



## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕНАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

М.Ю. Травеников, студент гр. 19-ЭЭ/м,  
e-mail: travenikovmaxim@gmail.com  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический  
университет»

И.Е. Кажекин, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: kazhekin@mail.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический  
университет»

В статье рассмотрены основные виды защит от однофазных замыканий на землю. Проведена оценка возможности применения ненаправленной защиты от однофазных замыканий в сетях 15 кВ Калининградской области с помощью моделирования участка сети в программном комплексе Multisim. Благодаря использованию этой программы на основе простой модели можно осуществить дальнейшее более крупное проектирование защиты.

*Ключевые слова:* защита, замыкание на землю, отключения, Калининградская область, реклоузер

### ВВЕДЕНИЕ

Замыкание на землю токоведущих частей электрических установок является преобладающим видом повреждений в сетях всех напряжений [1]. В распределительных сетях 6-35 кВ эти повреждения составляют более 75% от общего числа повреждений. В сетях среднего напряжения России, работающих, как правило, с изолированной или компенсированной нейтралью, значение токов однофазных замыканий на землю невелики, они не превышают 20-30 А. Длительное существование однофазных замыканий в любых электроустановках приводит к ряду негативных последствий, обусловленных не только протеканием тока в месте замыкания [2], но и перенапряжениями, действующими на изоляцию всей системы [3]. В большинстве случаев однофазные замыкания в электросетях напряжением 6-35 кВ не требуют мгновенного отключения, и защита работает на сигнал о возникновении этого вида повреждения. Однако при появлении однофазного замыкания в сети генераторного напряжения его существование допускается не более двух часов при токе замыкания до 5 А, а при большем токе – требуется немедленное отключение блока генератор-трансформатор [4].

Последствия вовремя не устранённых однофазных замыканий могут проявляться в виде выхода из строя дорогостоящего оборудования, перерастания их в более сложные виды замыкания с последующим аварийным отключением участков электросети, возникновения взрыво- и пожароопасных ситуаций, опасности смертельного электротравматизма. Хотя лишь в немногих случаях необходимо быстрое автоматическое отключение однофазных замыканий, а в большинстве ситуаций оперативному персоналу дается время на его обнаружение и устранение, важно рассмотреть возможность автоматизации поиска места повреждения.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является участок сети 15 кВ воздушная линия электропередачи (ВЛ) Правдинского района Калининградской области, представленный на рис. 1.

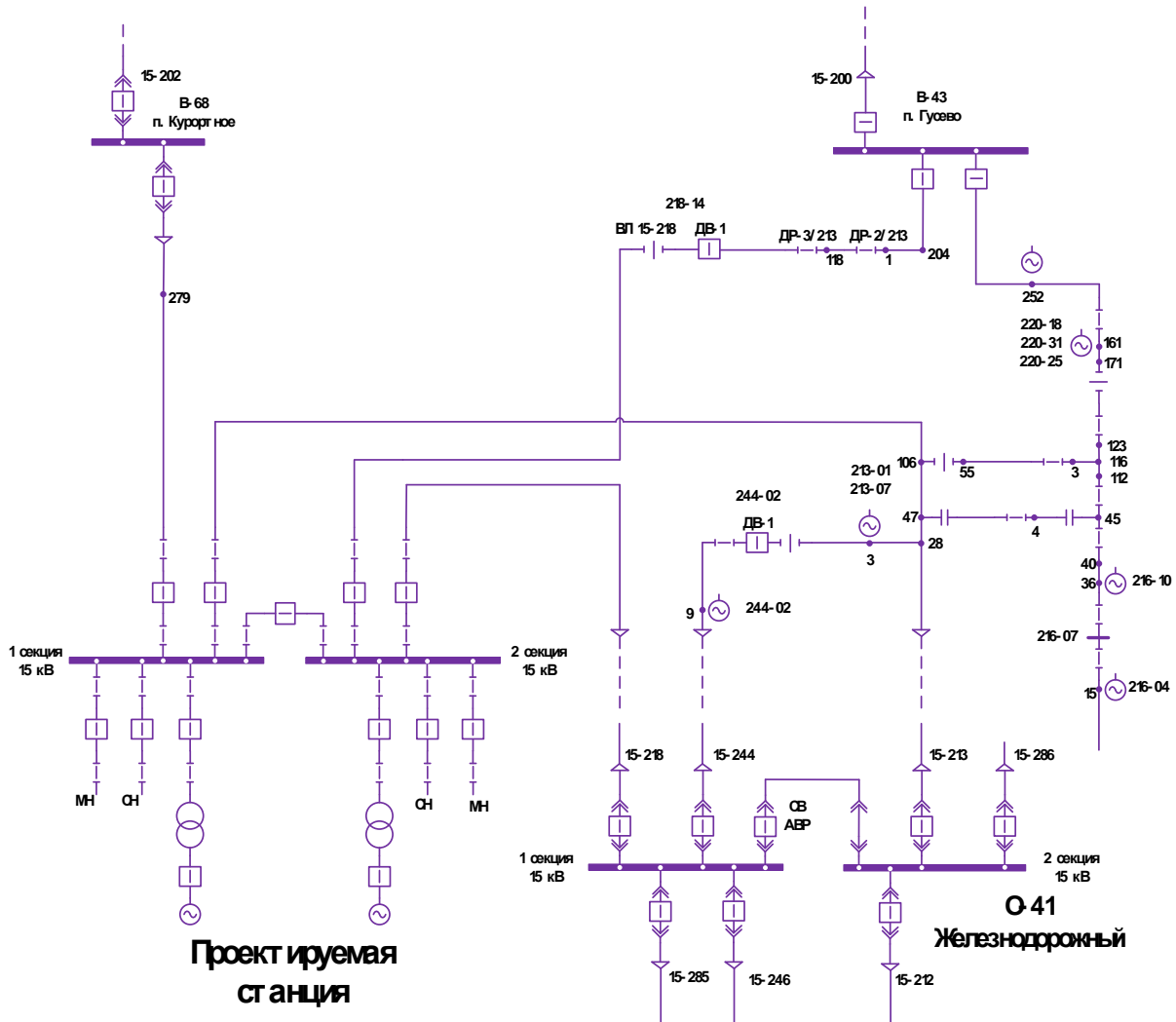


Рисунок 1 – Участок сети 15 кВ Правдинского района вблизи проектируемой станции

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является анализ существующих защит от однофазных замыканий на землю и выбора наиболее предпочтительного варианта для его применения в сетях Калининградской области.

Основные преимущества и недостатки защит, которые реализуются или могут быть реализованы без существенных затрат на их установку, сведены в табл. 1 [4-5].

Таблица 1 – Основные преимущества и недостатки рассмотренных защит

Вид защиты	Преимущества	Недостатки
Неселективное устройство общей сигнализации (рис. 2, а)	Простота реализации	Неселективность, чувствительность, используется только для сигнализации
Ненаправленная защита нулевой последовательности (рис. 2, б)	Селективность	Необходима точная отстройка от ёмкостных токов линий, неработоспособность при малом числе фидеров
Направленная защита нулевой последовательности (рис. 2, в)	Селективность, надежность	Сложность монтажа и настройки параметров защиты

Схемы защит приведены на рис. 2.

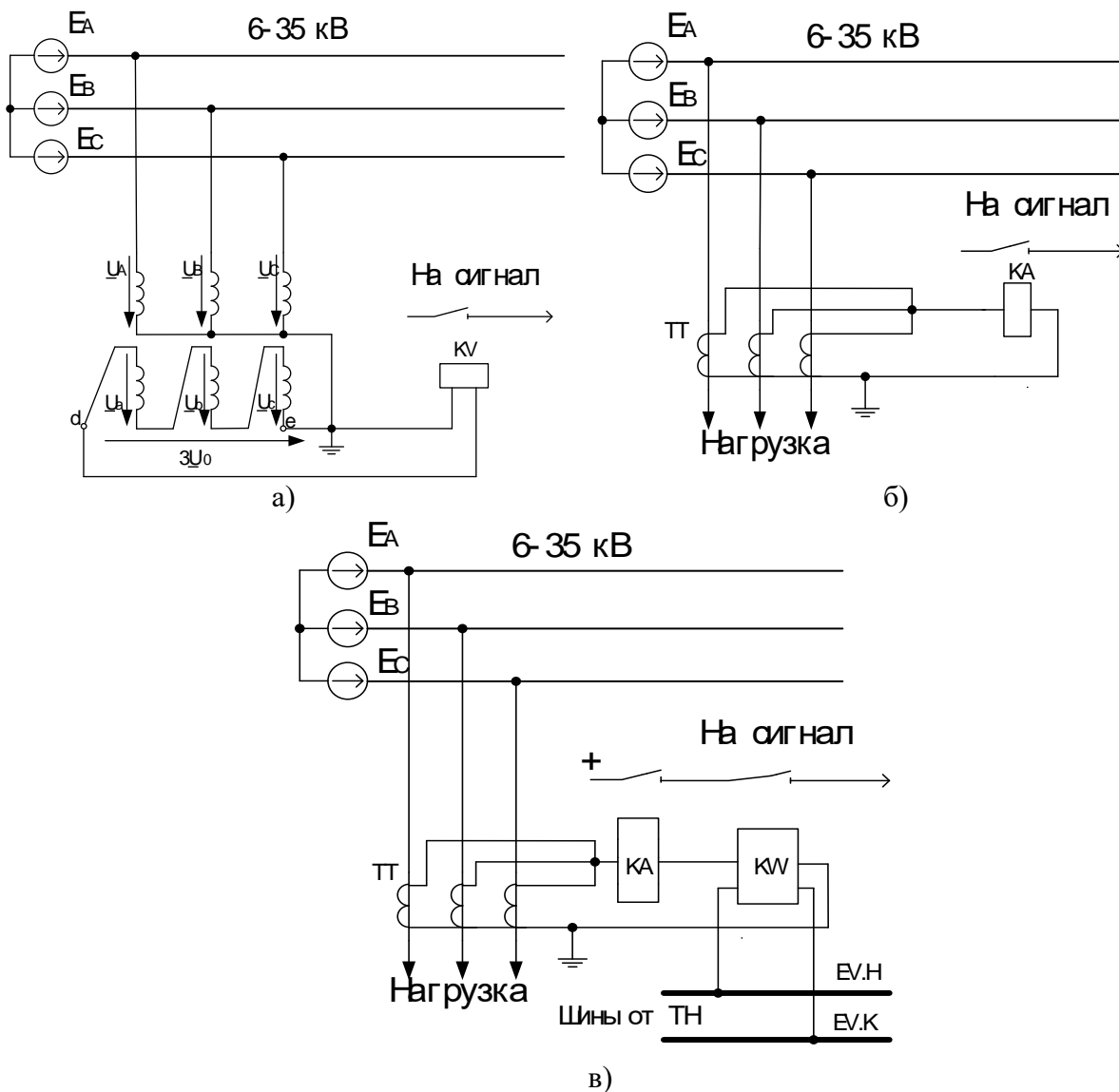


Рисунок 2 –Схема реализации защит:

- а) неселективная сигнализация; б) ненаправленная защита нулевой последовательности;  
в) направленная защита нулевой последовательности

Как следует из табл. 1, наиболее подходящей для рассматриваемой электросети можно признать направленную и ненаправленную токовые защиты. При этом последняя является более простой в реализации. Задача исследования заключается в разработке корректно работающей модели сети для защиты от однофазных замыканий на землю в ПК Multisim, позволяющей оценить возможность использования выбранной защиты в сложнзамкнутой распределительной сети с несколькими центрами питания.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки достоверности модели было проведено расчеты токов нулевой последовательности в относительно простой схеме. Определение токов проводилось двумя методами: аналитическим на основе проведенных выражений (1)–(6) [6], исходные данные к расчету  $C_1 = C_2 = C_3 = C'_1 = C'_2 = C'_3 = 3 \text{ мкФ}$  и  $U_\phi = 8,66 \text{ кВ}$ :

$$I_{01} = U_\phi j\omega(C'_1 + C'_2 + C'_3), \quad (1)$$

$$I_{02} = -U_{\phi}j\omega(C_1 + C_2), \quad (2)$$

$$I_{03} = -U_{\phi}j\omega C_3, \quad (3)$$

$$I_{02} = U_{\phi}j\omega(C'_1 + C'_2 + C'_3 + C_1), \quad (4)$$

$$I_{03} = -U_{\phi}j\omega C_3, \quad (5)$$

$$I_{03} = U_{\phi}j\omega(C_1 + C_2 + C'_1 + C'_2 + C'_3) \quad (6)$$

При замыкании на втором участке ток нулевой последовательности на первом участке не изменится. Токи нулевой последовательности на втором и третьем участках вычисляются по формулам (4), (5). При замыкании на третьем участке токи нулевой последовательности на первом и втором участках не изменятся по сравнению с токами в предыдущем случае. Ток нулевой последовательности на третьем участке рассчитывается по формуле (6).

По результатам моделирования в программной среде Multisim. Расчетная схема электросети представлена на рис. 3. Исследуемая сеть состоит из двух присоединений, каждое из которых условно разделено на три участка 1-3.

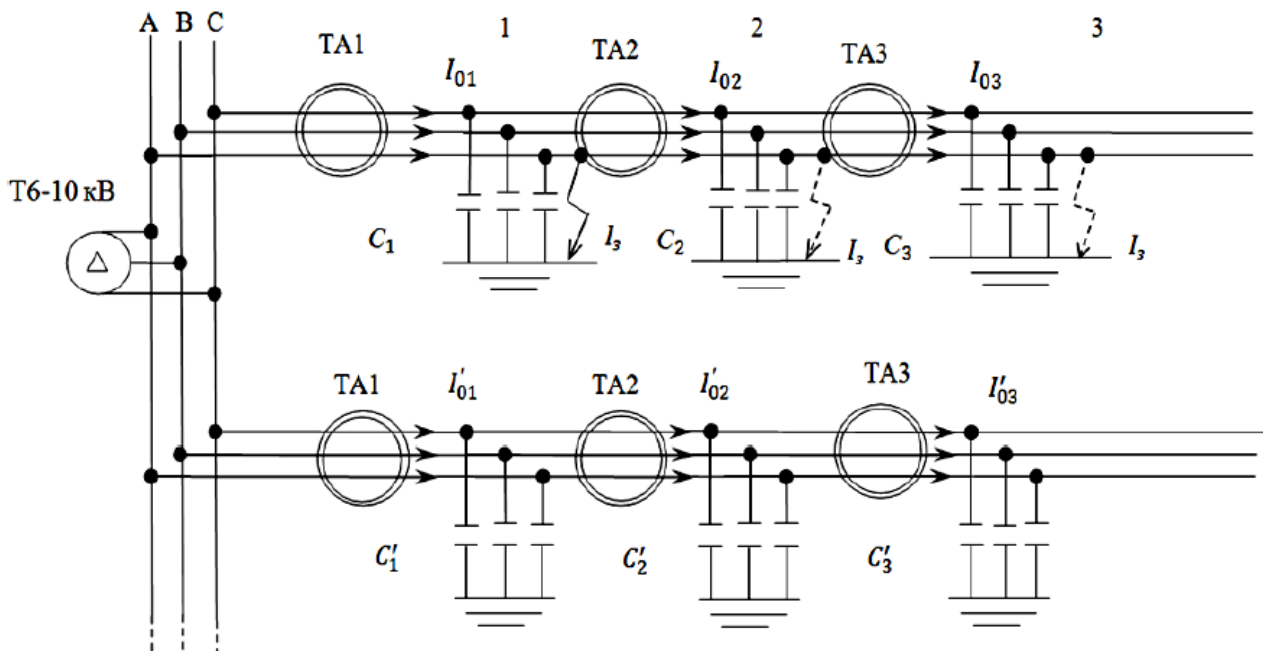


Рисунок 3 – Расчетная схема сети с двумя фидерами:

$I_{01}-I_{03}$  – токи нулевой последовательности первого фидера, на котором произошло замыкание на землю;  $I'_{01} - I'_{03}$  – токи нулевой последовательности во втором фидере;  $C_1-C_3, C'_1 -C'_3$  – емкости отдельных участков фидеров относительно земли; TA1-TA3 – трансформаторы тока нулевой последовательности; T – силовой трансформатор 6-15кВ

При числе фидеров больше двух полученные уравнения сохраняют свой вид. Однако к сумме емкостей  $C_1 + C_2 + C'_1 + C'_2 + C'_3$  следует прибавить емкости других фидеров [7].

Аналогично можно получить уравнения, характеризующие распределение токов нулевой последовательности во втором (неповрежденном) фидере при замыкании на землю на первом.

Распределение токов нулевой последовательности в неповрежденном втором фидере не зависит от того, на каком участке первого фидера произошло замыкание на землю, поэтому для их оценки можно использовать выражения (1)–(3).

Для подтверждения расчетных данных распределения токов нулевой последовательности была создана рабочая модель с помощью программного комплекса Ni Multisim (рис. 4). Она идентична по структуре рис.3. Для реализации снятия величин токов нулевой последовательности в схеме использованы фильтры токов нулевой последовательности. При разработке модели большое внимание уделено представлению трансформаторов тока. Их коэффициенты трансформации подобраны так, чтобы результаты максимально близко совпадали с расчетными.

В табл. 2 приведены значения токов нулевой последовательности для каждого случая однофазного замыкания, полученного путем расчетов и при помощи модели, а также указана погрешность результатов моделирования. Таким образом, на простой схеме были обработаны детали модели и проверена ее достоверность.

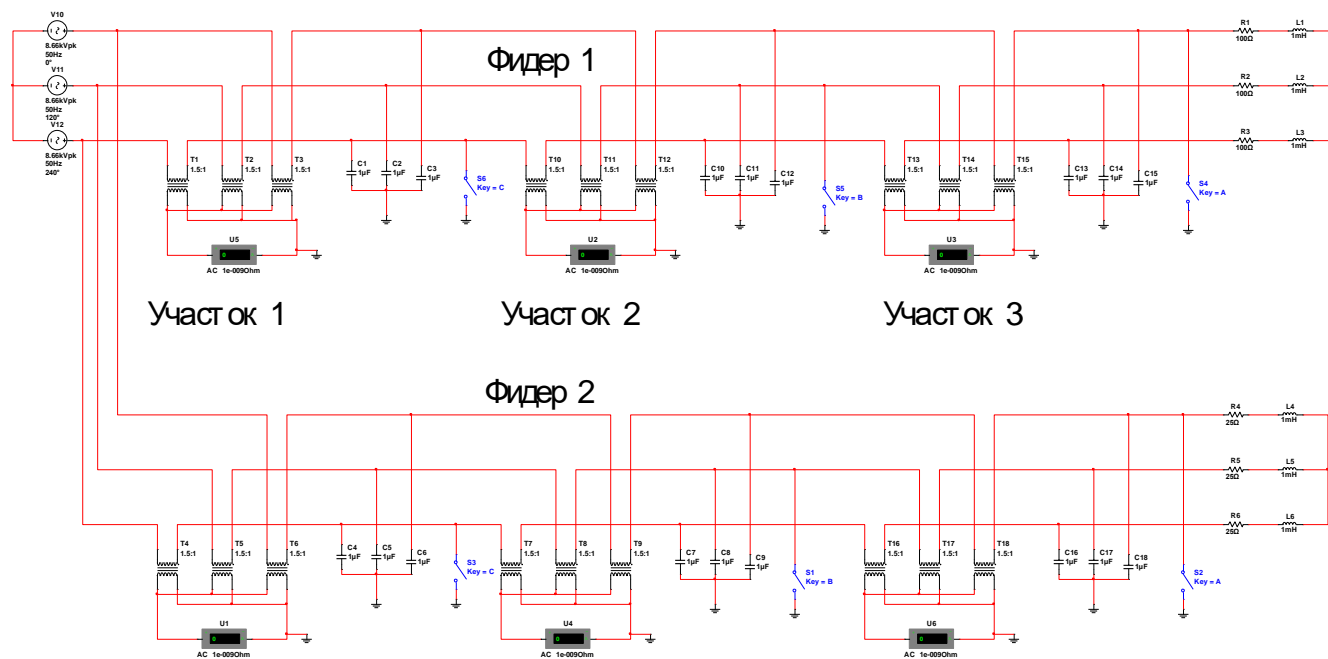


Рисунок 4 – Модель участка сети с двумя фидерами в ПК Ni Multisim

Таблица 2 – Результаты расчетов и моделирования

Место замыкания	Расчетная величина, А	Величина на модели, А	Погрешность, %
Участок №1 фидера 1	$j24,5$	26,1	6,1
	$-j16,3$	17,4	6,3
	$-j8,16$	8,7	6,2
Участок №2 фидера 1	$j24,5$	26,1	6,1
	$j32,6$	34,8	6,3
	$-j8,16$	8,7	6,2
Участок №3 фидера 1	$j24,5$	26,1	6,1
	$j32,6$	34,8	6,3
	$j40,8$	43,5	6,2
Участок №1 фидера 2	$-j24,5$	26,1	6,1
Участок №2 фидера 2	$-j16,3$	17,4	6,3
Участок №3 фидера 2	$-j8,16$	8,7	6,2

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для дальнейшего моделирования взят участок сети ВЛ 15 кВ Правдинского района (рис. 1). Компьютерная модель составлена для одной секции шин проектируемой электростанции (рис. 5) при добавлении в нее дополнительных реклоузеров. На рассматриваемых линиях количество реклоузеров не позволяет полноценно использовать выбранный тип защиты, а кроме того, не отображает отпайки на тупиковые подстанции. Нагрузки линий взяты обобщенно, в результате чего схема содержит четыре участка с местами возможного однофазного замыкания на землю. В дальнейшем количество защищаемых ответвлений может быть увеличено.

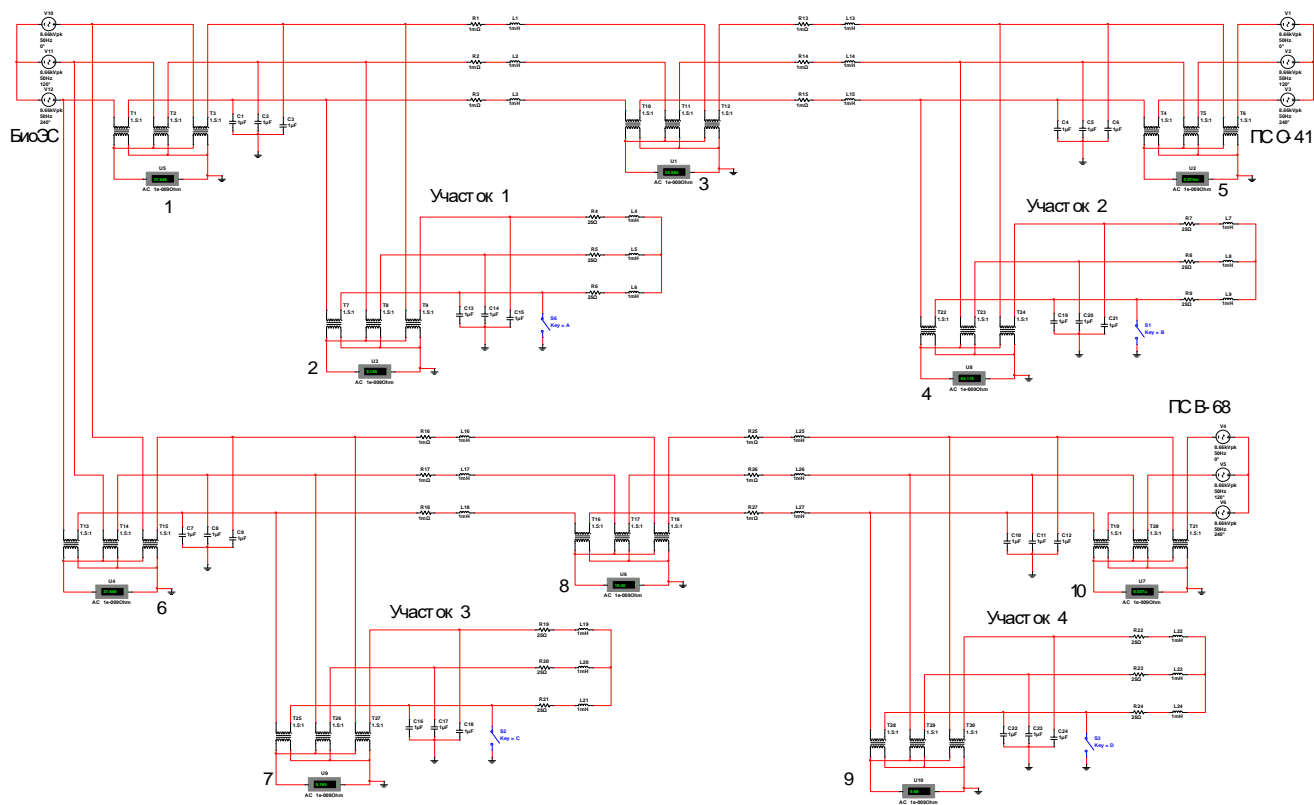


Рисунок 5 – Компьютерная модель участка сети 15 кВ Правдинского района вблизи проектируемой станции

В табл. 3 представлены значения токов нулевой последовательности, измеряемые реклоузерами при однофазных замыканиях на землю.

Таблица 3 – Значения токов нулевой последовательности

Номер участка ОЗЗ	Значения токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю на каждом фильтре нулевой последовательности, А									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	34,7	60,8	17,3	8,7	0	34,7	8,7	17,4	8,7	0
2	35,8	8,7	52	60,7	0	34,8	8,7	17,3	8,7	0
3	34,8	8,7	17,3	8,7	0	34,7	60,8	17,4	8,7	0
4	34,8	8,7	17,3	8,7	0	34,7	8,7	52	60,8	0

Серым цветом закрашены ячейки мест замыканий на землю. Как видно из табл. 3, значения токов в местах замыканий выше остальных, что может говорить о работоспособности модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования была предложена компьютерная модель для анализа распределения токов нулевой последовательности в сложнзамкнутой электросети, реализованная в программной среде Multisim. Достоверность созданной модели проверена путем сравнения результатов моделирования с результатами расчета при рассмотрении более простых схем. Кроме того, была продемонстрирована работоспособность ненаправленной токовой защиты в рассмотренных условиях для участка сети 15кВ Правдинского района Калининградской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – Москва: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Кажекин, И.Е. Феррорезонансные процессы при однофазных замыканиях в судовых электроустановках с компенсированной нейтралью / И.Е. Кажекин // Известия КГТУ. – 2019. – № 52. – С. 145-154.
3. Благинин, В.А. Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали / В.А. Благинин, В.И. Лозовенко, И.Е. Кажекин // Известия КГТУ. – 2008. – № 13. – С. 118-121.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – Москва, НЦ ЭНАС, 2017. – 272 с.
5. Несенюк, Т.А. Методы поиска однофазных замыканий в электрических сетях 6–35 кВ // Транспорт Урала. –2011. – № 1 (28). – С. 77-82.
6. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов / В.А. Андреев. – 5-е изд. – Москва: Высшая школа, 2007. – 639 с.
7. Дьяков, А. Ф. Микропроцессорная автоматика систем электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов / В.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – Москва: Изд. дом МЭИ, 2008. – 335 с.

## ANALYSIS OF THE OPERATION OF NON-DIRECTIONAL PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE EARTH FAULTS IN THE DISTRIBUTION NETWORKS OF THE KALININGRAD REGION

M.Y. Travenikov, student of gr. 19-EE/m,  
e-mail: travenikovmaxim@gmail.com  
Kaliningrad State Technical University

I.E. Kazhekin, Associate Professor,  
e-mail: kazhekin@mail.ru  
Kaliningrad State Technical University

The article describes the main types of protection against single-phase earth faults. The possibility of using non-directional protection against single-phase short circuits in 15 kV networks of the Kaliningrad region was evaluated using network section modeling in the Multisim software package. Through the use of this program on the basis of a simple model it is possible to make further larger the design of protection.

**Keywords:** *protection, earth fault, cutting off, Kaliningrad region, recloser*