении.

Ключевые слова: распределительные сети постоянного тока, контроль изоляции.

DIAGNOSTIC ISOLATION CONTROL OPERATIONAL NETWORKS DIRECT CURRENT ELECTRIC STATIONS AND SUBSTATIONS

*L. Dobrovolska, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., M. Romaniuk, post-grad.
Lutsk National Technical University
vul. Lvivska, 75, 43018, Lutsk, Ukraine
E-mail: nickrom86@mail.ru*

The method of continuous monitoring of insulation resistance dvoprovodnoyi DC distribution network based on the principle of harmonious blending of industrial frequency signal with compensation network capacity and measuring the active component of current at each connection.

Key words: distribution networks DC, control isolation.