

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 Черняхівського, Київ

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ВЕЛИЧИНУ УГЛА МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

*В статье рассматривается математическая модель для исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью и несимметрии нагрузок потребителей на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности. Для исследования процессов, происходящих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции и величины нагрузки, предлагается использовать математические и имитационные модели.*

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

### Введение

**Постановка проблемы.** Для обеспечения бесперебойного и качественного электроснабжения и безопасной эксплуатации низковольтных линий электропередачи прежде всего необходима информация о состоянии их изоляции.

Правильное представление о состоянии изоляции низковольтных линий электропередачи может быть получено в том случае, если оно измерено в нормальных эксплуатационных условиях, т.е. при рабочем напряжении и при включенных токоприемниках.

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.

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.** Установившиеся методы контроля сопротивления изоляции базируются на проведении периодических плановых испытаний повышенным напряжением [8]. Эти методы в условиях обеспечения бесперебойности и надежности электроснабжения ответственных потребителей не всегда являются приемлемыми, поскольку они ведут к перерыву в электроснабжении потребителей, созданию на время

производства испытаний временных схем электроснабжения, часто имеющих пониженную надежность.

Кроме этого, эти методы увеличивают возможность дополнительных разрушений изоляции, приводящих оборудование в негодность.

В настоящее время распространение получили следующие методы контроля состояния изоляции [1 – 7]:

1. Методы, основанные на использовании наложения оперативного тока на контролируруемую сеть:

- а) метод наложения переменного оперативного тока;
- б) метод наложения постоянного оперативного тока.

2. Методы, основанные на измерении симметричных составляющих контролируемой сети:

- а) методы измерения токов или напряжений нулевой последовательности;
- б) метод измерения фазовых соотношений тока нулевой последовательности и фазного напряжения;
- в) метод измерения фазовых соотношений тока и напряжения нулевой последовательности.

3. Методы, основанные на использовании выпрямленных токов контролируемой сети.

Существующие методы не удовлетворяют требованиям по обеспечению точности и достоверного контроля изоляции низковольтных фидеров по следующим причинам:

- значительная погрешность измерения;
- большое количество ложных срабатываний;
- значительное влияние емкости сети на результаты контроля;
- снижение общего сопротивления контролируемой сети при подключении устройств контроля.

**Целью статьи** является разработка математической модели для исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с различными режимами работы нейтрали, а также несимметрии нагрузок потребителей на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности.

### Изложение основного материала

Для анализа процессов, происходящих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции и величины нагрузки, как правило, используются математические, имитационные и эвристиче-

ские модели. При этом для исследования влияния несимметрии нагрузок и параметров сопротивления однофазного замыкания на землю на величину угла между током и напряжением нулевой последовательности предлагается использовать математическую модель системы электроснабжения. Для проверки адекватности разработанной математической модели целесообразно использование имитационных моделей.

Для построения математической модели вначале составим схему замещения трехфазной электрической сети с различными режимами работы нейтрали (рис. 1).

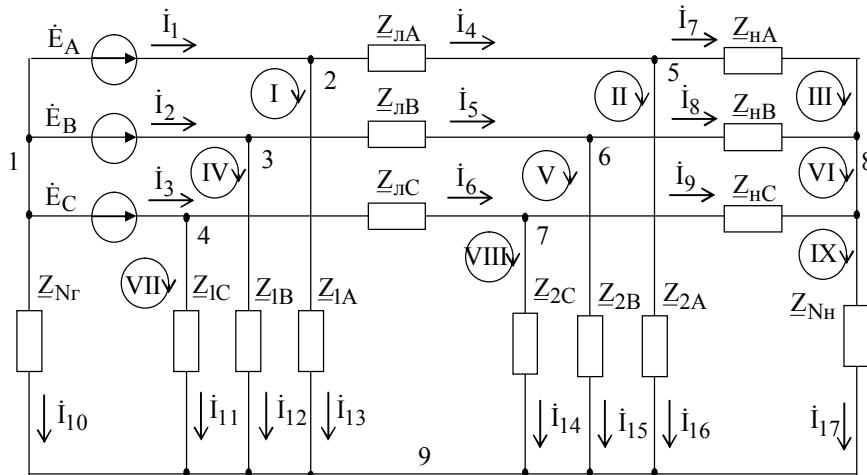


Рис. 1. Схема замещения трехфазной электрической сети

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$\dot{E}_A = U$  – напряжение фазы A;

$\dot{E}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$  – напряжение фазы B;

$\dot{E}_C = U \cdot e^{-j240^\circ}$  – напряжение фазы C;

$Z_{ли} = R_{ли} + j \cdot \omega \cdot L_{ли}$ ,  $i = A, B, C$  – комплексное сопротивление фазных проводов линии электропередачи;

$R_{ли}, L_{ли}$  – соответственно активное сопротивление и индуктивность фазных проводов линии электропередачи;

$Z_{ни} = R_{ни} + j \cdot \omega \cdot L_{ни}$ ,  $i = A, B, C$  – комплексное сопротивление нагрузки фаз;

$R_{ни}, L_{ни}$  – соответственно активное сопротивление и индуктивность нагрузки фаз;

$Z_{ли}, i = A, B, C$  – комплексное сопротивление изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера,

$$\frac{1}{Z_{ли}} = \frac{1}{R_{ли}} + j \cdot \omega \cdot C_{ли};$$

$R_{ли}, C_{ли}, i = A, B, C$  – соответственно сопротивление утечки и емкость изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера;

$Z_{2i}, i = A, B, C$  – комплексное сопротивление изоляции фаз контролируемого фидера,

$$\frac{1}{Z_{2i}} = \frac{1}{R_{2i}} + j \cdot \omega \cdot C_{2i};$$

$R_{2i}, C_{2i}, i = A, B, C$  – соответственно сопротивление утечки и емкость изоляции фаз контролируемого фидера;

$Z_{НГ}$  – комплексное сопротивление нейтрали источника электроэнергии (генератора или трансформатора),  $\frac{1}{Z_{НГ}} = \frac{1}{R_{НГ}} + j \cdot \omega \cdot C_{НГ} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L_{НГ}}$ ;

$R_{НГ}, C_{НГ}, L_{НГ}$  – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали источника электроэнергии;

$Z_{НН}$  – комплексное сопротивление нейтрали нагрузки,  $\frac{1}{Z_{НН}} = \frac{1}{R_{НН}} + j \cdot \omega \cdot C_{НН} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L_{НН}}$ ;

$R_{НН}, C_{НН}, L_{НН}$  – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали нагрузки.

Будем полагать, что средства для измерения тока  $I_0$  и напряжения  $U_0$  нулевой последовательности (трансформатор тока нулевой последовательности)

ности и асимметр) установлены в начале контролируемого фидера (узлы 2, 3, 4 на рис. 1). Тогда выражение для тока  $I_0$  нулевой последовательности будет иметь вид:

$$I_0 = \frac{I_4 + I_5 + I_6}{3}, \quad (1)$$

а выражение для напряжения  $U_0$  нулевой последовательности будет иметь вид:

$$U_0 = \frac{I_{11} \cdot Z_{1C} + I_{12} \cdot Z_{1B} + I_{13} \cdot Z_{1A}}{3}. \quad (2)$$

Таким образом, для определения тока  $I_0$  и напряжения  $U_0$  нулевой последовательности необходимо предварительно определить токи в ветвях электрической схемы (рис. 1).

Задача отыскания токов в ветвях электрической схемы может быть решена различными методами: методом уравнений Кирхгофа, методом контурных токов, методом узловых потенциалов, методом эквивалентного генератора и т.п.

Анализ исходных данных позволяет сделать вывод о том, что для данной топологии схемы (17 ветвей, 9 узлов, 9 независимых контуров, 6 искомым токам) рациональнее использовать метод контурных токов.

Запишем систему уравнений для решения задачи в соответствии с методом контурных токов. Количество уравнений в системе будет равно количеству независимых контуров, а именно 9. Номера контуров, а также направление их обхода указано на рис. 1:

$$\begin{aligned} z_{11}I_1 + z_{12}I_2 + z_{13}I_3 + z_{14}I_4 + z_{15}I_5 + z_{16}I_6 + \\ + z_{17}I_{VII} + z_{18}I_{VIII} + z_{19}I_{IX} = \dot{E}_A; \\ z_{21}I_1 + z_{22}I_2 + z_{23}I_3 + z_{24}I_4 + z_{25}I_5 + z_{26}I_6 + \\ + z_{27}I_{VII} + z_{28}I_{VIII} + z_{29}I_{IX} = 0; \\ \dots \\ z_{91}I_1 + z_{92}I_2 + z_{93}I_3 + z_{94}I_4 + z_{95}I_5 + z_{96}I_6 + \\ + z_{97}I_{VII} + z_{98}I_{VIII} + z_{99}I_{IX} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} Z_{11} = Z_{1A} + Z_{NГ}; Z_{22} = Z_{1A} + Z_{лA} + Z_{2A}; \\ Z_{33} = Z_{2A} + Z_{нA} + Z_{NH}; \\ Z_{44} = Z_{1B} + Z_{NГ}; Z_{55} = Z_{1B} + Z_{лB} + Z_{2B}; \\ Z_{66} = Z_{2B} + Z_{нB} + Z_{NH}; \\ Z_{77} = Z_{1C} + Z_{NГ}; Z_{88} = Z_{1C} + Z_{лC} + Z_{2C}; \\ Z_{99} = Z_{2C} + Z_{нC} + Z_{NH} - \text{собственные контурные} \\ \text{сопротивления}; \\ Z_{12} = Z_{21} = -Z_{1A}; Z_{23} = Z_{32} = -Z_{2A}; \\ Z_{45} = Z_{54} = -Z_{1B}; Z_{56} = Z_{65} = -Z_{2B}; \\ Z_{78} = Z_{87} = -Z_{1C}; Z_{89} = Z_{98} = -Z_{2C}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Z_{14} = Z_{41} = Z_{17} = Z_{71} = Z_{47} = Z_{74} = Z_{NГ}; \\ Z_{36} = Z_{63} = Z_{39} = Z_{93} = Z_{69} = Z_{96} = Z_{NH}; \\ Z_{13} = Z_{31} = Z_{15} = Z_{51} = Z_{16} = Z_{61} = \\ = Z_{18} = Z_{81} = Z_{19} = Z_{91} = 0; \\ Z_{24} = Z_{42} = Z_{25} = Z_{52} = Z_{26} = Z_{62} = \\ = Z_{27} = Z_{72} = Z_{28} = Z_{82} = Z_{29} = Z_{92} = 0; \\ Z_{34} = Z_{43} = Z_{35} = Z_{53} = Z_{37} = \\ = Z_{73} = Z_{38} = Z_{83} = 0; \\ Z_{46} = Z_{64} = Z_{48} = Z_{84} = Z_{49} = Z_{94} = 0; \\ Z_{57} = Z_{75} = Z_{58} = Z_{85} = Z_{59} = Z_{95} = 0; \\ Z_{67} = Z_{76} = Z_{68} = Z_{86} = Z_{79} = Z_{97} = 0 \quad - \text{ком-} \\ \text{плексные взаимные сопротивления между контурами}; \\ I_i, i = I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX - \text{контурные токи} \\ \text{в независимых контурах}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда искомые токи определяются из выражений:

$$\begin{aligned} I_4 = I_{II}; I_5 = I_V; I_6 = I_{VIII}; I_{11} = I_{VII} - I_{VIII}; \\ I_{12} = I_{IV} - I_V; I_{13} = I_I - I_{II}. \end{aligned} \quad (6)$$

Система (3) с учетом (4) и (5) принимает вид:

$$\begin{aligned} (Z_{1A} + Z_{NГ})I_I - Z_{1A}I_{II} + \\ + Z_{NГ}I_{IV} + Z_{NГ}I_{VII} = \dot{E}_A; \\ -Z_{1A}I_I + (Z_{1A} + Z_{лA} + Z_{2A})I_{II} - Z_{2A}I_{III} = 0; \\ -Z_{2A}I_{II} + (Z_{2A} + Z_{нA} + Z_{NH})I_{III} + \\ + Z_{NH}I_{VI} + Z_{NH}I_{IX} = 0; \\ Z_{NГ}I_I + (Z_{1B} + Z_{NГ})I_{IV} - \\ -Z_{1B}I_V + Z_{NГ}I_{VII} = \dot{E}_B; \\ -Z_{1B}I_{IV} + (Z_{1B} + Z_{лB} + Z_{2B})I_V - \\ -Z_{2B}I_{VI} = 0; \\ Z_{NH}I_{III} - Z_{2B}I_V + (Z_{2B} + Z_{нB} + Z_{NH})I_{VI} + \\ + Z_{NH}I_{IX} = 0; \\ Z_{NГ}I_I + Z_{NГ}I_{IV} + (Z_{1C} + Z_{NГ})I_{VII} - \\ -Z_{1C}I_{IX} = \dot{E}_C; \\ -Z_{1C}I_{VII} + (Z_{1C} + Z_{лC} + Z_{2C})I_{VIII} - Z_{2C}I_{IX} = 0; \\ Z_{NH}I_{III} + Z_{NH}I_{VI} - Z_{2C}I_{VIII} + \\ + (Z_{2C} + Z_{нC} + Z_{NH})I_{IX} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7) может быть решена различными способами. С точки зрения возможности применения для решения системы (7) средств вычислительной техники представляется целесообразным использование метода Гаусса решения системы линейных уравнений.

При этом расширенная матрица коэффициентов при неизвестных имеет следующий вид:

