

# Дистанционное определение места однофазного замыкания на землю в сетях 6–10 кВ на основе датчиков напряжения

Е. Р. Киржацких<sup>1</sup>, В. К. Козлов<sup>2</sup>

Казанский государственный энергетический университет  
Казань, Россия

<sup>1</sup>Ukaneeva1991@mail.ru, <sup>2</sup>kozlov\_vk@bk.ru

М. Н. Киржацких

ООО «НПП «Авиагаз-союз+»  
Казань, Россия  
frtstg@gmail.com

**Аннотация.** Применение переносных устройств по измерению электрического и магнитного полей позволяет определить направление к месту однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6–10 кВ. Применение автономных индикаторов на воздушной линии, позволяют зафиксировать факт о наличии замыкания. Существующие методы по дистанционному определению места повреждения требуют отключения линии, однако, в сетях с изолированной нейтралью передача электроэнергии продолжается по двум здоровым фазам. В статье предложен дистанционный метод по определению места ОЗЗ, которое позволяет по измеренным значениям фазных напряжений в начале и по концам линии электропередачи дистанционно определить место повреждения. Предложена схема автономного малогабаритного электробезопасного устройства для измерения значения напряжения на поврежденной фазе воздушной линии электропередачи в установленном режиме с дистанционной передачей информации.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю; измерение напряжения; поврежденная фаза; распределительные сети; повреждение в сети

## I. ВВЕДЕНИЕ

Воздушные линии электропередачи являются наименее надежными элементами энергосистемы, повреждение которых ведет к затруднительным поискам повреждения и представляют большую опасность для жизни оказавшихся поблизости людей. Сети с изолированной нейтралью имеют сильно разветвленную древовидную топологию, а самым частым видом повреждения является ОЗЗ, при котором треугольник междуфазных напряжений не искажается, а, следовательно, не отражается на питании потребителей [1].

Между тем длительные поиски ОЗЗ в данных сетях нередко служат причиной перехода однофазного в более сложные виды повреждений, которые требуют незамедлительного отключения линии. Для исключения последствий, вызванных ОЗЗ, необходимо быстро локализовать место повреждения.

Согласно Положения ПАО «Россети» [2] «п.2.5 Основными направлениями технической политики при ... эксплуатации воздушных линий электропередач (ЛЭП) являются ... применение систем диагностирования технического состояния ВЛ под рабочим напряжением без вывода из работы».

На сегодняшний день применяется три метода определения места повреждения: топографический, дистанционный и метод деления сети.

Топографический метод заключается в использовании специальных приборов, таких как: «Поиск 1» (ОАО «Мытищинский электромеханический завод»), «Квант-К» (ООО «Квазар»), «Вектор» (ООО «Электробезопасность – Вятка»), которые измеряют параметры ЛЭП и указывают направление к месту ОЗЗ. Эти приборы являются самыми экономически выгодными, но не удовлетворяют по условиям быстродействия [3].

Среди дистанционных устройств для определения места ОЗЗ самыми популярными являются блоки микропроцессорных защит с функцией ОМП, такие как «ИМФ-10», «Сириус-2-ОМП». Они выявляют ОЗЗ и определяют поврежденный фидер с возможностью работы как на сигнал, так и на отключение.

Метод последовательного деления сети позволяет выделить лишь поврежденный участок сети. К данному классу можно отнести такие устройства как ИКЗ-В31, ИКЗ-В34Л, ИКЗ-В33Л (ООО МНПП «Антракс») и ИПВЛ FI-3A2F/W (ООО «Релематика»), которые измеряют ток замыкания. В практическом применении эти устройства срабатывают лишь в 50% случаев из-за малого тока замыкания на землю.

Исходя из вышеперечисленного, на данный момент разработка дистанционного определения места повреждения под напряжением и без отключения линии является актуальной задачей.

Данная статья посвящена исследованию дистанционного способа определения места повреждения в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью на основе автономных датчиков напряжения.

## II. РАССЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ МЕТОДОМ ФАЗНЫХ КООРДИНАТ

При изучении метода симметричных составляющих для линии с изолированной нейтралью, принято считать, что при ОЗЗ на поврежденной фазе – ноль вольт [4]. Среди работников этот процесс называют «земля в сети».

В работах [5–8] представлен метод фазных координат (МФК) по определению места повреждения. Представленным методом можно получить аналитические соотношения между параметрами ЛЭП, однако, для наглядной демонстрации воспользуемся

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, договор №13615ГУ/2018 от 20.03.2019

программным пакетом Matlab Simulink для моделирования процесса.

Для того, чтобы убедиться в однозначности расчетов, рассчитаем параметры воздушной линии МФК и сравним полученные значения с вычисленными в Matlab Simulink.

На рис. 1 представлена моделируемая линия 10 кВ с расположением фаз «треугольник».

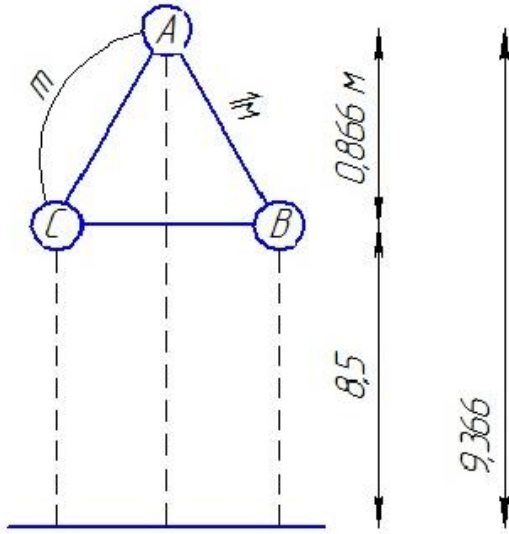


Рис. 1. Схематичное расположение фаз ВЛЭП

Марка провода принята АС 35/6,2:

- сопрот. постоянному току  $R_0 = 0,7774$  Ом/км;
- наружный диаметр  $d=0,0084$  м;
- расстояние между фазами  $m=1$  м;
- высота опоры  $H=10$  м;
- радиус провода  $r_0=0,0042$  м;
- провис провода  $f_{pr}=1,5$  м.

Рассчитаем координаты проводов по оси x и по оси y:

$$x_A = 0, x_B = \frac{m}{2} = \frac{1}{2} = 0,5, x_C = -\frac{m}{2} = -\frac{1}{2} = -0,5; \quad (1)$$

$$y_A = 9,366 \cdot m - \frac{2}{3} \cdot f_{pr} = 9,366 \cdot 1 - \frac{2}{3} \cdot 1,5 = 8,366; \quad (2)$$

$$y_B = y_C = 8,5 \cdot m - \frac{2}{3} \cdot f_{pr} = 8,5 \cdot 1 - \frac{2}{3} \cdot 1,5 = 7,5; \quad (3)$$

Согласно (1)–(3) фазы будут иметь следующие координаты: А (0;8,366), В (0,5; 7,5), С (-0,5; 7,5).

Найдем матрицу погонных активных сопротивлений линии [R]:

$$R_{ii} = R_0 + R_3 = 0,827, \quad (4)$$

где  $R_3$  – сопротивление земли, Ом/км,

$$R_3 = \pi^2 \cdot f \cdot \alpha = 0,049 \text{ Ом/км}$$

$$R_{ij} = R_3 = 0,049 \quad (5)$$

Подставим найденные значения (4) и (5) в матрицу (6):

$$R = \begin{bmatrix} R_{ii} & R_{ij} & R_{ij} \\ R_{ij} & R_{ii} & R_{ij} \\ R_{ij} & R_{ij} & R_{ii} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,827 & 0,049 & 0,049 \\ 0,049 & 0,827 & 0,049 \\ 0,049 & 0,049 & 0,827 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Найдем индуктивные продольные сопротивления проводников линии (согласно формуле выше) [X]:

$$X_{ii} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln(D_3 / r_{oi}) = 0,774$$

$$X_{ij} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln(D_3 / \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}) = 0,43$$

Найдем собственные потенциальные коэффициенты и усредним их (7):

$$\alpha_{11} = \ln \frac{2y_1}{r} = \ln \left( \frac{2 \cdot 8,366}{0,0042} \right) = 8,289$$

$$\alpha_{22} = \ln \frac{2y_2}{r} = \ln \left( \frac{2 \cdot 7,5}{0,0042} \right) = 8,180$$

$$\alpha_{33} = \ln \frac{2y_2}{r} = \ln \left( \frac{2 \cdot 7,5}{0,0042} \right) = 8,180$$

$$\alpha_{c1} = \frac{1}{3} (\alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}) = 8,217 \quad (7)$$

Найдем взаимные потенциальные коэффициенты и усредним их: (8):

$$\alpha_{12} = \ln \left( \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2}}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right) = 2,764$$

$$\alpha_{13} = \ln \left( \frac{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 + y_3)^2}}{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}} \right) = 2,764$$

$$\alpha_{23} = \ln \left( \frac{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 + y_3)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}} \right) = 2,710$$

$$\alpha_{b1} = \frac{1}{3} (\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{23}) = 2,765 \quad (8)$$

Матрица емкостей после обращения матрицы ( $\alpha$ ) будет иметь вид (9):

$$C = \frac{1}{q} \begin{bmatrix} \alpha_c & \alpha_b & \alpha_b \\ \alpha_b & \alpha_c & \alpha_b \\ \alpha_b & \alpha_b & \alpha_c \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $\alpha_c = \alpha_{c1} + \alpha_{b1} = 10,963$ ,  $\alpha_b = -\alpha_{b1} = -2,746$ ,  
 $q = \alpha_{c1} \cdot \alpha_{b1} - 2 \cdot \alpha_{b1}^2 + \alpha_{c1}^2 = 75,003$ .

Матрица проводимостей с учетом (7)–(9) примет следующий вид (Ф/км):

$$Y = i \cdot 2\pi\epsilon_0 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{q} \begin{bmatrix} \alpha_c & \alpha_b & \alpha_b \\ \alpha_b & \alpha_c & \alpha_b \\ \alpha_b & \alpha_b & \alpha_c \end{bmatrix} =$$

$$= i \begin{bmatrix} 8,128 \cdot 10^{-9} & 2,036 \cdot 10^{-9} & 2,036 \cdot 10^{-9} \\ 2,036 \cdot 10^{-9} & 8,128 \cdot 10^{-9} & 2,036 \cdot 10^{-9} \\ 2,036 \cdot 10^{-9} & 2,036 \cdot 10^{-9} & 8,128 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Сравним полученные данные (6) и (10) с полученными в программе Matlab Simulink.

Resistance matrix (Ом/км):

$$R = \begin{bmatrix} 0,82204 & 0,048047 & 0,048047 \\ 0,048047 & 0,82217 & 0,048112 \\ 0,048047 & 0,048112 & 0,82217 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Capacitance matrix (Ф/км):

$$Y = \begin{bmatrix} 8,0688e-09 & -2,0623e-09 & -2,0623e-09 \\ -2,0623e-09 & 8,1456e-09 & -2,0237e-09 \\ -2,0623e-09 & -2,0237e-09 & 8,1456e-09 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Погрешность данных между расчетами методом фазных координат и программой Matlab Simulink (6) и (11), (10) и (12) составляет не более 0,7%, что позволяет использовать программу для рассмотрения предлагаемого метода.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНИИ С ДВУМЯ ОТПАЙКАМИ

В работах [9–10] проведено исследование по зависимости между значениями напряжения на поврежденной фазе, измеренными в начале и по концам линии электропередачи без отпайк.

Проведем исследование в программе Matlab Simulink по схеме, изображенной на рис. 2 с двумя отпайками. Линия принята длиной 10 км, выполнена проводами марки АС 35/6,2, трансформаторы приняты ТМТН 6300/110/10, ТМ-2500/10/0.4. Нагрузка у потребителей КТП 1 (комплектная трансформаторная подстанция), КТП 2, КТП 3 принята  $P = 200$  кВт, сопротивление земли  $R_z = 50$  Ом·м, сопротивление в месте аварии  $R_{пер} = 0,1$  Ом (металлическое). Датчики напряжения измеряют фазное значение напряжения поврежденной фазы в установленном режиме промышленной частоты, установлены в начале и по концам линии на всех фазных проводах (на рис. 2 условно обозначены черными квадратами). При возникновении ОЗЗ – передают измеренный сигнал на сервер диспетчера, где их будут обрабатывать по заданному алгоритму.

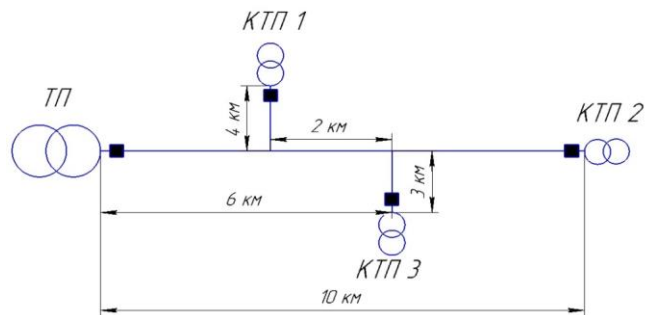


Рис. 2. Структурная схема линии

Результаты моделирования однофазного замыкания на землю фазы А вдоль линии от ТП к КТП 2 представлены в табл. 1.

Зависимость уровня напряжения поврежденной фазы в начале и по концам линии электропередачи при моделировании ОЗЗ вдоль линии от ТП к КТП 2, согласно табл. 1, приведена на рис. 3.

ТАБЛИЦА I НАПРЯЖЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОЗЗ ВДОЛЬ ЛИНИИ ОТ ТП К КТП 2

Расстояние до ОЗЗ от начала линии (км)	Напряжение поврежденной фазы на ТП U1 (В)	Напряжение поврежденной фазы на КТП1 U2 (В)	Напряжение поврежденной фазы на КТП2 U3 (В)	Напряжение поврежденной фазы на КТП3 U4 (В)
0	27,97	219,68	276,22	262,07
1	59,98	177,02	233,42	219,29
2	100,40	134,58	190,72	176,64
3	142,21	92,68	148,21	134,22
4	184,47	52,58	106,09	92,34
5	212,67	31,13	78,58	65,26
6	240,91	28,07	52,25	40,33
7	254,98	36,23	40,26	30,96
8	269,04	47,27	30,33	26,24
9	283,10	59,60	25	28,55
10	297,15	72,56	27,13	36,58

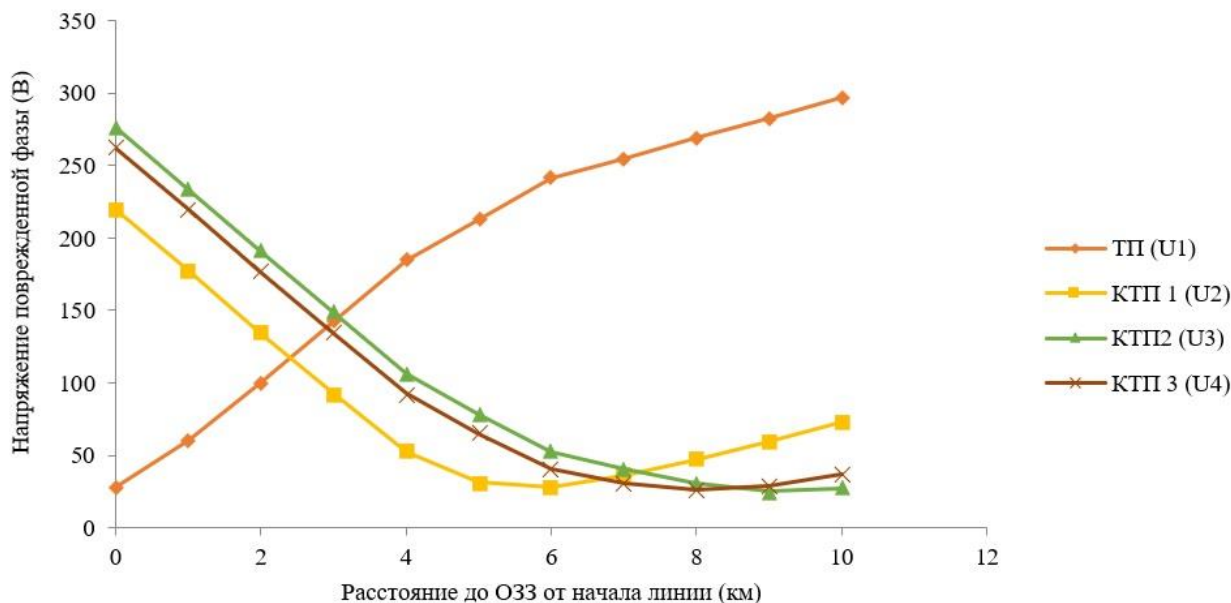


Рис. 3. Зависимость напряжения поврежденной фазы в начале (ТП) и по концам ЛЭП (КТП1, КТП 2, КТП 3) при моделировании ОЗЗ вдоль линии от ТП к КТП 2

По рис. 2 можно сделать вывод, что при моделировании ОЗЗ вдоль линии напряжение до 4 км возрастает/убывает линейно (на расстоянии 4 км появляется первая отпайка), а после отпайки возрастает/убывает по определенной зависимости.

По ранее проведенным исследованиям [11–14], показано, что применение дифференциального метода (разность между значениями пары сработавших

устройств) позволяет не учитывать источник переменного напряжения, нагрузку у потребителей, переходное сопротивление в месте аварии и удельное сопротивление земли.

На рис. 4 приведена зависимость разности напряжений поврежденной фазы в начале и по концам ЛЭП от расстояния до ОЗЗ для рис. 2.

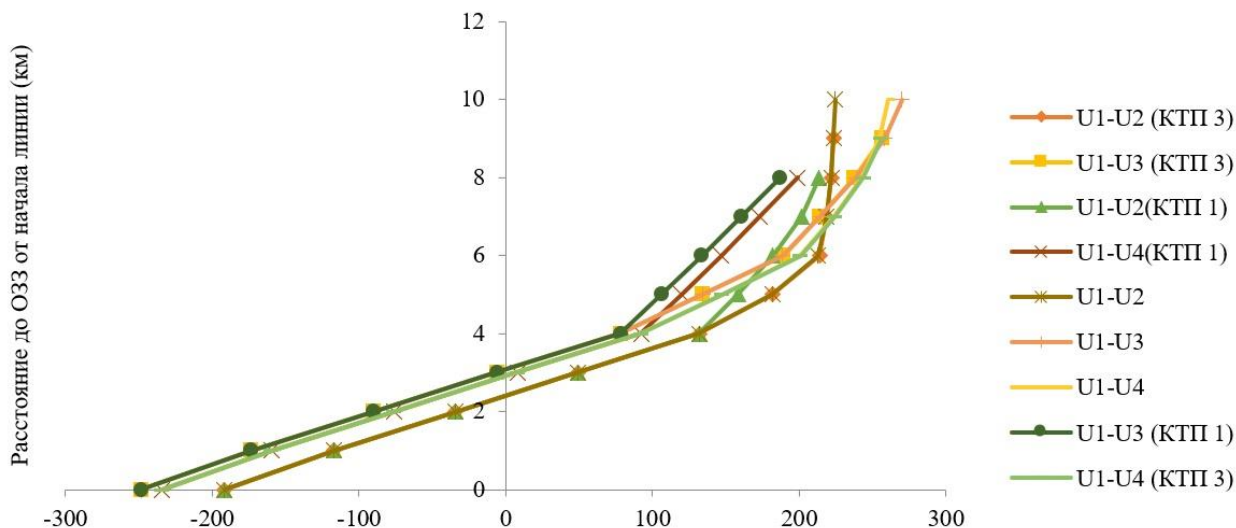


Рис. 4. Зависимость разности напряжений поврежденной фазы в начале (U1) и по концам ЛЭП (U2, U3, U4) от расстояния до ОЗЗ

По данным рис. 3 видно, что при моделировании линии с двумя отпайками можно определить место повреждения, зная разность напряжений между началом и концом линии электропередачи.

*Методика дифференциального метода по определению места повреждения:*

1. Измерение фазного напряжения поврежденной фазы при ОЗЗ (от 0 до 1000 В) в начале  $U_1$  и по концам линии  $U_2, U_3, U_4$ .
2. Отправка сигналов на сервер диспетчера.

3. Применение дифференциального метода (расчет разности между началом и концами ЛЭП  $U_1-U_2, U_1-U_3, U_1-U_4$ ).

4. По представленным зависимостям  $L=f(U_1-U_2)$  определяется место повреждения [15].

Пункт 3 и 4 должны обрабатываться на сервере диспетчера в заранее написанной программе для каждой линии электропередачи, на «Программу по дистанционному определению места повреждения в распределительных сетях» получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [16].

На рис. 5 представлен общий вид отображения результатов программы.

Рис. 5. Общий вид отображения результатов программы

Программа позволяет определить на каком расстоянии от начала линии произошло ОЗЗ и на какой отпайке.

Остался вопрос, каким устройством можно измерять фазное напряжение поврежденной линии в установившемся режиме промышленной частоты?

#### IV. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

На сегодняшний день самым распространенным устройством для измерения напряжения является трансформатор напряжения, однако, для нашей задачи, он не подходит, потому что является крупногабаритным, дорогостоящим и большая погрешность при измерении напряжения до 1000 В.

Поэтому необходимо разработать устройство, которое будет малогабаритным, электробезопасным, сможет измерять в заданных пределах и передавать информацию дистанционно.

Согласно [17], способ измерения напряжения возможен «в виде емкостного делителя напряжения, первой обкладкой которого является фаза ЛЭП, второй – металлический изолированный стержень, параллельный токопроводу, подвешенный на расстоянии изоляции от первой обкладки, при этом измеренные значения разности потенциалов между обкладками позволяет вычислить напряжение на фазном проводе линии по формуле (13)

$$U_f = \Delta U / K \quad (13)$$

где  $\Delta U$  – это измеренная разность потенциалов между фазой ЛЭП и металлическим изолированным стержнем, а  $K$  – это формула (14).

$$K = C_2 / (C_1 + C_2) \quad (14)$$

где  $C_1$  – емкость между фазой ЛЭП и металлическим изолированным стержнем,  $C_2$  – емкость между металлическим изолированным стержнем и землей (рис. 6).

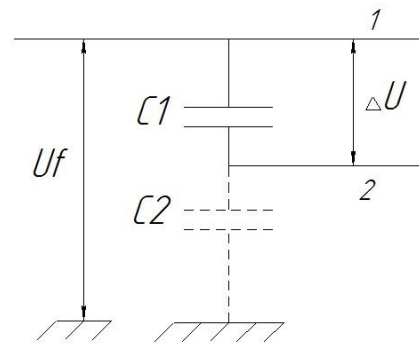


Рис. 6. Структурная схема емкостного делителя напряжения

Разработка и применение данного устройства позволит создать датчик напряжения автономным, без электрической связи с землей и с дистанционной передачей информации.

Скорость обработки сигналов планируется до одной минуты.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применяя датчики напряжения, которые будут измерять значение напряжения в установившемся режиме, можно однозначно определить место повреждения при ОЗЗ независимо от значений переходного сопротивления в месте аварии, параметров источника и нагрузки потребителей, а также от количества отпайек.

#### VI. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дальнейшие перспективы исследования заключаются в разработке и тестировании работоспособности устройства для измерения напряжения, написании и апробации программы дистанционного определения места повреждения для реальной воздушной ЛЭП 10 кВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 151 с.
- [2] Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция) от 08.11.2019 №378. URL: <https://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/tehpolitika.pdf>.
- [3] Обзор методов определения места повреждения в сетях 6-35 кВ / Е.Р. Киржацких, В.К. Козлов // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: Материалы докладов XIII откр. мол. научн.-практ. конф., Казань, 2-4 окт. 2018 / Казан. гос. энерг. ун-т, Казань, 2018, С. 66-70.
- [4] Метод симметричных составляющих: метод. указ. / Под ред. Н.Ю. Ушакова, Л.В. Быковской. Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ. 2010. 59 с.
- [5] Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М.: Высшая школа, 1988. 355 с.
- [6] Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем: научное издание. М.: Энергоатомиздат, 1983. 528 с.
- [7] Якимчук Н.Н. Применение метода фазных координат для анализа несимметричных режимов электроэнергетических систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. / СПб.: СПбГТУ, 2000, 18 с.
- [8] Совершенствование метода расчета однофазного замыкания на землю в сети 10 кВ / Е.Р. Киржацких, В.К. Козлов // Сборник докладов участников VIII Слета молодых энергетиков Башкортостана, Мелеуз, 5-8 сентября 2018 / Уфа: Информреклама, 2018 г., С.259-265.

- [9] Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R. Determining the location of a single-phase circuit in 10 kv distribution networks // 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). Moscow, Russia, 2019. pp. 1-9.
- [10] Козлов В.К., Киржацких Е.Р. Дифференциальный метод определения места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. №6. С. 42-44.
- [11] Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R., Giniatullin R.A. Differential method for damage location determining in 10 kV distribution networks with isolated neutral // E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. 2019. P. 01003.
- [12] Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниатуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашского университета. 2019. № 1. С. 39-46.
- [13] Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниатуллин Р.А. Моделирование однофазного замыкания в распределительных сетях 10 кв с изолированной нейтралью в программе matlab // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. Т. 74. № 4. С. 18-23.
- [14] Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R. Determining the Location of a Single-Phase Circuit in 10 KV Distribution Networks // 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019 this link is disabled, 2019. P.8958052.
- [15] Пат. РФ №2717697 / В.К. Козлов, Е.Р. Киржацких Способ определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6-10 кв с изолированной нейтралью; Опубл. 18.07.2019, Бюл. №9.
- [16] Свид. о гос.рег. программы для ЭВМ РФ №2020611359 /С.А. Соловьев, В.К. Козлов, Е.Р. Киржацких Программа по дистанционному определению места повреждения в распределительных сетях; Опубл. 30.01.2020.
- [17] Пат. РФ №2702914 / В.К. Козлов, Е.Р. Киржацких. Устройство для измерения напряжения в высоковольтной цепи с дистанционной передачей информации; Опубл. 18.12.18. Бюл. №29.