

## **ДІАГНОСТИЧНИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЮ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 6-10 КВ**

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*Визначена закономірність побудови комбінованої системи контролю роботоздатності ізоляції для розподільчих мереж напругою 6-10 кВ. Комбінована система діагностування передбачає узгодження та агрегацію системи неперервного контролю роботоздатності розподільчої мережі з системою, що періодично повторює діагностичні цикли. Визначення умов роботоздатності ізоляції ґрунтується на використанні критеріїв електробезпеки і мінімуму втрат електроенергії в ізоляції від струмів стікання на землю. Розроблено структуру і алгоритм функціонування діагностичного комплексу контролю роботоздатності ізоляції.*

**Ключові слова:** розподільчі мережі, контроль ізоляції, умови роботоздатності ізоляції, діагностичний комплекс контролю роботоздатності ізоляції.

### **Abstract**

*The regularity of the construction of the combined insulation performance control system for distribution networks with a voltage of 6-10 kV has been determined. The combined system of diagnostics provides for coordination and aggregation of the system of continuous monitoring of the efficiency of the distribution network with the system that periodically repeats the diagnostic cycles. Determining the conditions of insulation performance is based on the use of electrical safety criteria and the minimum loss of electricity in the insulation from leakage currents to the ground.*

**Keywords:** distribution networks, insulation control, insulation performance conditions, insulation performance control diagnostic complex

### **Вступ**

Актуальність проблеми. Досвід експлуатації розподільчих мереж показав, що останнім часом із-за різних причин в багатьох енергопостачальних компаніях (ЕК) витрати на повну і якісну експлуатацію обладнання розподільчих мереж (РМ) значно перевищують їх фінансові можливості, наслідком чого є недофінансування, тому це призводить до погіршення якості експлуатації і значного росту аварійності. За таких умов, коли ресурс обладнання РМ в більшості ЕК вже практично вичерпаний, накопичення дефектів і пошкоджень продовжується, а планові заміни із-за браку коштів не проводяться, дуже важливим є напрацювання дієвої стратегії виходу з кризи. Реалізувати таку стратегію можна шляхом впровадження системи обслуговування-за результатами контролю параметрів технічного стану обладнання РМ. Для її реалізації необхідно мати ефективні методи визначення технічного стану і роботоздатності обладнання РМ.

Постановка задачі. Таким чином, назріла необхідність розробити метод і математичну модель для визначення роботоздатності ізоляції у вигляді залежності показників роботоздатності від параметрів ізоляції.

Задача вибору показників технічного стану ізоляції полягає у розгляді всіх можливих електротехнічних характеристик ізоляції, які можуть бути пов'язані із її технічним станом, та аналізі на основі вибраних критеріїв,

яким чином вони зможуть характеризувати рівень безпеки експлуатації і економічності функціонування розподільчих мереж.

Розглянемо застосування критерію безпеки експлуатації при визначенні роботоздатності ізоляції. Як відомо, на території України діє Державний Стандарт [1] (ГОСТ 12.1038-82 "Предельно допустимые уровни напряжения и токов"), що регулює питання безпеки експлуатації електрообладнання з точки зору виникнення в ньому небезпечних рівнів напруг і струмів, під дію яких може потрапити людина.

Ні один з них не дає можливості оцінити рівень безпеки експлуатації ізоляції РМ. В даному випадку необхідно ввести показник технічного стану, який має бути пов'язаний із процесом пошкодження ізоляції і струмом через тіло людини, що виникає при цьому. Таким показником

може бути струм в шунтувальному зв'язку  $I_{3ш}$ , що протікає через тіло людини при її дотику до струмопровідних частин обладнання в місці пошкодження ізоляції [2].

Розглянемо застосування критерію економічності функціонування для визначення роботоздатності ізоляції. Очевидним є те, що основною мірою економічності функціонування розподільних мереж являються втрати при передачі електроенергії. Миттєвою характеристикою втрат електроенергії є їх потужність  $\Delta P$ . Отже, активну потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю  $\Delta P_{i3}$  можна обґрунтовано вважати мірою економічності функціонування ізоляції РМ і, відповідно, показником її роботоздатності при застосуванні даного критерію.

Потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю можна визначити, маючи інформацію про напруги і активні провідності фаз мережі відносно землі:

$$\Delta P_{i3\Sigma} = \Delta P_{i3A} + \Delta P_{i3B} + \Delta P_{i3C} = U_A^2 \cdot g_a + U_B^2 \cdot g_b + U_C^2 \cdot g_c \quad (1)$$

Отримане значення потужності втрат в ізоляції  $\Delta P_{i3\Sigma}$  порівнюють з нормативним  $\Delta P_{i3}^{норм}$ , яке можна розрахувати, маючи технічні дані про мережу, такі як тип (ПЛ чи КЛ) загальну довжину  $L$ , номінальну напругу та переважаючу марку кабелів, згідно методики, описаній в [3].

$$\Delta P_{i3\Sigma} \leq \Delta P_{i3}^{норм} \quad (2)$$

Таким чином, можна визначити понаднормативну потужність втрат в ізоляції і накладати на її величину обмеження формування умов роботоздатності.

Також, обмеження можна накладати для кожної фази окремо:

$$\Delta P_{i3A} \leq \Delta P_{i3}^{норм} / 3; \Delta P_{i3B} \leq \Delta P_{i3}^{норм} / 3; \Delta P_{i3C} \leq \Delta P_{i3}^{норм} / 3 \quad (3)$$

Згідно з методикою [3], виділяються декілька станів навколишнього середовища, для яких були проведені дослідження (ЛьвівОРГРЕС) і отримані дані для розрахунку нормативної потужності втрат в ізоляції.

Для отримання діагностичної моделі розглянемо випадок, коли виникає шунтувальний зв'язок між фазою розподільної мережі з ізолюваною нейтраллю (наприклад, фазою А) і заземленими частинами електроустановки.

Заступна схема мережі, зображена на рис.1, виконана для випадку, коли дотик людини відбувається до заземлених частин електроустановки.

На рис.1.  $r_A, r_B, r_C$  – активні опори ізоляції фаз РМ;  $C_A, C_B, C_C$  – ємності окремих фаз відносно землі,  $r_l, L1$  – параметри заступної схеми ТН контролю ізоляції;  $Z_n$  – еквівалентний повний опір навантаження (на характер протікання струмів ОЗЗ не впливає);  $r_l$  – опір тіла людини, рівний 6 кОм (згідно [2]);  $R_3$  – опір заземлюючого пристрою, (згідно [4] не повинен перевищувати 10 Ом для мереж 6-10 кВ);  $g_d$  – додатковий перехідний опір заземлення- 100 Ом.

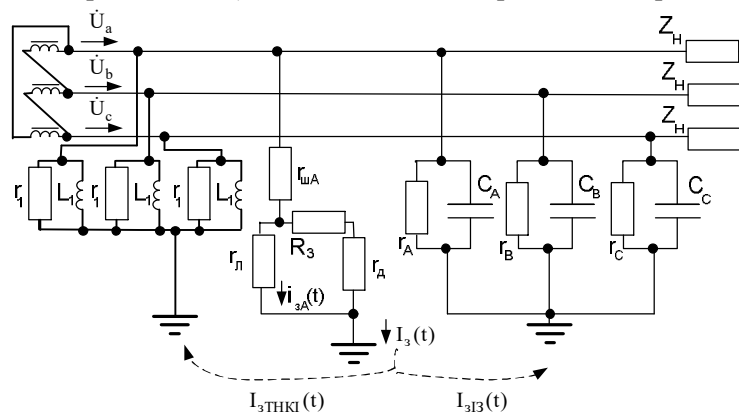


Рис.1. Заступна схема для опису процесу виникнення шунтувального зв'язку в РМ і дотику людини до заземлених елементів електроустановки

Розглянемо найбільш несприятливого випадку, коли пошкодження виникає одночасно в 2-ох різних фазах мережі, а дотик людини відбувається в місці найбільшого пошкодження. Внаслідок цього по тілу людини починає протікати струм  $i_{3A}(t)$ , який згідно вимог до електробезпеки не повинен перевищувати 6 мА. Вирази для граничних умов роботоздатності ізоляції для цієї моделі пошкодження матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
I_{3A} = \frac{g_{uA} \cdot g_l}{g_{uA} + g_l + g_s} \cdot \frac{1.5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \cdot \\
\cdot \sqrt{\left[ g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}; \\
I_{3B} = \frac{g_{uB} \cdot g_l}{g_{uB} + g_l + g_s} \cdot \frac{1.5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \cdot \\
\cdot \sqrt{\left[ g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_a - C_c) \right]^2 + \left[ \frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}; \\
I_{3C} = \frac{g_{uC} \cdot g_l}{g_{uC} + g_l + g_s} \cdot \frac{1.5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \cdot \\
\cdot \sqrt{\left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_b - C_a) \right]^2 + \left[ \frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_b) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}.
\end{array} \right. \quad (4)$$

де  $U_f$  – фазна напруга розподільної мережі;  $\omega$  – кутова частота РМ;  $C_a, C_b, C_c$  – ємності фаз мережі відносно землі;  $g_a, g_b, g_c$  – активні провідності фаз мережі відносно землі;  $B_L$  – сумарна реактивна провідність всіх індуктивних елементів, підключених до РМ відносно землі (обмоток трансформаторів напруги для контролю ізоляції типу ЗНОМ і НТМИ, а також дугогасильних реакторів ДГР і пристроїв для резонансного заземлення нейтралі):  $B_L = \frac{3}{\omega \cdot (L_{ТНКИ\Sigma} + L_{ДГР} + L_{ПРЗН})}$

. Тут слід зауважити, що індуктивності обмоток ТНКИ вважаються лінійними величинами (при розгляді ustalених режимів роботи мережі).

При застосуванні критерію економічності функціонування математична модель для визначення робоздатності ізоляції матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\Delta P_{3A} = \frac{2.25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2} \cdot \\
\cdot \left[ \left[ g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right]; \\
\Delta P_{3B} = \frac{2.25 \cdot U_f^2 \cdot g_b}{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2} \cdot \\
\cdot \left[ \left[ g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_a - C_c) \right]^2 + \left[ \frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right]; \\
\Delta P_{3C} = \frac{2.25 \cdot U_f^2 \cdot g_c}{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2} \cdot \\
\cdot \left[ \left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_b - C_a) \right]^2 + \left[ \frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_b) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right].
\end{array} \right. \quad (5)$$

Як бачимо, основну роль у відображенні процесу зміни технічного стану ізоляції РМ будуть відігравати активні провідності фаз мережі відносно землі  $g_a, g_b, g_c$ . Вони є єдиними величинами

у співвідношеннях (4) і (5), що змінюються в процесі розвитку пошкодження, тому їх надалі і будемо вважати діагностичними показниками для визначення роботоздатності ізоляції; З врахуванням вище наведеного, діагностичну модель для методу визначення роботоздатності ізоляції можна представити у вигляді чотириполюсника з вхідним сигналом – фазними напругами РМ. (див. Рис.2. а,б).

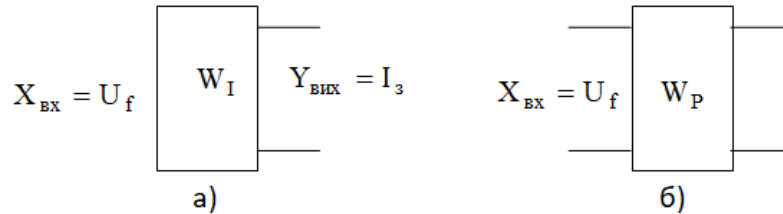


Рис. 2. Діагностична модель для визначення роботоздатності ізоляції

а) – при застосуванні критерію безпеки експлуатації; б) – при застосуванні критерію економічності функціонування; на схемі  $W_I$  – передатна функція при застосуванні в якості вихідного сигналу струму в шунтувальному зв'язку,  $W_P$  – передатна функція при застосуванні в якості вихідного сигналу потужності втрат електроенергії від струмів стікання на землю.

Визначимо комплекси передатних функцій при розгляді різних фаз мережі за формулою:

$$W_x(i\omega) = \frac{\dot{U}_x}{U_f}$$

Для спрощення розрахунків при подальших дослідженнях будемо розглядати лише мережі з ізолюваною нейтраллю, в яких відсутні індуктивні елементи, що мають зв'язок із землею, а тому  $BL=0$ .

Отже,

$$\begin{aligned} W_A(i\omega) &= \frac{\sqrt{3} \cdot \left[ (g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{i30^\circ} + (g_c + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-i30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}; \\ W_B(i\omega) &= \frac{\sqrt{3} \cdot \left[ (g_c + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{i30^\circ} + (g_a + i\omega \cdot C_a) \cdot e^{-i30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}; \\ W_C(i\omega) &= \frac{\sqrt{3} \cdot \left[ (g_a + i\omega \cdot C_a) \cdot e^{i30^\circ} + (g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{-i30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}. \end{aligned} \quad (6)$$

У співвідношеннях (6) вирази для комплексів напруг фаз мережі відносно землі були отримані шляхом використання формули для напруги зміщення нейтралі  $\dot{U}_0$  у комплексному вигляді і аналізу заступної схеми трифазної мережі з ізолюваною нейтраллю, зображеної на рис.1.

Висновки. Запропоновано принцип визначення роботоздатності ізоляції РМ відносно землі, який ґрунтується на використанні критеріїв електробезпеки і мінімуму втрат електроенергії в ізоляції від струмів стікання на землю.. Визначено умови роботоздатності ізоляції РМ відносно землі у вигляді обмежень на зміну показників роботоздатності ізоляції, узгоджених із нормативними документами і стандартами. Розроблено математичну модель для визначення роботоздатності ізоляції у вигляді залежностей її показників від параметрів ізоляції відносно землі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- ГОСТ 12.1038-82 Предельно допустимые урони напряжения и токов –Введ. 01.01.85.-М.: Из-во стандартов,1988.-6с.
- Кутін В.М. Система контролю працездатності ізоляції розподільної мережі напругою 6-10 кВ/В.М.Кутін,С.В. Матвієнко // Вісник Криворізького технічного університету зб.наук. праць.-Кривий Ріг, 2005.-С№7.-С.123-128.
- Структура балансу електроенергії в електричних мережах 0.38 -154 кВ: методика складання, аналізу складових та нормування технологічних витрат електроенергії/НЕК України –К.-2003.-71 с.
- Иванов Е.И. Замыкания на землю изаземления/Е.И. Иванов //Новости Электротехники.-2001.-№5(11),-С.73-75.

**Кутін Василь Михайлович** – доктор технічн. наук, професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: [vmkytin@gmail.com](mailto:vmkytin@gmail.com).

**Кутіна Марина Василівна** – канд. технічн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: [mkytina@gmail.com](mailto:mkytina@gmail.com).

**Хонич Вікторія Олександрівна** студентка групи ЕПА-22мз, кафедра компютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет.

**Vasyl Mykhailovych Kutin** - doctor of technical engineering. of Sciences, professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, e-mail: [vmkytin@gmail.com](mailto:vmkytin@gmail.com).

**Kutina Marina Vasylivna** – Candidate of Science, senior lecturer in Department of electrical power consumption and power management, e-mail: [mkytina@gmail.com](mailto:mkytina@gmail.com).

**Viktoriya Oleksandrivna Khonych** is a student of the EPA-22mz group, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University.