



## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В РАДИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Д.К. Кугучева, студентка гр. 19-ЭЭ/м,  
e-mail: [kuguchevad@yandex.ru](mailto:kuguchevad@yandex.ru)  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В работе выполнен анализ влияния ряда факторов на распределение токов нулевой последовательности в электросети радиального построения при возникновении однофазных замыканий на землю. Исследование проведено в программной среде Multisim, в которой разработана эквивалентная модель трехфазной электрической сети с однофазным повреждением изоляции.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание, ток нулевой последовательности, поиск замыкания, изолированная нейтраль, радиальная электросеть

### ВВЕДЕНИЕ

Электрические сети с изолированной нейтралью в настоящее время нашли достаточно широкое применение. Изолированная нейтраль используется как в низковольтных электросетях, например, на объектах морской техники, металлургических предприятиях, лабораториях, так и в электросетях средних классов напряжения, например, в распределительных электросетях, электросетях генераторного напряжения электростанций. Как правило, такие электрические сети имеют радиальное построение. Одним из наиболее частых видов повреждений в таких электросетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), число которых в распределительных сетях достигает 80 % от общего числа повреждений [1]. Вне зависимости от характера ОЗЗ их длительное существование сопровождается увеличением в установившемся режиме напряжения неповрежденных фаз в  $\sqrt{3}$  раз, усиливая тем самым воздействие на изоляцию электрооборудования. При этом в месте замыкания протекает ток, величина которого может быть достаточной для возникновения пожаров или получения электротравм [2]. Указанные опасности усугубляются тем, что ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью могут существовать достаточно длительное время, которое, как правило, не ограничивается нормативными документами. При этом величина токов недостаточна для срабатывания защиты, используемой обычно в подобных электроустановках [3].

Статистика отказов кабельных линий среднего напряжения показывает, что на 100 км линии происходит до шести отключений потребителей в год, четыре из которых приходится на однофазные замыкания [4]. Величина ущерба от ОЗЗ напрямую зависит от времени, затраченного на определение места повреждения и его ликвидации. Поэтому для повышения уровня надежности распределительных сетей весьма важно совершенствование технических мероприятий по поиску таких повреждений. Определение мест повреждения часто осуществляется при помощи централизованных защит, основанных на сравнении токов нулевой последовательности в присоединениях электросети.

В нормальном режиме, без замыкания, во всех фазах линии проходят емкостные токи (рис. 1, а), система которых является симметричной и ток нулевой последовательности (НП), а также напряжение нулевой последовательности отсутствуют (формулы (1) и (2)) [5]. Век-

торная диаграмма токов и напряжений в нормальном режиме работы системы показана на рис.1, а. Напряжение нейтрали равно нулю  $\vec{U}_N = 0$ .

$$\vec{I}_0 = (\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C) / 3 = 0 \quad (1)$$

$$\vec{U}_0 = (\vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C) / 3 = 0 \quad (2)$$

где  $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$  – емкостные токи фаз А, В и С соответственно;  
 $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$  – напряжения фаз А, В и С соответственно.

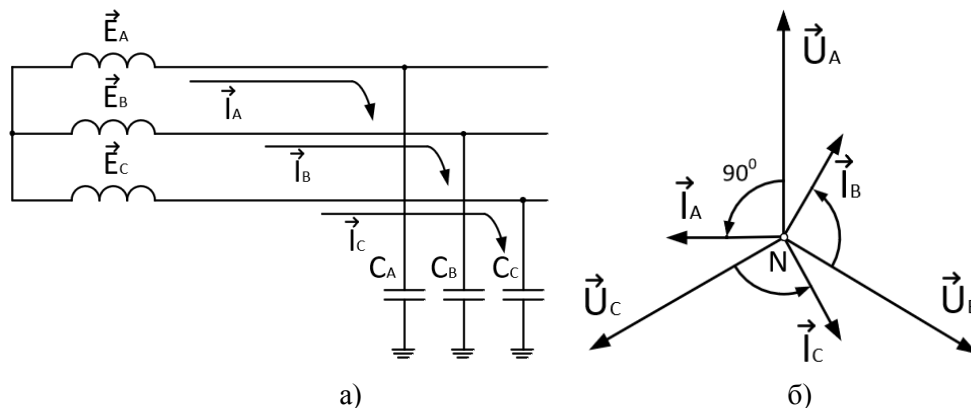


Рисунок 1 – Схема сети (а) и векторная диаграмма (б) в нормальном режиме работы

При повреждении линии, например при замыкании фазы А, как это показано на рис. 2, а, напряжение заземленной фазы равно нулю. При этом напряжение нейтрали становится равным напряжению данной фазы, а напряжения неповрежденных фаз, согласно выражениям (3), (4) [5], возрастают до линейных значений:

$$\vec{U}_B^{(1)} = \vec{U}_B + \vec{U}_N^{(1)} = \vec{U}_{BA}, \quad (3)$$

$$\vec{U}_C^{(1)} = \vec{U}_C + \vec{U}_N^{(1)} = \vec{U}_{CA}, \quad (4)$$

где  $\vec{U}_N^{(1)}$  – напряжение смещения нейтрали при однофазном замыкании.

Напряжение нулевой последовательности, согласно векторной диаграмме токов и напряжений (рис. 2, б), равно:

$$\vec{U}_0^{(1)} = (\vec{U}_A^{(1)} + \vec{U}_B^{(1)} + \vec{U}_C^{(1)}) / 3 = -\vec{E}_A = \vec{U}_N^{(1)} \quad (5)$$

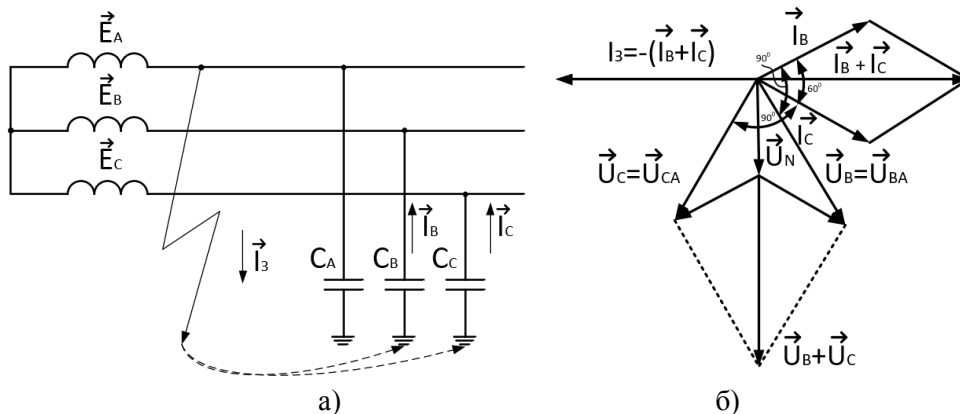


Рисунок 2 – Схема сети (а) и векторная диаграмма (б) при замыкании фазы А на землю

Емкостные токи неповрежденных фаз замыкаются через точку повреждения и поврежденную фазу, образуя в месте замыкания ток замыкания  $\vec{I}_3$ . Одновременно с этим в системе формируется ток НП  $\vec{I}_0^{(1)}$ . Величины этих токов могут быть определены по приведенному ниже выражению:

$$\begin{aligned}\vec{I}_3^{(1)} = 3\vec{I}_0^{(1)} &= -(j \cdot \omega \cdot C \cdot \vec{U}_B^{(1)} + j \cdot \omega \cdot C \cdot \vec{U}_C^{(1)}) = -j \cdot \omega \cdot C (\vec{U}_B^{(1)} + \vec{U}_C^{(1)}) = \\ &= j \cdot \omega \cdot C \cdot 3E_A = 3 \cdot \vec{I}_A,\end{aligned}\quad (6)$$

где  $C$  – фазная емкость неповрежденных фаз;  
 $\omega$  – угловая частота.

При этом в электросетях, имеющих несколько присоединений, формирование токов НП более сложное. Их значения могут изменяться в зависимости от количества присоединений, характера и места замыкания. Все это сказывается на функционировании защиты. Изучение влияния указанных факторов на токи НП имеют теоретическое значение для оценки возможностей применения этого вида защиты в различных условиях. Исследования подобного рода целесообразно проводить при помощи компьютерного моделирования. В работе впервые предлагается модель электросети в программной среде NIMultisim, позволяющая определять величины токов НП, а также проводить оценку влияния на них разветвленности электросети, места нахождения ОЗЗ, переходного сопротивления в месте замыкания. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности последующего использования полученного программного комплекса для выбора типа защиты и определения уставок ее срабатывания применительно к действующим или проектируемым электросетям.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются электрические сети радиального построения с изолированной нейтралью в режиме устойчивого однофазного замыкания на землю.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является оценка возможности определения зоны возникновения однофазного замыкания на землю посредством измерения токов нулевой последовательности с использованием построенной в программном комплексе Multisim имитационной модели электрической сети с двумя, тремя и четырьмя фидерами. Исследования позволят определить возможности применения защит нулевой последовательности при различных условиях построения радиальной сети.

Для достижения представленной цели выполнена оценка возможности реагирования устройств токовой ненаправленной защиты в сетях с различным количеством фидеров; исследовано влияние удаленности места повреждения на величины тока нулевой последовательности; проанализировано влияние сопротивления в месте замыкания на величины тока нулевой последовательности.

Решение выше перечисленных задач позволило оценить области возможного применения защит нулевой последовательности в распределительных сетях с изолированной нейтралью.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели использовались методы имитационного и математического моделирования электрических цепей, а также специальные теоретические методы для расчета параметров энергетической системы.

Для моделирования была использована программная среда Multisim [6], ориентированная большей частью на моделирование электронных устройств. Возможности этой программной среды позволили создать упрощенную модель электрической сети, достаточно точно учитывающую реальные характеристики линий электропередачи и источников напряжения. На рис. 3 представлена схема модели распределительной сети, питающая сеть в которой представлена источником трехфазной синусоидальной ЭДС прямой последовательности. В модели использована П-образная схема замещения линии, что упростило варьирование места замыкания на ней. Параметры изоляции задаются индуктивным, активным сопротивлением и емкостями, продольные сопротивления не учитываются. При всех ОЗЗ на поврежденном и неповрежденном фидерах регистрировались действующие значения токов НП. Для их измерения использованы фильтры токов нулевой последовательности (ФТНП), состоящие из трех трансформаторов тока. Параметры модели трансформаторов тока подобраны такими, чтобы подключенные к их вторичным обмоткам измерительные приборы показывали значения токов НП. Напряжение электросети выбрано равным 380 В, что соответствует большинству судовых электростанций (на рис. 3 указано фазное амплитудное значение ЭДС эквивалентного источника электроэнергии).

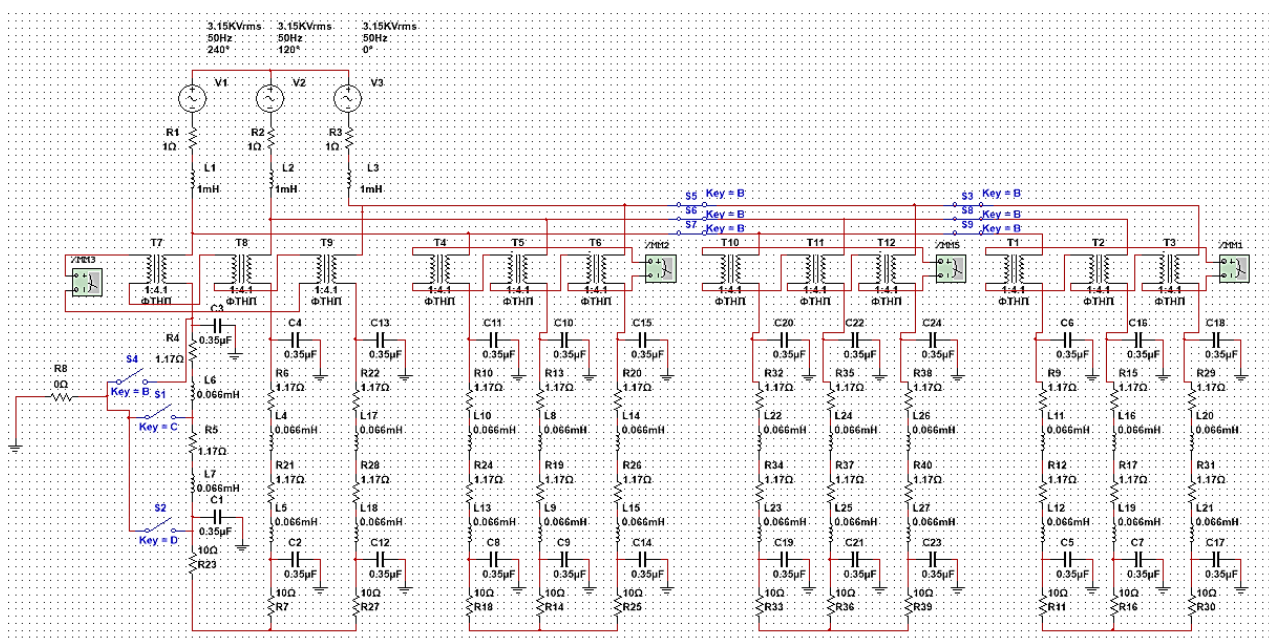


Рисунок 3 – Модель трехфазной сети

Замыкания фазы на землю имитировались в начале, середине и конце линии. При этом сопротивление замыкания варьировалось в достаточно широком диапазоне значений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования в электросетях с двумя и тремя присоединениями представлены в табл. 1.

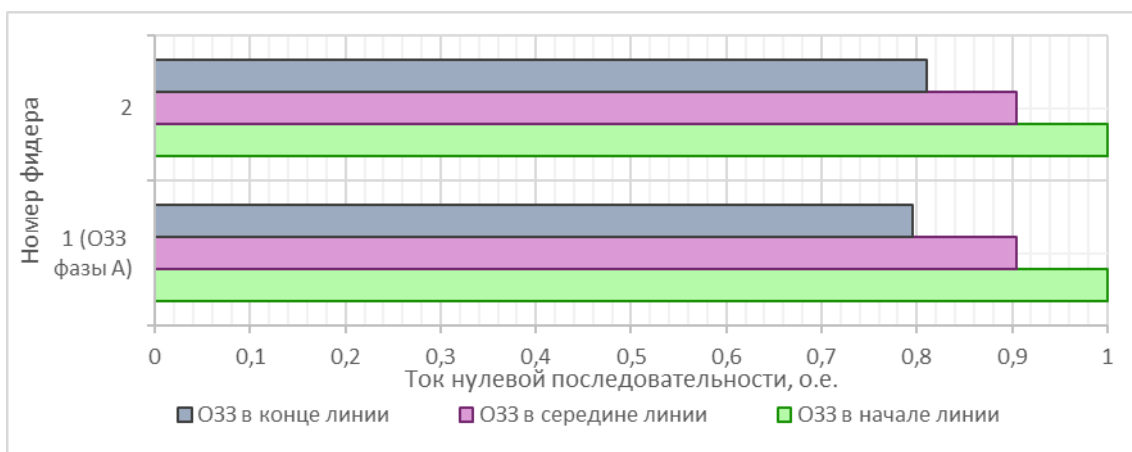
Согласно проведенным исследованиям в трехфазной сети с различным количеством присоединений выявление аварийного присоединения возможно при наличии в сети свыше трех фидеров. Это условие определяет возможность идентификации поврежденного фидера по разнице между токами НП в поврежденном и неповрежденных присоединениях. Как видно из рис. 4, при двух одинаковых присоединениях к центру питания их токи НП будут равны друг другу. При увеличении количества присоединений ток НП поврежденного участка сети в два раза превосходит токи НП в остальных частях электросети.

Кроме того, следует отметить, что при удалении точки ОЗЗ соотношения между токами НП практически не изменяются. Однако при этом их действующие значения уменьшаются.

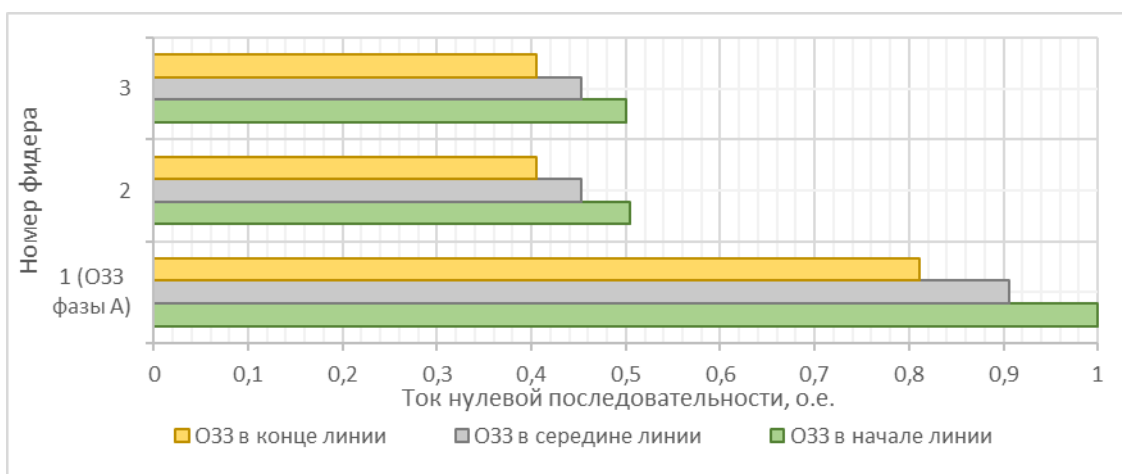
ся почти на 10 % при удалении ОЗЗ в середину линии и почти на 20 % при удалении ОЗЗ в конец линии.

Таблица 1 –Результаты измерения токов нулевой последовательности при ОЗЗ в электрической системе с двумя и тремя фидерами

Показатели	Номер фидера	Ток нулевой последовательности, А	
		2 фидера	3 фидера
ОЗЗ в начале линии	1 (ОЗЗ фазы А)	2,354	4,393
	2	2,354	2,213
	3		2,197
ОЗЗ в середине линии	1 (ОЗЗ фазы А)	2,130	3,979
	2	2,130	1,990
	3		1,990
ОЗЗ в конце линии	1 (ОЗЗ фазы А)	1,872	3,563
	2	1,908	1,781
	3		1,781



а)



б)

Рисунок 4 – Сравнение токов НП в фидерах электросети при различном количестве присоединений: а) электросеть с двумя присоединениями; б) электросеть с тремя присоединениями.

При наличии в месте замыкания переходного сопротивления происходит снижение токов НП как на поврежденных, так и на неповрежденных присоединениях. В табл. 2 приведены результаты исследования влияния величины переходного сопротивления на распреде-

ление токов НП в электросети с четырьмя фидерами. Сопротивление в месте ОЗЗ моделировалось активным сопротивлением, величина которого изменялась в достаточно широком диапазоне, включающем и значения сопротивления заземляющей дуги и искры [7].

Как видно из табл. 2, при увеличении переходного сопротивления в месте ОЗЗ от нуля до 1000 Ом ток НП поврежденного присоединения уменьшается почти в 10 раз.

Ниже, на рис. 5, построены зависимости токов НП от сопротивления в месте замыкания. По ним можно проследить, что при росте переходного сопротивления не наблюдается резко выраженного снижения разницы между значениями токов НП при различных местах повреждения. В случае металлического ОЗЗ ток НП поврежденного присоединения снижается до 80,89 % при удалении места замыкания от начала к концу линии. При  $R_{пер} = 2000$  Ом ток снижается до 81,12 %, а при  $R_{пер} = 4000$  Ом – 81,05 %.

Таблица 2 – Результаты измерения токов нулевой последовательности при ОЗЗ через переходное сопротивление в электрической системе с четырьмя фидерами

Показатели	Номер фидера	Переходное сопротивление, Ом				
		0	1000	2000	3000	4000
		Ток нулевой последовательности, А				
ОЗЗ в начале линии	1 (ОЗЗ фазы А)	6,196	2,165	1,141	0,769	0,580
	2	2,065	0,722	0,380	0,257	0,193
	3	2,065	0,721	0,380	0,256	0,193
	4	2,065	0,722	0,380	0,257	0,193
ОЗЗ в середине линии	1 (ОЗЗ фазы А)	5,598	1,961	1,032	0,692	0,525
	2	1,866	0,654	0,344	0,231	0,175
	3	1,866	0,653	0,344	0,231	0,175
	4	1,866	0,654	0,344	0,231	0,175
ОЗЗ в конце линии	1 (ОЗЗ фазы А)	5,012	1,754	0,925	0,623	0,470
	2	1,670	0,585	0,309	0,208	0,157
	3	1,670	0,584	0,308	0,208	0,157
	4	1,670	0,585	0,309	0,208	0,157

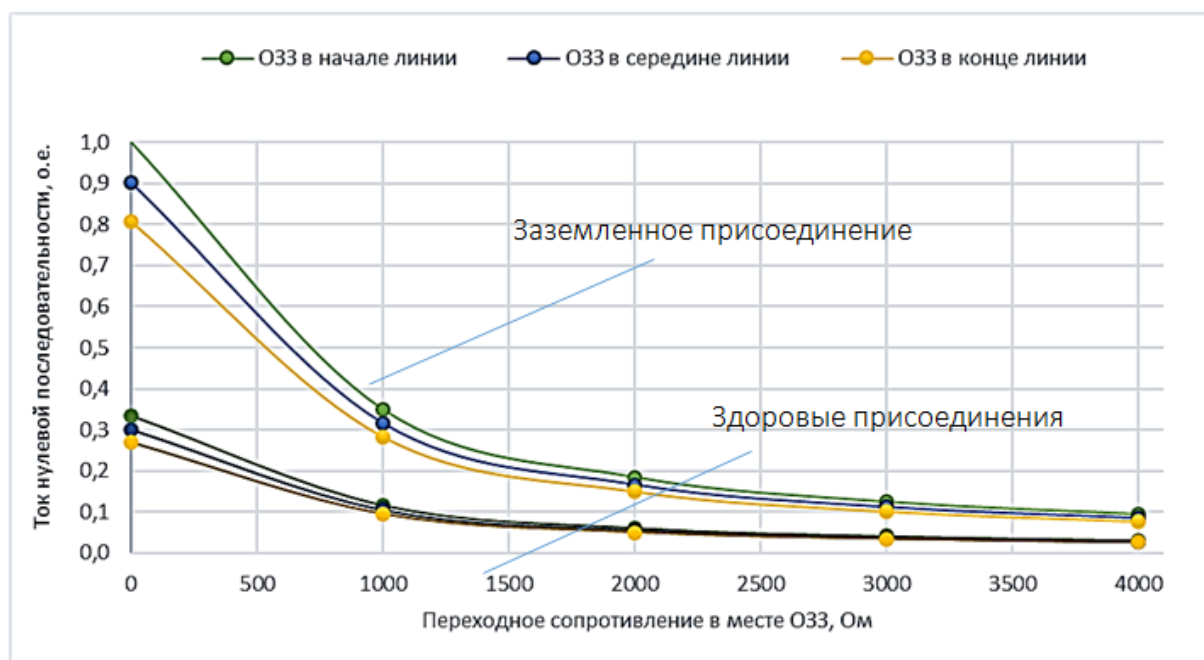


Рисунок 5 – Значения токов нулевой последовательности при различных значениях сопротивления в месте замыкания фазы на землю

Полученные результаты исследований показывают возможность определения точного места повреждения с ненулевым переходным сопротивлением.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что определение фидера с ОЗЗ в разветвленных сетях возможно на основе анализа регистрируемых в присоединениях токов НП. При этом функционирование защит, основанных на сопоставлении действующих значений токов нулевой последовательности, возможно при количестве присоединений не менее трех. Кроме того, результаты моделирования показали, что удаленность места замыкания от центра питания не влияет на соотношение между токами НП в присоединениях электросети, лишь снижая их действующие значения. Такое же влияние на распределение токов НП между участками электросети оказывает и переходное сопротивление в месте ОЗЗ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуин, В.А. Защита от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / А. В. Гусенков, В.А. Шуин. – Москва: НТФ Энергопрогресс, 2001. – № 11. – 104 с.
2. Кажекин, И.Е. Определение требований к защите судовых электроэнергетических систем от однофазных замыканий / И.Е. Кажекин // Электрика. – Москва, 2011. – С. 35–39.
3. Благинин, В.А. Результаты длительных натурных испытаний устройства защитного заземления нейтрали для судовых электросистем / В.А. Благинин [и др.] // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2015. – № 1. – С. 124–129.
4. Беляков, Н.Н. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях / Н.Н. Беляков // Электрические станции. – 1952. – № 6. – С.40–43.
5. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семёнов. – Москва: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
6. Программное обеспечение Multisim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html> (дата обращения: 02.05.2020).
7. Кажекин, И.Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью / И.Е. Кажекин // Морские интеллектуальные технологии. – 2019.– Т. 4, № 4 (46). – С. 83–87.

### RESEARCH OF ZERO-SEQUENCE CURRENTS IN CASE OF SINGLE-PHASE SHORT CIRCUITS IN A RADIAL NETWORK WITH ISOLATED NEUTRAL

D.K. Kugucheva, student,  
e-mail: [kuguchevad@yandex.ru](mailto:kuguchevad@yandex.ru)  
Kaliningrad State Technical University

The article describes the influence of various factors on the distribution of zero-sequence currents in a radial-type electrical network in the event of a single-phase short circuit. The study was conducted in the Multisim software environment, in which an equivalent model of a three-phase electric network with single-phase insulation damage was developed.

**Key words:** *single-phase short circuit, zero-sequence current, fault location, isolated neutral, radial network*