

621.317.333.621.316.13

**М.В. Романюк, В.І. Волинець, Д.С. Собчук, І.О. Бандура***Луцький національний технічний університет***ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ  
КОНТРОЛІ ОМІЧНОГО ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ ПОЛЮСІВ РМПС ВІДНОСНО ЗЕМЛІ ТА  
ОКРЕМИХ ПРИЄДНАНЬ***Проведено дослідження похибки визначення загального омичного опору ізоляції РМПС відносно землі.**Ключові слова: контроль ізоляції, розподільні мережі постійного струму.***М.В. Романюк, В.И. Волинець, Д.С. Собчук, И.О. Бандура****ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНЫЙ  
КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ПОЛЮС РСPT  
ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ И ОТДЕЛЬНЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ***Проведено исследование погрешности определения общего омического сопротивления изоляции РСPT относительно земли.**Ключевые слова: контроль изоляции, распределительные сети постоянного тока.***M. Romanyuk, V. Volynets, D. Sobchuk, I. Bandura****INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MEASUREMENT METHOD FOR THE  
CONTINUOUS CONTROL OF OILS INCORPORATION OF POLYUS ISOLATION IN  
DETECTED DISTRIBUTION NETWORKS RELATED TO EARTH AND SPECIFIC  
CONNECTIONS***The study of the error of determination of the total ohmic impedance of isolation of DC distributive circuits with respect to the ground is carried out..**Keywords: insulation control, distributive DC networks.*

**Постановка проблеми.** Двопровідні мережі постійного струму широко використовуються для живлення різних споживачів електричної енергії на електричних станціях і підстанціях, підприємствах гірничорудної, вугільної, хімічної, машинобудівельної, легкої та інших галузей промисловості.

Система електропостачання оперативним струмом на електричних станціях і підстанціях складається із джерел живлення і розподільної мережі (РМПС), від якої живляться споживачі. Оперативний струм може бути постійним, випрямленим і змінним, напругою 24, 36, 110, 220, 380 В. Оперативний постійний струм використовують на всіх електростанціях і на підстанціях 110–750 кВ з кількістю вимикачів більше трьох і на всіх підстанціях з елегазовими і повітряними вимикачами, синхронними компенсаторами і примусовою системою охолодження трансформаторів. Для живлення оперативних мереж постійного струму на електричних станціях і потужних підстанціях у переважній більшості використовують свинцево-кислотні акумулятори з поверхнево додатними і коробчастими від'ємними пластинами типу СК.

Основними споживачами оперативного постійного струму є кола керування, сигналізації, автоматики, аварійного освітлення, а також відповідальні механізми власних потреб, які забезпечують збереження обладнання в працездатному стані (маслонасоси змащення, ущільнення вала, систем регулювання турбогенераторів).

На електричних станціях і підстанціях передбачають контроль ізоляції полюсів відносно землі, який повинен діяти на сигнал при зниженні опору ізоляції одного полюса до 20 кОм при напрузі мережі 220 В. При цьому виконання робіт під напругою не допускається, за виключенням пошуку місця замикання, час існування якого обмежують вісьмома годинами. Якщо за цей час замикання на землю не буде усунуте в мережах оперативного постійного струму електричних станцій і підстанцій 110 кВ і вище, то це вважається відмовою в роботі II-го ступеня. Тому на електричних станціях і підстанціях необхідно здійснювати безперервний контроль технічного стану ізоляції полюсів відносно землі, який дозволяв би виявити пошкодження на ранній стадії його розвитку.

Пристрої, які реагують на струм перехідного процесу при виникненні витікання струму (дотику людини до струмоведучої частини), дозволяють визначити лише максимальне значення струму через місце витікання і не реагують на симетричну зміну опору ізоляції полюсів мережі відносно землі. Отже, для підвищення рівня надійності, безпеки та ефективності використання

двопровідних мереж постійного струму необхідно вдосконалити методи та засоби контролю ізоляції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За принципом дії всі існуючі пристрої контролю ізоляції можна поділити на чотири групи: 1) методи, що ґрунтуються на контролі несиметрії провідностей ізоляції полюсів відносно землі; 2) методи накладання стороннього джерела живлення на контрольовану мережу; 3) методи, що використовують перехідні процеси; 4) комбіновані методи.

Для контролю ізоляції оперативних мереж постійного струму часто застосовують методи, що ґрунтуються на використанні врівноваженого мосту, важелями якого є опори ізоляції відносно землі [1,2]. Наприклад, на рис. 1. зображена схема [2], яка здійснює сигналізацію зниження рівня ізоляції полюса мережі відносно землі за допомогою двох реле KV1 та KV2. А за допомогою перемикачів SA1, SA2 здійснюють вимірювання струмів, за якими визначають опори ізоляції полюсів за рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_2} ; \\ R_2 &= \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_1} ; \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

де  $R = R_g + R_p$  ;

$U_0$  – напруга на шинах;

$I_1, I_2$  – струм в міліамперметрі при розриві кола відповідно перемикачем SA1 та SA2;

$R_p$  – опір обмотки реле KV.

Основним недоліком цих схем є низька точність вимірювання. Наприклад, при почерговому вимкненні кіл перемикачами SA1, SA2 через вимірювальний орган ПА будуть протікати струми перехідного процесу:

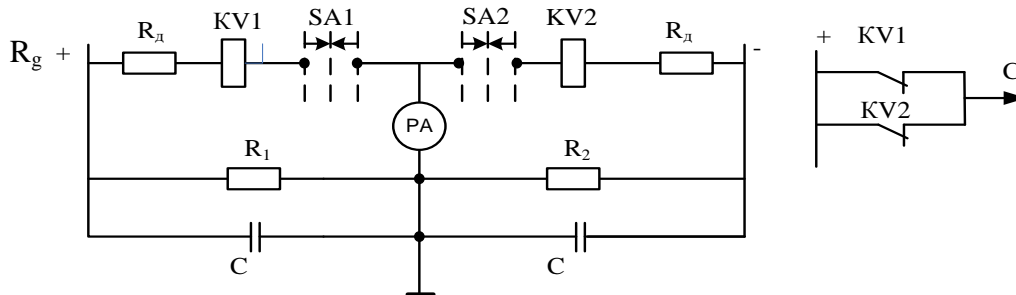


Рис. 1. Схема заміщення контролю ізоляції мережі постійного струму (схема ОРГРЕС)

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U_0}{R_2 + R(1 + 2R_2 / R_1)} \left( 1 + \frac{R_2}{R(1 + 2R_2 / R_1)} e^{-t/\tau} \right) ; \\ i_2(t) &= \frac{U_0}{R_1 + R(1 + 2R_1 / R_2)} \left( 1 + \frac{R_1}{R(1 + 2R_1 / R_2)} e^{-t/\tau} \right) ; \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

де  $\tau = \frac{2CRR_1R_2}{RR_2 + R(R_1 + R_2)}$  – стала часу;

$C$  – ємність полюса мережі відносно землі.

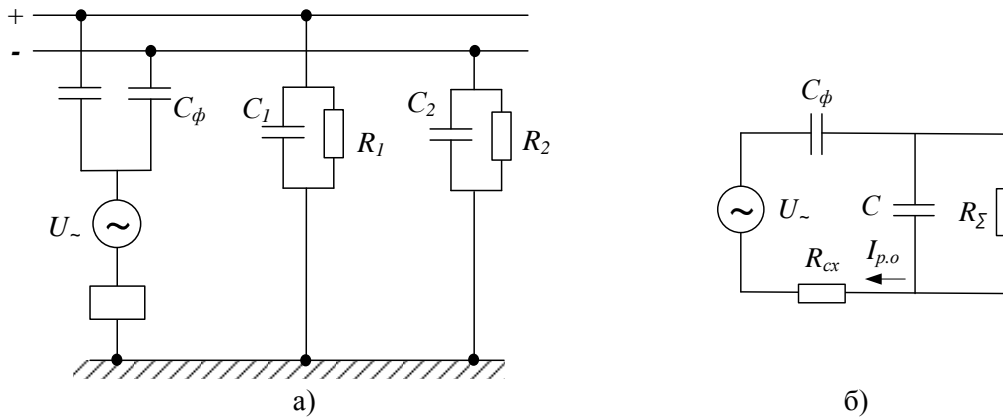


Рис. 2. Схема заміщення мережі а); розрахункова схема визначення струму б)

В цьому випадку для визначення опору ізоляції \$R\_1, R\_2\$ необхідно знати тільки сталу складову системи рівнянь (1.2), тому відлік струму виконують після закінчення перехідного процесу, час якого невизначений, закінчення його складно фіксувати за відхиленням стрілки приладу в зв'язку з коливанням напруги мережі та навантаження. В сталому режимі граничну відносну похибку, наприклад, визначення \$R\_1\$ із рівнянь (1.3) можна записати як:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R_1} = & \left| \varepsilon_{U_0} (1 + \alpha_1 (1 + \alpha_2)) \right| + \left| -\varepsilon_{I_1} \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right| + \\ & + \left| -\varepsilon_{I_2} \frac{1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 \alpha_2^2 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_1^2} \right| + \left| -\varepsilon_{R_s} \frac{\alpha_1 (1 + 2\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_2))}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right|, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де  $\alpha_1 = R / R_1$ ;

$\alpha_2 = R_1 / R_2$ ;

$\varepsilon_{U_0}$  – гранична відносна похибка, зумовлена коливанням напруги мережі постійного струму;

$\varepsilon_{I_1} = \varepsilon_{I_2} = \varepsilon_I$  – гранична відносна похибка вимірювання струму;

$\varepsilon_{R_s}$  – заводська гранична відносна похибка опору \$R\_d\$.

Гранична відносна похибка  $\varepsilon_{R_1}$  при визначенні \$R\_1\$ за ustalеним значенням струму  $i_2(t)$  із системи (1.3):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R_1} = & \left| \varepsilon_{U_0} \frac{1 + \alpha_1 (1 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2} \right| + \left| -\varepsilon_{I_2} (1 + \alpha_1 \alpha_2) (1 + \alpha_1 (1 + \alpha_2)) \right| + \\ & + \left| \varepsilon_R \frac{1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_2)}{(1 + \alpha_1 \alpha_2)^2} \right|. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Для реальних умов є прийнятним:  $\varepsilon_{U_0} = \pm 5\%$ ,  $\varepsilon_I = \pm 2.5\%$ ,  $\varepsilon_R = \pm 5\%$ ,  $\alpha_2 = 0,1 \div 10$ . Для схеми пристрою УКИ-1 [8],  $R = 16$  кОм. Аналіз виразу (1.4) показав, що похибка визначення  $\varepsilon_{R_1}$  може перевищувати 40%.

**Постановка завдань.** Метою є зменшення похибки контролю опору ізоляції полюсів відносно землі в двопровідних мережах постійного струму шляхом зменшення впливу ємності мережі відносно землі та визначення струму через місце витікання, що забезпечує вищий рівень надійності, безпеки і ефективності використання двопровідних мереж постійного струму.

**Викладення основного матеріалу.** Проведемо дослідження похибки визначення загального омичного опору ізоляції РМПС відносно землі [3].

Використовуючи рівняння (2.2), знаходимо відносну похибку визначення опору ізоляції як:

$$\varepsilon_{R_{i3}} = \frac{I}{R_{i3}} \left( \left| \frac{\partial R_{i3}}{\partial U} dU \right| + \left| \frac{\partial R_{i3}}{\partial I_a} dI_a \right| \right) = |\varepsilon_U| + |\varepsilon_{I_a}|$$

де  $\varepsilon_U = \frac{dU}{U}$  – гранична відносна похибка вимірювання напруги джерела живлення, що накладається на контрольовану мережу, яка визначається класом точності вимірювальної системи;

$\varepsilon_{I_a} = \frac{dI_a}{I_a}$  – відносна похибка визначення струму, яка складається із відносної похибки вимірювальної системи і методичної похибки. Методичну похибку можна визначити із (1.5) як:

$$\varepsilon_m = \frac{I_{a0} - I_{ae}}{I_{a0}} = 1 - \frac{4\omega^2 C_\phi^2 R_{i3}^2}{1 + 4\omega^2 R_{i3}^2 (C_\phi + \Delta C)^2} \quad (1.5)$$

де  $I_{a0}$ ,  $I_{ae}$  – відповідно дійсне значення активної складової струму і визначене;  
 $\Delta C$  – недокомпенсована ємність.

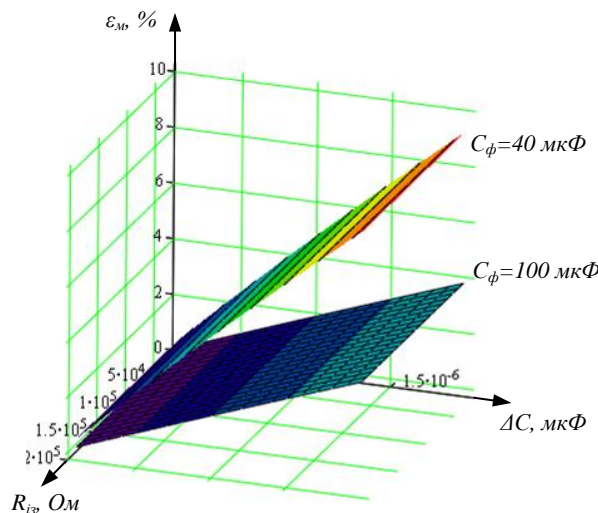
На рис. 3 побудована залежність методичної похибки визначення активної складової опору ізоляції мережі відносно землі  $R_{i3}$  від залишкового (недокомпенсованого) значення ємності мережі  $\Delta C$  при  $C_\phi = \text{const} = 50$  і  $100$  мкФ.

Із приведеного аналізу (рис. 4) встановлено, що за найнесприятливіших умов компенсації  $\varepsilon_k \leq 10\%$ ,  $C_{\text{мах}} = 20$  мкФ,  $C_\phi = 40$  мкФ методична похибка, незалежно від активного опору ізоляції, не перевищує  $\varepsilon_m \leq 9\%$  і знижується при збільшенні  $C_\phi$ , так при  $C_\phi = 100$  мкФ,  $\varepsilon_m = 3,8\%$ .

При визначенні струму на окремому приєднанні (селективний контроль) маємо

$$\begin{aligned} \varepsilon'_m &= 1 - \frac{4\omega^2 C_\phi (C_\Pi + C_{ek} + C_\phi) R_{i3.\Pi}^2 R_{i3.ek}^2}{4\omega^2 (C_\Pi + C_{ek} + C_\phi)^2 R_{i3.\Pi}^2 R_{i3.ek}^2} - \frac{4\omega^2 C_\phi C_\Pi R_{i3.\Pi}^2 R_{i3.ek} (R_{i3.\Pi} + R_{i3.ek})}{4\omega^2 (C_\Pi + C_{ek} + C_\phi)^2 R_{i3.\Pi}^2 R_{i3.ek}^2 + (R_{i3.\Pi} + R_{i3.ek})^2} = \\ &= 1 - \frac{4\omega^2 C_\phi (C_\phi + C) - 4\omega^2 C_\phi C_\Pi (K + 1)}{4\omega^2 (C_\phi + C)^2 + \frac{K^2 + 2K + 1}{R_{i3.\Pi}^2}} \end{aligned} \quad (1.6)$$

де  $K = R_{i3.\Pi} / R_{i3.ek}$ ;  $C = C_\Pi + C_{ek}$ .

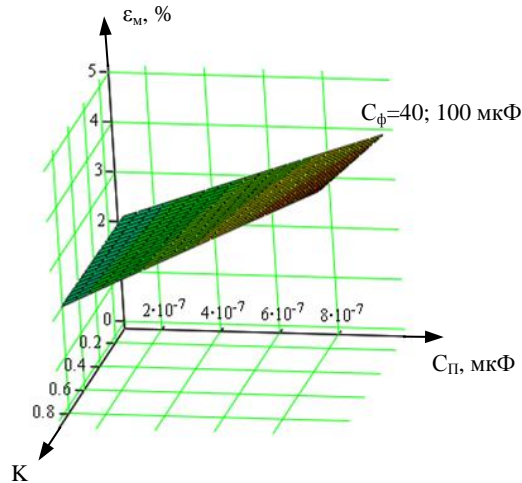


**Рис. 3. Залежність відносної методичної похибки визначення активної складової струму від рівня активного опору ізоляції і компенсації ємності мережі при постійному значенні ємності фільтра  $C_\phi = 40$  мкФ,  $C_\phi = 100$  мкФ**

Для визначення методичної похибки були прийняті такі обмеження. Опір ізоляції приєднання має граничне значення, тобто  $R_{i3.\Pi} = 20$  кОм, похибка пристрою компенсації

знаходиться на рівні  $\varepsilon_k = 10\%$ , тобто  $S_{ек} \leq 2$  мкФ,  $C_{ф} = \text{const} = 40; 100$  мкФ. На рис. 4 побудована залежність відносної методичної похибки визначення активної складової струму від рівня активного опору ізоляції і компенсації ємності мережі при постійному значенні ємності фільтра  $C_{ф} = 40$  мкФ;  $C_{ф} = 100$  мкФ.

Аналіз даних рис. 4 показує, що при прийнятих обмеженнях відносна методична похибка визначення активної складової струму окремого приєднання не перевищує 4%, а ємність фільтра приєднання практично не впливає на величину методичної похибки.



**Рис. 4. Залежність відносної методичної похибки визначення активної складової струму на окремому приєднанні РМПС від співвідношення опорів приєднання і ємність  $C_{п}$  приєднання при  $S_{ек} = 2$  мкФ,  $R_{із.п} = 20$  кОм,  $C_{ф} = \text{const} = 40, 100$  мкФ**

Середньоквадратична відносна похибка визначення опору ізоляції всієї мережі може бути визначена як:

$$\varepsilon_{R_n} = \sqrt{\varepsilon_U^2 + (\varepsilon_{I_a} + \varepsilon_m)^2} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

Якщо  $|\varepsilon_U| \leq 1\%$ ;  $|\varepsilon_{I_a}| \leq 1\%$  і точність компенсації ємності не перевищує 10%, то  $\varepsilon_{R_n} \leq 10\%$ , а похибка визначення опору ізоляції окремого приєднання при селективному контролі і прийнятих обмеженнях за рівняннями (1.7) не перевищує  $\varepsilon_{R_n} \leq 4\%$ .

**Висновки.** Безперервний контроль ізоляції необхідно доповнити періодичним контролем омичного опору ізоляції окремих полюсів відносно землі. Для розв'язання цієї задачі запропоновано метод накладання постійного струму різної полярності. Цей метод дозволяє виключити вплив ємності мережі відносно землі на результати вимірювання, і в найбільш несприятливих умовах вимірювання для середнього класу вимірювальних пристроїв ( $\varepsilon = 1\%$ ) похибка контролю не перевищує  $\varepsilon \leq 10\%$ . Для підвищення точності вимірювання омичного опору ізоляції полюсів в двопровідній мережі постійного струму доцільно застосовувати комбінацію статичної і динамічної характеристики вимірювального експерименту і дублювання. Це дозволяє зменшити вплив ємності мережі на результати вимірювань і похибку від неспівпадаючих з часом вимірювань при коливанні напруги і зміні навантаження двопровідної мережі постійного струму.

#### Список використаних джерел:

1. Гумин И.Я. Вторичные схемы электрических станций и подстанций / И. Я. Гумин, М. И. Гумин, В. Ф. Устинов. – М.-Л. : Энергия, 1964. — 176 с. — Бібліогр.: С. 174—176.
2. Цапенко Е.Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В / Цапенко Е.Ф. — М. : Энергия, 1972. — 130 с.
3. Добровольська Л.Н. Селективный контроль омичного опору ізоляції в лвопроводних мережах постійного струму / Л.Н. Добровольська, М.В. Романюк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Випуск 3/2010 (62). Частина 2. – Кременчук, 2010. – С. 90–94.

Стаття надійшла до редакції 07.03.2018