

УДК 621.311

Г.И. Лагутин<sup>1</sup>, В.Н. Лысенко<sup>2</sup>, В.Д. Заболотный<sup>3</sup><sup>1</sup> Харьковський університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Сумської національний аграрний університет, Суми<sup>3</sup> Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА ВЕЛИЧИНУ УГЛА МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Рассматриваются результаты исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности. Для исследования процессов, происходящих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции, предлагается использовать математические и имитационные модели.

**Ключевые слова:** электрические сети, контроль изоляции, однофазное замыкание на землю, ранжирование.

### Введение

**Постановка проблемы.** Состояние изоляции трехфазных сетей с изолированной нейтралью принято оценивать, осуществляя непрерывные измерения величины тока нулевой последовательности. Однако, такая оценка в ряде случаев оказывается недостаточно точной в связи с тем, что токи нулевой последовательности появляются не только при несимметричных замыканиях в сетях, но и в случае, когда нагрузка по фазам распределена неравномерно. **Анализ последних исследований и публикаций.** В современных условиях для непрерывного контроля состояния изоляции широко используются следующие методы [1 – 7]: наложения переменного или постоянного оперативного тока; измерения токов или напряжений нулевой последовательности либо фазовых соотношений между ними; основанные на использовании выпрямленных токов контролируемой сети. Существующие методы периодического контроля сопротивления изоляции основаны на проведении испытаний повышенным напряжением [8], что приводит к перерыву в электроснабжении потребителей, понижению на время проведения испытаний надежности электроснабжения. Кроме этого, эти использование повышенных напряжений может вывести электрооборудование из строя.

**Целью статьи** является обоснование возможности использования величины сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности для контроля состояния изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью.

### Изложение основного материала

Для обоснования возможности использования величины сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности для контроля состояния изоляции электрической сети с различными ре-

жимами работы нейтрали целесообразно использовать математическую модель [9] в виде системы уравнений, составленных в соответствии с методом контурных токов для схемы замещения рассматриваемой электрической сети на рис. 1, где приняты такие обозначения:  $\dot{E}_A = U$  – напряжение фазы А;  $\dot{E}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$ ,  $\dot{E}_C = U \cdot e^{-j240^\circ}$  – напряжения фаз В и С;  $\underline{Z}_{ли} = R_{ли} + j \cdot \omega \cdot L_{ли}$ ,  $i = A, B, C$  – комплексное сопротивление фазных проводов линии электропередачи;  $R_{ли}$ ,  $L_{ли}$  – активное сопротивление и индуктивность фазных проводов линии электропередачи;  $\underline{Z}_{ни} = R_{ни} + j \cdot \omega \cdot L_{ни}$ ,  $i = A, B, C$  – комплексное сопротивление нагрузки фаз;  $R_{ни}$ ,  $L_{ни}$  – соответственно активное сопротивление и индуктивность нагрузки фаз;  $\underline{Z}_{ли}$ ,  $i = A, B, C$  – комплексное сопротивление изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера,  $1/\underline{Z}_{ли} = 1/R_{ли} + j \cdot \omega \cdot C_{ли}$ ;  $R_{ли}$ ,  $C_{ли}$ ,  $i = A, B, C$  – сопротивления утечки и емкость изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера;  $\underline{Z}_{2и}$ ,  $i = A, B, C$  – комплексное сопротивление изоляции фаз контролируемого фидера,  $1/\underline{Z}_{2и} = 1/R_{2и} + j \cdot \omega \cdot C_{2и}$ ;  $R_{2и}$ ,  $C_{2и}$ ,  $i = A, B, C$  – соответственно сопротивления утечки и емкость изоляции фаз контролируемого фидера;  $\underline{Z}_{Nг}$  – комплексное сопротивление нейтрали источника электроэнергии (генератора или трансформатора),  $1/\underline{Z}_{Nг} = 1/R_{Nг} + j \cdot \omega \cdot C_{Nг} - j \cdot 1/(\omega \cdot L_{Nг})$ ;  $R_{Nг}$ ,  $C_{Nг}$ ,  $L_{Nг}$  – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали источника электроэнергии;  $\underline{Z}_{Nн}$  – комплексное сопротивление нейтрали нагрузки,  $1/\underline{Z}_{Nн} = 1/R_{Nн} + j \cdot \omega \cdot C_{Nн} - j \cdot 1/(\omega \cdot L_{Nн})$ ;  $R_{Nн}$ ,  $C_{Nн}$ ,  $L_{Nн}$  – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали нагрузки.

Процесс решения задачи целесообразно разделить на несколько этапов, каждый из которых характеризует работу системы электрообеспечения в критических режимах работы: режиме замыкания на землю в контролируемой линии электропередачи и режиме несимметрии нагрузки.

Режим однофазного замыкания на землю характеризуется тем, что к сопротивлению изоляции поврежденной фазы в контролируемом фидере добавляется активное сопротивление  $R_3$ , подключенное параллельно сопротивлению изоляции. Его величина может изменяться в широких пределах – от 0 Ом при металлическом замыкании на землю до единиц килоом при заплывающем пробое или снижении изоляции по другим причинам. Все остальные сопротивления, а также питающие напряжения остаются неизменными и, в большинстве случаев, симметричными.

Поэтому решение системы уравнений для схемы замещения (рис. 1) для режима однофазного замыкания на землю будем искать при следующих допущениях:

$$\underline{Z}_{Nr} = R_{Nr} \left( -j \frac{1}{\omega C_{Nr}} \right) // \left( R_{Nr} - j \frac{1}{\omega C_{Nr}} \right) = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{lA} = \underline{Z}_{lB} = \underline{Z}_{lC} = \underline{Z}_l = \frac{R_l \left( -j \frac{1}{\omega C_l} \right)}{R_l - j \frac{1}{\omega C_l}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{лA} = \underline{Z}_{лB} = \underline{Z}_{лC} = \underline{Z}_л = R_л + j\omega L_л = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{2B} = \underline{Z}_{2C} = \underline{Z}_2 = \frac{R_2 \left( -j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_2 - j \frac{1}{\omega C_2}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_A = \frac{R_2 R_3 \left( -j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_2 R_3 + R_2 \left( -j \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_3 \left( -j \frac{1}{\omega C_2} \right)} = \text{var};$$

$$\underline{Z}_{нA} = \underline{Z}_{нB} = \underline{Z}_{нC} = \underline{Z}_н = R_н + j\omega L_н = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{Nh} = \frac{R_{Nh} \left( -j \frac{1}{\omega C_{Nh}} \right)}{R_{Nh} - j \frac{1}{\omega C_{Nh}}} = \text{const}.$$

При таких допущениях после соответствующих преобразований выражение, связывающее ток  $I_0$  и напряжение  $U_0$  нулевой последовательности при-

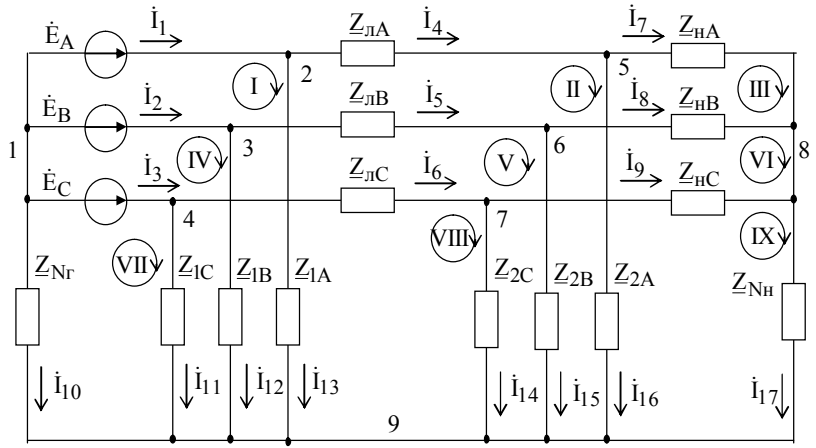


Рис. 1. Схема замещения рассматриваемой электрической сети

нимает вид:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \left[ \frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_l}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_l} + Z_l + 3R_3 \right] \dot{I}_0, \quad (1)$$

а выражение для определения угла между током  $I_0$  и напряжением  $U_0$  нулевой последовательности определяется соотношением:

$$\varphi_0 = \arctg \left( \frac{\Im \left( \frac{1}{3} \left[ \frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_l}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_l} + Z_l + 3R_3 \right] \right)}{\Re \left( \frac{1}{3} \left[ \frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_l}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_l} + Z_l + 3R_3 \right] \right)} \right). \quad (2)$$

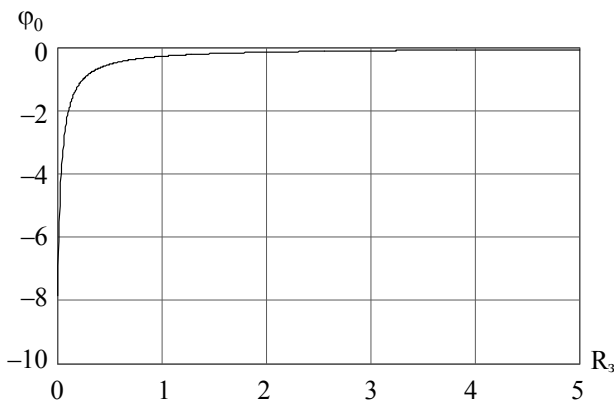
Придадим элементам эквивалентной схемы замещения (рис. 1) конкретные физические значения. Реальная система электроснабжения с разветвленной кабельной сетью, питающим генератором (трансформатором) мощностью  $S_r = 1000$  кВА и нагрузкой контролируемого фидера  $S_н = 100$  кВА с коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,8$  характеризуется следующими значениями:

- $R_l = 50$  кОм;  $C_l = 5$  мкФ;
- $R_{Nr} = 50$  кОм;  $C_{Nr} = 0,05$  мкФ;
- $R_r = 0,042$  Ом;  $L_r = 0,15$  мГн;
- $R_л = 0,1$  Ом;  $L_л = 0,1$  мГн;
- $R_2 = 500$  кОм;  $C_2 = 0,5$  мкФ;
- $R_н = 2,217$  Ом;  $L_н = 5,293$  мГн;
- $R_{Nh} = 50$  кОм;  $C_{Nh} = 0,05$  мкФ;
- $R_3 = 0 \dots 1000$  Ом.

Тогда выражение (2) для  $\varphi_0$  принимает вид:

$$\varphi_0 = \arg \left[ \begin{aligned} &(0.418 - j0.156) \times \\ &\times (j17.3 + 77.4 + 21.0R_3 + j78.3R_3) \end{aligned} \right]. \quad (3)$$

График зависимости  $\varphi_0$  от  $R_3$  приведен на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость  $\varphi_0$  от  $R_3$ 

При этом величина тока  $I_0$  нулевой последовательности изменяется в пределах от 0,039 мА при  $R_3=5$  кОм до 1,071 мА при  $R_3=1$  Ом, а величина напряжения  $U_0$  нулевой последовательности изменяется в пределах от 7,914 В при  $R_3=5$  кОм до 219,685 В при  $R_3=1$  Ом.

Из анализа формульных соотношений и графика зависимости  $\varphi_0$  от  $R_3$  (рис. 2) можно сделать вывод о том, что в случае повреждения изоляции в одной из фаз трехфазной сети с изолированной нейтралью ток нулевой последовательности отстает от напряжения нулевой последовательности.

### Выводы

1. Для обоснования возможности использования величины сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности при осуществлении контроля состояния изоляции электрической сети с различными режимами работы нейтрали целесообразно использовать математическую модель в виде системы уравнений, составленных в соответствии с методом контурных токов для схемы замещения рассматриваемой электрической сети.

2. Проведя формальный анализ соотношений принятой математической модели, можно сделать

вывод о том, что в случае повреждения изоляции в одной из фаз трехфазной сети с изолированной нейтралью ток нулевой последовательности отстает от напряжения нулевой последовательности.

### Список литературы

1. Правила безпечної експлуатації військових електроустановок, затверджені наказом МО України від 13.05.03 (зі змінами згідно наказу МО України від 12.11.10 №589). – К., 2011.
2. Основи електробезпеки та енергонагляду: підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, А.М. Панченко, О.В. Степанюк. – Х.: ХУПС, 2011. – 248 с.
3. Електробезпека: Навчально-методичний посібник для проведення лабораторних занять / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, А.О. Нечаус, О.О. Ручка. – Х.: ХУПС, 2011. – 144 с.
4. Ревякин А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках / А.И. Ревякин, Б.И. Кашолкин. – М.: Энергия, 1980. – 180 с.
5. Князевский Б.А. Охрана труда в электроустановках / Б.А. Князевский. – М.: Энергия, 1987. – 222 с.
6. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. анойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 188 с.
7. Разумный О.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт / О.Т. Разумный, Ф.П. Шкрабец. – К.: Техника, 1986. – 160 с.
8. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Мінпаливенерго України від 25.07.06 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості від 13.02.2012 № 91). – К., 2012.
9. Лагутин Г.И. Математическая модель для исследования влияния параметров электрической сети на величину угла между током и напряжением нулевой последовательности / Г.И. Лагутин, В.Н. Лысенко, В.Д. Заболотный // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2(43) . – С. 89-92

Поступила в редколлегию 20.04.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ НА ВЕЛИЧИНУ КУТА МІЖ СТРУМОМ І НАПРУГОЮ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

Г.І. Лагутін, В.М. Лисенко, В.Д. Заболотний

У статті розглядаються результати дослідження впливу параметрів однофазного замикання на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю на величину зсуву фаз між струмом і напругою нульової послідовності. Для дослідження процесів, що відбуваються в електричних мережах при зміні опору ізоляції, пропонується використовувати математичні й імітаційні моделі.

**Ключові слова:** електричні мережі, контроль ізоляції, однофазне замикання на землю, ранжирування.

### RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE SINGLE-PHASE EARTH FAULT PARAMETERS ON THE ANGLE BETWEEN ZERO-SEQUENCE CURRENT AND VOLTAGE

G.I. Lagutin, V.N. Lysenko, V.D. Zabolotniy

This article discusses the results of research of the influence of single-phase earth fault parameters in power distribution systems with the isolated neutral by phase shifting between zero-sequence current and voltage. For research of the processes occurring in electric networks at variation of resistance of isolation and size of a load, it is offered to use mathematical and simulation models.

**Keywords:** power distribution systems, the control of isolation, ground single-phase short circuit, ranging.