

## КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛІЮ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*В роботі проведено дослідження існуючих методів контролю ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В.*

*Запропоновано метод заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу на випробуваній фазі, струм в дроселі і потужність.*

**Ключові слова:** контроль ізоляції, ізолювана нейтраль, виявлення пошкодження

### *Abstract*

*In the work, a study of existing insulation control methods in power supply systems with an isolated neutral voltage up to 1000 V was conducted.*

*The proposed method is based on the principle of creating a certain asymmetric mode, involves alternate testing of the network phases, during which the voltage on the tested phase, the current in the choke and the power are measured.*

**Keywords:** insulation control, isolated neutral, damage detection

### Вступ

Актуальність проблеми. Підприємства гірничої промисловості з відкритою розробкою корисних копалин належать до сфери промислового виробництва, в якій питання безпеки стоять особливо суворо [1, 2]. Так, якщо в цілому по гірничометалургійній промисловості електротравматизм складає близько 15%, то на відкритих гірських розробках цієї галузі він досягає 47% від загального числа нещасних випадків. В умовах криворізького басейну із загального числа нещасних випадків, пов'язаних із застосуванням електричної енергії, 40% відбулося в підземних виробках, 46,7% на кар'єрах, 13,3% на поверхні шахт, дробильно-сортувальних і збагачувальних фабриках ГЗК.

Забезпечення електробезпеки на відкритих гірських розробках залежить від успішного вирішення комплексу питань, серед яких основними є контроль опору ізоляції та кола заземлення електрообладнання. В даний час розроблено і експлуатується ряд пристроїв контролю опору ізоляції. Однак застосування їх не завжди виявляється ефективним. До недоліків деяких методів визначення параметрів ізоляції слід також віднести використання режиму замикання фази на землю і великої кількості незбіжних у часі вимірювань.

Постановка задачі. Таким чином, незважаючи на певні успіхи, досягнуті в напрямку розробки методів вимірювання, існує необхідність їх подальшого вдосконалення.

Найбільш поширені методи [2-4] дозволяють визначити лише провідності ізоляції всієї мережі без врахування її асиметрії. До того ж ряд з них передбачають проведення дослідів однофазного замикання на землю, що підвищує небезпеку ураження людей електричним струмом, виникнення пожеж та вибухів рудничного газу і пилу. Для визначення асиметрії ізоляції необхідно знати провідності ізоляції окремих фаз мережі. Існуючими методами провідності окремих фаз обчислюються за результатами великої кількості незбіжних у часі вимірювань або по складних рівняннях, що призводить до великих погрешностей. Придатні вони лише для окремих випадків стану ізоляції, коли має місце асиметрія тільки активних або тільки реактивних провідностей. Остання обставина не дозволяє використовувати ці методи для визначення асиметрії ізоляції мереж, оскільки в реальних умовах невідомо, яка з провідностей, активна або реактивна, нерівномірно розподілена по фазах. Запропонований метод, що не має цих недоліків. Він дозволяє визначити провідність ізоляції всієї мережі і коефіцієнт асиметрії не тільки в окремому, але й у загальному випадку асиметрії ізоляції (нерівності активних і реактивних провідностей фаз). Цей метод заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу на випробуваній фазі, струм в дроселі і потужність.

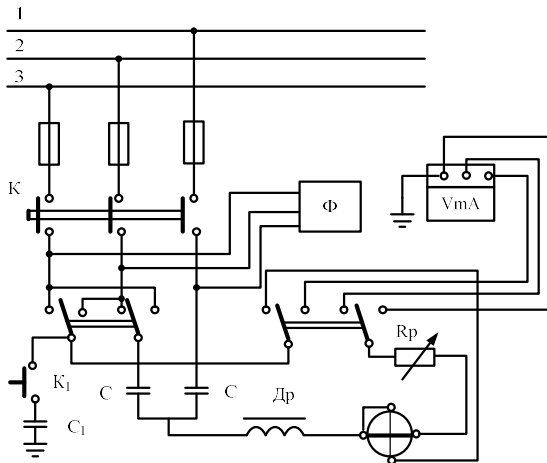


Рис.2. – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

На відміну від існуючих методів [4] у запропонованому використовується режим зміщення нейтральної точки на середину вектора лінійної напруги. Досягається це наступним чином. При випробуванні будь-якої фази, до лінійних затискачів двох інших приєднуються конденсатори однакової ємності  $C$ , між загальною точкою яких і землею підключений дросель  $Dr$  через міліамперметр і послідовний ланцюг ватметра. Паралельні ланцюги ватметра і вольтметра включені між випробуваною фазою і землею. Параметри дроселя і конденсаторів підібрані так, що реактивний опір дроселя дорівнює половині реактивного опору конденсатора, а активне незначне (порядку декількох Ом). Теоретичним обґрунтуванням методу служать наступні положення.

При випробуванні, наприклад, першої фази (рис. 3) напруга зміщення нейтралі визначається виразом

$$\dot{U}_N = U_\phi \frac{Y_1 + a^2(Y_2 + Y_D) + a(Y_3 + Y_D)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + 2Y_D}, \quad (1)$$

$$Y_D = \frac{1}{2j\omega L - \frac{1}{\omega C} + 2r_D}$$

де  $r_D$  – активний опір дроселя.

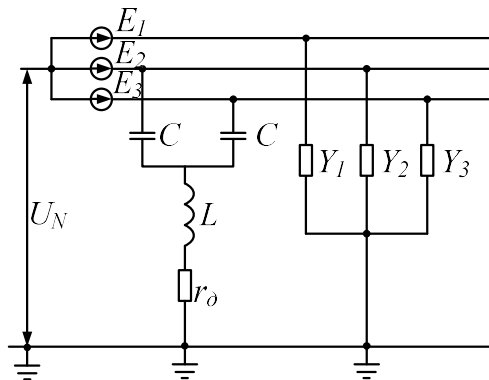


Рис. 3 – Схема заміщення методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

Напругу зміщення нейтралі можна представити у вигляді

$$\dot{U}_N = \frac{U_\phi}{2} \left( \frac{2\delta r_D - Z_0}{r_D + Z_0} \right), \quad (2)$$

де  $Z_0 = \frac{1}{Y_0}$  - комплекс опоры ізоляції мережі відносно землі.

При допустимому, з точки зору поставленої задачі, неврахуванні активного опоры дроселя в порівнянні з опором ізоляції мережі та враховуючи, що  $|\delta| < 1$ , з виразу отримаємо рівність:

$$U_N = -\frac{U_\phi}{2}.$$

Використовуючи цю рівність, можна визначити комплекси напруг фаз мережі відносно землі при випробуванні першої фази:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{U}_N = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{Л}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{U}_N = -\frac{j}{2} U_{Л}; \\ \dot{U}_3 &= \dot{E}_3 - \dot{U}_N = \frac{j}{2} U_{Л}. \end{aligned} \quad (3)$$

З цих рівнянь випливає, що незалежно від стану ізоляції, напруга випробувальної фази відносно землі зростає до  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  лінійного, а двох інших - знижуються до половини лінійного і знаходяться в протифазі. Такий же висновок можна отримати при випробуванні двох інших фаз, тобто режим зміщення нейтральної точки на середину вектора лінійної напруги досягається. Векторні діаграми напруг фаз мережі відносно землі при випробуванні різних фаз наведено на рис. 4.

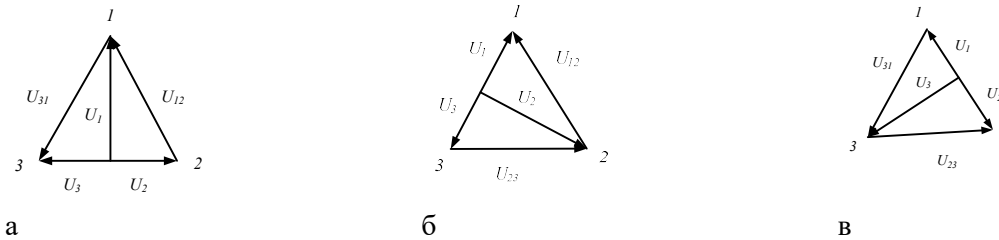


Рис. 4 – Векторні діаграми напруг при випробуванні різних фаз мережі: а) - перша, б) - друга, в) - третя.

Комплекс струму в дроселі при випробуванні будь фази визначиться рівністю

$$\dot{I}_K = \dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3. \quad (4)$$

Використовуючи векторні діаграми і рівняння струму, можна знайти зв'язок між комплексами вимірних провідностей  $Y_{I1}, Y_{I2}, Y_{I3}$  і комплексами провідностей фаз мережі:

$$\left. \begin{aligned} Y_{I1} &= \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} = Y_1 - \frac{j}{\sqrt{3}} (Y_2 - Y_3); \\ Y_{I2} &= \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} = Y_2 - \frac{j}{\sqrt{3}} (Y_3 - Y_1); \\ Y_{I3} &= \frac{\dot{I}_3}{\dot{U}_3} = Y_3 - \frac{j}{\sqrt{3}} (Y_1 - Y_2); \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

складові яких визначаються за результатами вимірювання напруги, струму і потужності:

$$g_{IK} = \frac{I_K}{U_K} \cos \varphi_{IK}; \quad (6)$$

$$b_{IK} = \frac{I_K}{U} \sin \varphi_{IK}; \quad (7)$$

$$\varphi_{IK} = \arccos \frac{P_K}{U_K I_K}, \quad (8)$$

де  $k = 1, 2, 3$ ;  $g_{ik}, b_{ik}$  - відповідно активна і реактивна виміряні провідності. Із системи рівняння (5) випливає, що при симетрії комплекс вимірної провідності дорівнює комплексу провідності ізоляції фази і значення його складових визначається рівняннями (6-8). Активна  $g_0$  і реактивна  $b_0$  провідності ізоляції всієї мережі в цьому випадку рівні:

$$g_0 = 3g_{ik}; \quad b_0 = 3b_{ik}.$$

У разі несиметрії провідностей ізоляції така рівність не має місця. Однак, використовуючи систему рівнянь (5) і рівняння (8), можна знайти зв'язок між комплексами вимірної провідності, провідністю ізоляції всієї мережі і коефіцієнтом асиметрії:

$$\left. \begin{aligned} Y_{I1} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2\delta); \\ Y_{I2} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2a\delta); \\ Y_{I3} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2a^2\delta); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Оскільки ці рівняння містять лише 2 невідомих  $Y_0$  і  $\delta$ , то для знаходження їх досить провести випробування двох будь-яких фаз. Незалежно від того які дві фази випробовуються

$$Y_0 = 3 \frac{Y_{IK-1} - aY_{IK}}{1 - a};$$

Розклавши отримане рівняння  $Y_0$  на дійсну і уявну частини, маємо:

$$g_0 = \sqrt{3}[y_{IK+1} \cos(\varphi_{IK+1} + 30^\circ) - y_{IK} \cos(150^\circ + \varphi_{IK})] \quad (10)$$

$$b_0 = \sqrt{3}[y_{IK+1} \sin(\varphi_{IK+1} + 30^\circ) - y_{IK} \sin(150^\circ + \varphi_{IK})];$$

$$y_{IK} = \frac{I_K}{U_{IK}}; y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}; \varphi_0 = \arctg \frac{b_0}{g_0}. \quad (11)$$

При відомому значенні  $y_0$  і  $\varphi_0$  модуль  $|\delta|$  і аргумент  $\varphi_\delta$  коефіцієнта асиметрії може бути визначений по одному з рівнянь системи (9)

$$|\delta| = \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2m_K \cos(\varphi_{IK} - \varphi_0) + m_K^2}; \quad (12)$$

$$\varphi_\delta = \arctg \frac{\sin(\varphi_{IK} - \varphi_0)}{\cos(\varphi_{IK} - \varphi_0) - \frac{1}{m_K}} + \psi_K; \quad (13)$$

$$\text{де } m_K = \frac{3y_{IK}}{y_0}.$$

У рівнянні (13) залежно від того, яка фаза випробовується,  $\psi_K$  приймає різні значення: 0 при  $k = 1$ ;  $-120^\circ$  при  $k = 2$ ;  $120^\circ$  при  $k = 3$ . Слід зазначити, що при визначенні  $Y_0$  і  $\delta$  необхідно знати послідовність фаз мережі.

Висновки. Метод заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу на випробовуваній фазі, струм в дроселі і потужність.

Точність визначення  $|\delta|$  і  $\varphi_\delta$  залежить від значень  $m$ ,  $\alpha$  і похибок їх обчислення. Погрішність модуля коефіцієнта асиметрії, при інших рівних умовах, зростає із збільшенням коефіцієнта  $m$ ;  $\Delta\varphi_\delta$  має максимальне значення при  $m \rightarrow 1$  і  $\alpha = 0$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобилянський, О. В. Охорона праці в галузі та цивільний захист: лабораторний практикум / О. В. Кобилянський, С. В. Дембійська. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 130 с.
2. Electrical Safety in Mining Operations High-Risk Environments and Safety Measures. *Energy* 5. 12 Nov. 2023.
3. Nick Schiltz . Why Mining is One of the Most Dangerous Industries for Electrical Safety. *Automation.com* August 31, 2022.
4. Хілов В. С. Основні вимоги до безперервного контролю опору ізоляції в мережі з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 в та тенденції розвитку даних систем // Форум гірників - 2014 : матеріали міжнар. конф., 1-4 жовтня 2014 р.- Дніпропетровськ, 2014. - Т. 3. - С. 232-241.

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

**Мовчан Назарій Сергійович** – студентка групи ЕМ-22м, кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет.

**Kutina Marina Vasylyvna** – Candidate of Science, senior lecturer in Department of electrical power consumption and power management, e-mail: mkytina@gmail.com.

**Nazarii Serhiyovych Movchan** is a student of the EM-22m group, Department of Electrical Engineering Systems of Power Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University.