

УДК 621.311

Г.И. Лагутин<sup>1</sup>, В.Н. Лысенко<sup>2</sup>, В.Д. Заболотный<sup>3</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Сумской национальной аграрный университет, Сумы<sup>3</sup>Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗОК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВЕЛИЧИНУ УГЛА МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В статье рассматриваются результаты исследования влияния несимметрии нагрузок потребителей электроэнергии 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 величины нагрузки, предлагается использовать математические и имитационные модели.

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

### Введение

**Постановка проблемы.** Известно, что одним из условий надежного и безопасного функционирования электрических сетей с изолированной нейтралью является высокое сопротивление изоляции между токоведущими жилами и землей.

Состояние изоляции в таких сетях может контролироваться периодически (испытание изоляции повышенным напряжением или измерение сопротивления изоляции при помощи мегомметра) [1] или непрерывно (измерение сопротивления изоляции при помощи прибора постоянного контроля изоляции) [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Нормативные документы определяют следующие методы осуществления постоянного контроля изоляции: наложения переменного или постоянного оперативного тока; измерения токов или напряжений нулевой последовательности либо фазовых соотношений между ними; основанные на использовании выпрямленных токов контролируемой сети.

Однако, использование указанных методов непрерывного контроля не всегда дает точные результаты вследствие того, что токи нулевой последовательности появляются не только при несимметричных замыканиях в сетях, но и в случае, когда нагрузка по фазам распределена неравномерно. Следует особо отметить необходимость обеспечения непрерывного контроля изоляции, потому что как бы ни были проведены периодические эксплуатационные измерения сопротивления изоляции и ремонт сети, изоляция в течение периода времени между очередными эксплуатационными испытаниями может оказаться в аварийном состоянии.

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

$1/Z_{Nн} = 1/R_{Nн} + j \cdot \omega \cdot C_{Nн} - j/(\omega \cdot L_{Nн})$ ;  $R_{Nн}, C_{Nн}, L_{Nн}$  – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали нагрузки).

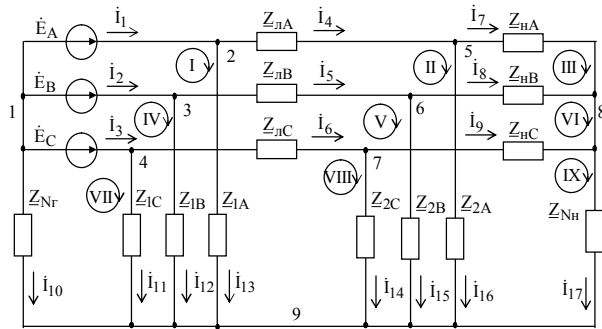


Рис. 1. Схема замещения рассматриваемой электрической сети

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

Рассмотрим решение задачи для режима несимметрии нагрузки. Токи  $I_0$  и напряжения  $U_0$  нулевой последовательности возникают в электрической сети, когда комплексное сопротивление нагрузки  $Z_{н}$  одной фазы отличается от комплексного сопротивления нагрузки других фаз. Поскольку комплексное сопротивление нагрузки, как правило,

имеет активно-индуктивный характер, необходимо рассмотреть два случая:

а) изменение активного сопротивления одной фазы при фиксированном индуктивном сопротивлении нагрузки этой фазы и неизменном сопротивлении нагрузки остальных фаз;

б) изменение индуктивного сопротивления одной фазы при фиксированном активном сопротивлении нагрузки этой фазы и неизменном сопротивлении нагрузки остальных фаз. Поэтому решение системы [2] для режима несимметрии нагрузки будем искать при следующих допущениях:

$$Z_{Nг} = R_{Nг} (-j/\omega C_{Nг}) / (R_{Nг} - j/\omega C_{Nг}) = \text{const};$$

$$Z_{1A} = Z_{1B} = Z_{1C} = Z_1 = \frac{R_1(-j/(\omega C_1))}{R_1 - j/(\omega C_1)} = \text{const};$$

$$Z_{лA} = Z_{лB} = Z_{лC} = Z_л = R_л + j\omega L_л = \text{const};$$

$$Z_{2A} = Z_{2B} = Z_{2C} = Z_2 = \frac{R_2(-j/(\omega C_2))}{R_2 - j/(\omega C_2)} = \text{const};$$

$$Z_{нB} = Z_{нC} = Z_н = R_н + j\omega L_н = \text{const};$$

$$Z_{нA} = R_{нA} + j\omega L_{нA} = \text{var};$$

$$Z_{Nн} = \frac{R_{Nн}(-j/(\omega C_{Nн}))}{R_{Nн} - j/(\omega C_{Nн})} = \text{const}.$$

При таких допущениях после соответствующих преобразований выражения: связывающее ток  $I_0$  и напряжения  $U_0$  нулевой последовательности и для определения угла между ними принимают вид:

$$U_0 = \left[ \frac{((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_{нA} + 3Z_{Nн}) \cdot ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_н + 3Z_{Nн})}{2 \cdot ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_{нA} + 3Z_{Nн}) + ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_н + 3Z_{Nн})} \right] I_0; \quad (1)$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{\Im \left( \frac{((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_{нA} + 3Z_{Nн}) \cdot ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_н + 3Z_{Nн})}{2 \cdot ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_{нA} + 3Z_{Nн}) + ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_н + 3Z_{Nн})} \right)}{\Re \left( \frac{((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_{нA} + 3Z_{Nн}) \cdot ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_н + 3Z_{Nн})}{2 \cdot ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_{нA} + 3Z_{Nн}) + ((Z_r + 3Z_{Nг})Z_1 / (Z_r + 3Z_{Nг} + Z_1) + Z_н + 3Z_{Nн})} \right)} \quad (2)$$

При несимметрии активной составляющей  $R_{нA}$  сопротивления нагрузки фазы А схема замещения (рис. 1) системы 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:  $R_1 = 50$  кОм,  $C_1 = 5$  мкФ,  $R_{Nг} = 50$  кОм,  $C_{Nг} = 0,05$  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,  $R_{нA} = 0 \dots 1000$  Ом,  $L_{нA} = 5,293$  мГн,  $R_{Nн} = 50$  кОм,  $C_{Nн} = 0,05$  мкФ. Тогда

$$\varphi_0 = \arg \left[ \frac{(1.159 + j0.846) \times \left( \frac{j37.0 - 22.8 + 21.0R_3 + j14.7R_{нA}}{j71.8 - 10.8 + 21.0R_3 + j14.7R_{нA}} \right)}{\left( \frac{j37.0 - 22.8 + 21.0R_3 + j14.7R_{нA}}{j71.8 - 10.8 + 21.0R_3 + j14.7R_{нA}} \right)} \right]. \quad (3)$$

При этом величина тока  $I_0$  нулевой последовательности изменяется в пределах от 0,001 мА при  $R_{нA} = 6$  Ом до 0,0051 А при  $R_{нA} = 1$  МОм, а величина напряжения  $U_0$  нулевой последовательности изменяется в пределах от 0,378 В при  $R_{нA} = 6$  Ом до 3,144 В при  $R_{нA} = 1$  МОм.

При несимметрии индуктивной составляющей  $L_{нA}$  сопротивления нагрузки фазы А схема замещения (рис. 1) системы 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:  $R_1 = 50$  кОм,  $C_1 = 5$  мкФ,  $R_{Nг} = 50$  кОм,  $C_{Nг} = 0,05$  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,  $R_H = 2,217$  Ом,  $L_H = 5,293$  мГн,  $R_{HA} = 2,217$  Ом,  $L_{HA} = 0 \dots 100$  мГн,  $R_{NH} = 50$  кОм,  $C_{NH} = 0,05$  мкФ. Тогда из выражения (2):

$$\varphi_0 = \arg \left[ \frac{(1.159 + j0.846) \times \left( \frac{j17.3 - 21.4 + j32.9L_{HA} - 23.1L_{HA}}{j32.7 - 30.1 + j32.9L_{HA} - 23.1L_{HA}} \right)}{\left( \frac{j17.3 - 21.4 + j32.9L_{HA} - 23.1L_{HA}}{j32.7 - 30.1 + j32.9L_{HA} - 23.1L_{HA}} \right)} \right] \quad (4)$$

График зависимости  $\varphi_0$  от  $L_{HA}$  приведен на рис. 2. При этом величина тока  $I_0$  нулевой последовательности изменяется в пределах от 0,001 мА при  $L_{HA} = 8$  мГн до 0,005 мА при  $L_{HA} = 10000$  мГн, а величина напряжения  $U_0$  нулевой последовательности изменяется в пределах от 0,623 В при  $L_{HA} = 8$  мГн до 3,135 В при  $L_{HA} = 10000$  мГн.

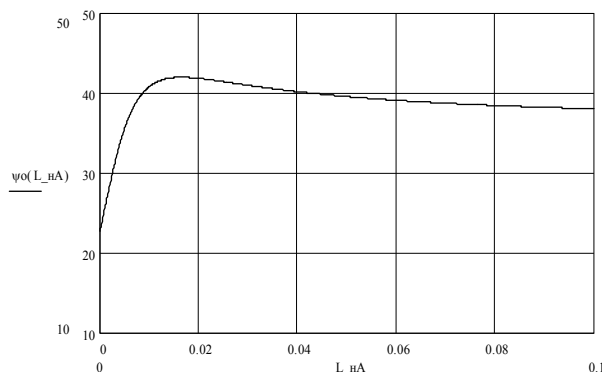


Рис. 2. График зависимости  $\varphi_0$  от  $L_{HA}$

Таким образом, на основании анализа соотношений (1 – 4) и графика (рис. 2) можно сделать вывод о том, что информация об угле между током  $I_0$  и напряжением  $U_0$  нулевой последовательности совместно с данными об их величине может являться диагностическим параметром, позволяющим судить о состоянии изоляции контролируемого участка электрической сети.

## Выводы

1. Для обоснования возможности использования величины сдвига фаз между током и напряже-

нием 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. Анализ соотношений принятой математической модели дает возможность сделать вывод о том, что при несимметричной нагрузке в одной из фаз трехфазной сети с изолированной нейтралью ток нулевой последовательности опережает напряжение нулевой последовательности. Ранее [2] было показано, что при однофазном замыкании на землю ток нулевой последовательности отстает от напряжения нулевой последовательности.

3. Таким образом, измеренная величина фазового угла между напряжением и током нулевой последовательности может быть использована в качестве отличительного признака, с помощью которого возможно различить режим несимметрии, вызванный несимметричностью нагрузки, от режима несимметрии, вызванного замыканием на землю при повреждениях изоляции электрической сети.

## Список литературы

1. 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.
2. 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 6.05.2015

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕНЬ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВЕЛИЧИНУ КУТА МІЖ СТРУМОМ І НАПРУГОЮ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

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

У статті розглядаються результати дослідження впливу несиметрії навантажень споживачів електричної енергії 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 опорів ізоляції, пропонується використовувати математичні й імітаційні моделі.

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

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE POWER LOAD ASYMMETRY 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 power load asymmetry 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.