

УДК 621.311

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Сушков Валерий Валентинович<sup>1</sup>,  
sushkovvv@tyuiu.ru

Сухачев Илья Сергеевич<sup>1</sup>,  
suhachevis@tyuiu.ru

Сидоров Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
sidorovsv@tyuiu.ru

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность.** Аварийность электротехнического комплекса отходящих линий электропередачи связана с возникновением повреждений линейной изоляции и возникающими при этом переходными процессами, характеризующимися наличием высших гармонических составляющих токов и напряжения, которые снижают надёжность и энергоэффективность работы электрооборудования нефтегазовых предприятий: ухудшают механические характеристики и КПД электродвигателей, ускоряют старение их изоляции, нарушают функционирование систем управления и противоаварийной автоматики, диагностических систем реального времени и других электронных устройств. Одной из причин высокой аварийности, отключений и аварийных ремонтов в электротехнических комплексах отходящих линий электропередачи нефтегазовых предприятий является возникновение однофазных замыканий на землю. Известно, что на достоверность способов определения места возникновения однофазного замыкания на землю оказывают влияние большое количество изменяющихся факторов: параметры режима работы линии электропередачи, её конструктивные и электрические параметры, вид повреждения, величина переходного сопротивления, сопротивление грунта и прочие. Введение в алгоритмы определения места повреждения линии электропередачи усреднённых значений ряда перечисленных факторов независимо от изменения влажности грунта и воздуха, его температуры и прочего обуславливает погрешность способов определения места повреждения до 30 %. Таким образом, актуальны исследования, направленные на разработку способа определения места повреждения воздушной линии электропередачи с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю на основе алгоритма обработки данных цифровых подстанций с учётом параметров опор и природно-климатических факторов.

**Цель:** повышение надёжности электрических сетей и обеспечение электроэнергией потребителей требуемого качества за счёт применения цифровой системы поиска места повреждения в электротехническом комплексе отходящих линий электропередачи.

**Методы:** математическое описание линии электропередачи с учётом её конструктивных особенностей и природно-климатических факторов на основе метода зеркальных изображений; математическое описание установившихся и переходных режимов работы линии электропередачи с учётом собственных и взаимных параметров проводов; анализ Фурье токов и напряжений линии электропередачи; апробация разработанного способа определения места однофазного замыкания на землю в электрической сети энергетической компании Тюменской области.

**Результаты.** Разработан способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью, отличающийся тем, что сначала по соответствиям между величинами напряжений обратной последовательности фазных напряжений на вводе трансформаторных подстанций идентифицируют повреждённое ответвление воздушной линии электропередачи и затем вдоль него определяют расстояние до места возникновения однофазного замыкания на землю на основе резонансных частот линии с учётом её конструктивных особенностей и природно-климатических факторов.

### Ключевые слова:

Электротехнический комплекс, качество электроэнергии, надёжность электроснабжения, цифровая подстанция, математическое моделирование, интеллектуальный комплекс обработки данных.

### Введение

Среди основных причин изменения параметров качества электрической энергии выделяют возникновение аварийных режимов в электротехническом комплексе отходящих линий электропередачи. Так, однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются основным видом электрических повреждений и по разным оценкам достигают значений порядка 70 % от общего числа всех повреждений в соответствии с опытом эксплуатации электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением 6(10) кВ.

Несмотря на масштабные исследования, существующие методики выявления ОЗЗ, применяемые в

данное время в большинстве электротехнических комплексов отходящих линий электропередачи нефтегазовых предприятий, практически не учитывают изменения геометрических и электрических характеристик линии, а также климатические факторы, влияющие на достоверность определения места повреждения (ОМП) электрических сетей [1–11]. Методики ОМП ориентированы на имеющиеся средства релейной защиты, тогда как применение технологии цифровых подстанций позволяет оперировать большим количеством данных, что обеспечивает более эффективную работу как первичного и вторичного оборудования подстанции, так и всей энергосистемы.

В концепции «Цифровой подстанции» устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) обычно дополнены функциями информационно-измерительной системы, что позволяет измерять в векторной форме токи и напряжения, а также записывать и накапливать информацию об аварийных режимах работы электрооборудования и собственных срабатываниях. Таким образом, возможно применение данных, регистрируемых устройствами релейной защиты и противоаварийной автоматики, в процессе диагностирования места повреждения воздушной линии электропередачи (ЛЭП). Это позволит исключить имеющееся противоречие, связанное с отсутствием в концепции «Цифровой подстанции» системы мониторинга параметров и диагностирования состояния ЛЭП, учитывающие влияние сложной топологии электрической сети и других осложняющих факторов обнаружения ОЗЗ, несмотря на актуальность и практическую значимость методик ОМП.

#### Постановка проблемы

Известно, что перенапряжения разделяют на междофазные, внутрифазные и между контактами коммутационных аппаратов. Междофазные перенапряжения приводят к повреждению и пробоем линейной изоляции, внутрифазные – к повреждению и пробоем обмоток трансформаторов и электродвигателей, перенапряжения между контактами коммутационных аппаратов приводят к сокращению их ресурса.

На основе анализа статистических данных получено следующее распределение причин повреждений ЛЭП 6–10 кВ: 42 % составляют атмосферные перенапряжения, 12 % связаны с изменением свойств грунта, 11 % – с коммутационными перенапряжениями, по 9 % – гололёдные образования и «пляска» проводов, 7 % – с ветровой нагрузкой; доля повреждений, связанных с температурными условиями, вибрационной нагрузкой и составом воздуха, не превышает одного процента.

Анализ современных микропроцессорных устройств РЗА, применяемых в России, показал, что основную долю рынка – 24,3 % – составляют микропроцессорные устройства РЗА Siemens и 22,9 % – ЭКРА. Следует отметить, что они не в полной мере учитывают геометрические параметры ЛЭП и изменения её электрических параметров под влиянием климатических факторов.

Таким образом, проблема исследования заключается в разработке перспективного способа определения места повреждения ЛЭП, учитывающего сложную топологию электрической сети с изолированной нейтралью и использующего диагностические признаки возникновения ОЗЗ, математические методы обработки токов и напряжений на основе технологии «Цифровой подстанции».

#### Объект и методы исследования

Объектом исследования является часть электрической сети древовидной структуры с изолированной нейтралью напряжением 6(10) кВ.

Построен алгоритм определения зависимости резонансных частот с учётом влияния климатических

факторов и конструктивных особенностей электрической сети от места возникновения ОЗЗ в ЛЭП для выделения диагностического признака обнаружения и локализации места повреждения.

Разработан способ определения места повреждения ЛЭП в электрических сетях с изолированной нейтралью, включающий следующие этапы [12]:

1. Определение ответвления (фидера) ЛЭП, на котором произошло ОЗЗ.
2. Определение расстояния до места возникновения ОЗЗ для выделенного ответвления ЛЭП.

В основу способа определения места повреждения ЛЭП в электрических сетях с изолированной нейтралью положен следующий алгоритм:

1. Получить в требуемом формате (например, COMTRADE) массив данных с цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии в составе современных цифровых подстанций. Минимальный состав массива данных должен включать информацию о синхронизированных по времени величинах фазных напряжений и токов на вводе цифровых подстанций электротехнического комплекса отходящих линий электропередачи нефтегазового предприятия.
2. В случае отсутствия в массиве данных информации о величинах напряжений обратной последовательности фазных напряжений их необходимо рассчитать.
3. Установить соответствие между величинами напряжений обратной последовательности фазных напряжений на вводе цифровых подстанций и ответвлением (фидером) ЛЭП, на котором произошло ОЗЗ.
4. Вычислить спектр фазных напряжений и токов, сохранённых в массиве данных, и определить резонансную частоту  $f_{\text{ОЗЗ}}$  повреждённой ЛЭП.
5. Вычислить резонансную частоту  $f_{\text{рез}}$  ЛЭП в нормальном режиме работы, используя её математическую модель, учитывающую конструктивные особенности линии и природно-климатические факторы.
6. Используя величины  $f_{\text{ОЗЗ}}$  и  $f_{\text{рез}}$ , вычислить расстояние до места возникновения ОЗЗ вдоль установленного ответвления (фидера) ЛЭП.

Для реализации первого пункта алгоритма поиска места возникновения ОЗЗ в ЛЭП необходимо, чтобы ячейки цепей трансформаторных подстанций были укомплектованы приборами контроля качества и учёта электроэнергии, регистрирующими мгновенные значения фазных напряжений и токов с привязкой ко времени и формирующими из них массив данных.

Во втором пункте алгоритма обратная последовательность фазных напряжений на вводе каждой цифровой подстанции электротехнического комплекса отходящих линий электропередачи нефтегазового предприятия рассчитывается следующим образом. Сначала к трём входным сигналам фазных напряжений применяется анализ Фурье на интервале одного периода и оцениваются векторные значения  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$  на основной частоте 50 Гц. Затем выполняется преобразование величин для получения напряжения обратной последовательности:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2 \cdot \dot{U}_b + a \cdot \dot{U}_c),$$

где  $a=e^{j2\pi/3}$  – комплексный оператор.

В узлах электрической сети, работающей в том числе в симметричном режиме, возникновение ОЗЗ сопровождается образованием несимметричной трёхфазной системы напряжений [13, 14], которую, согласно методу симметричных составляющих, можно представить эквивалентной совокупностью прямой, обратной и нулевой последовательностей. Известно, что величина напряжения обратной последовательности зависит от индуктивностей фаз ЛЭП, которые определяются исключительно исходя из геометрических размеров петель, образованных линейными проводами. На основании этого в третьем пункте алгоритма установлены следующие соответствия между величинами напряжений обратной последовательности фазных напряжений на вводе цифровых подстанций и ответвлении (фидером) ЛЭП, на котором произошло ОЗЗ:

- при ОЗЗ на магистрали электрической сети напряжения обратной последовательности значительно ниже на каждой трансформаторной подстанции, подключённой до места повреждения, чем на подстанциях за местом повреждения;
- при ОЗЗ на ответвлении (фидере) ЛЭП наибольшее напряжение обратной последовательности соответствует трансформаторной подстанции, подключённой к повреждённому ответвлению;

В четвёртом пункте алгоритма вычисляются спектры фазных напряжений и токов на вводе цифровых подстанций электротехнического комплекса отходящих линий электропередачи нефтегазового предприятия прямым преобразованием Фурье.

Сначала через интервал времени  $\Delta t$  берётся выборка анализируемого сигнала из массива данных с цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии. Согласно теореме Котельникова верхний предел частоты в спектре анализируемого сигнала должен быть равен  $1/(2\Delta t)$ , т. к. все частоты, превышающие половину частоты дискретизации, отража-

ются относительно неё и переносятся на более низкие частоты, что приводит к возникновению эффекта наложения, искажающего исходный спектр. Затем к элементам выборки применяется прямое преобразование Фурье и формируется спектр сигнала, на основании которого определяется резонансная частота  $f_{OЗЗ}$  повреждённой ЛЭП

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn},$$

где  $N$  – количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения;  $x_n$  – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках с номерами  $n$  от 0 до  $N-1$ ;  $X_k$  – комплексные амплитуды высших гармонических составляющих, формирующих исходный сигнал;  $k$  – номер высшей гармонической составляющей сигнала.

В пятом пункте алгоритма резонансная частота ЛЭП в нормальном режиме работы  $f_{рез}$  определяется из условия возникновения резонанса [15–17] путём численного решения системы уравнений с использованием математической модели, построенной на базе схемы замещения пролёта ЛЭП, приведённой на рис. 1:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_k}{\partial x} = L_k \frac{\partial i_k}{\partial t} + R_k i_k + \sum_{m=1}^3 L_{km} \frac{\partial i_m}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_k}{\partial x} = C_k \frac{\partial u_m}{\partial t} + \frac{u_k}{R_k} + \sum_{m=1}^3 C_{km} \frac{\partial (u_k - u_m)}{\partial t} + \sum_{m=1}^3 \frac{u_k - u_m}{R_{km}}. \end{cases} \quad (1)$$

Следует отметить, что в процессе математического описания воздушная линия электропередачи разбивается на участки с одинаковыми конструктивно-техническими параметрами (по типу опор, марке проводов и т. п.).

Подход к корректировке первичных параметров ЛЭП с учётом её конструктивных особенностей и климатических факторов позволяет повысить точность определения места однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью.

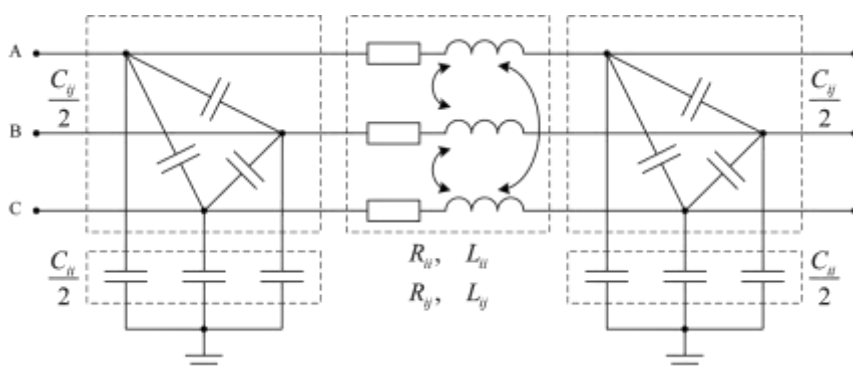
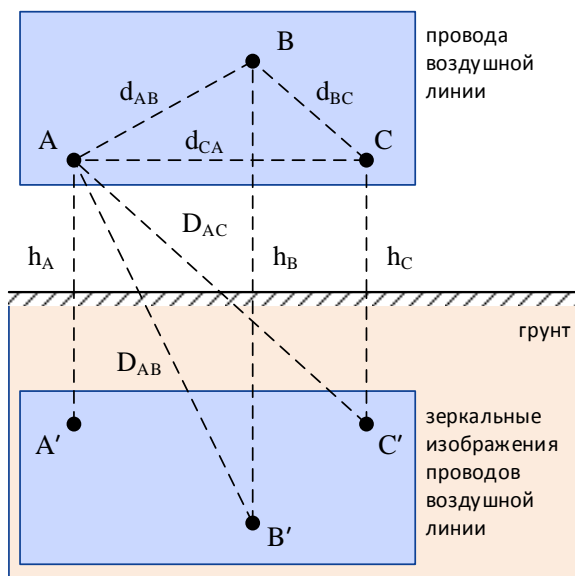


Рис. 1. Схема замещения пролёта воздушной линии электропередачи

Fig. 1. Transmission line circuit

В соответствии с методом зеркальных изображений, расчётная схема трёхфазной ЛЭП изображена на рис. 2, формулы расчёта первичных параметров ЛЭП

приведены в табл. 1. Расстояния между проводами и поверхностью земли определяются геометрическими параметрами опоры.



**Рис. 2.** Расчётная схема ЛЭП:  $h_i, h_k$  – высота проводов  $i, k$  над поверхностью земли;  $d_{ik}$  – расстояние между проводами  $i$  и  $k$ ;  $D_{ik}$  – расстояние между проводом  $i$  и зеркальным изображением провода  $k$

**Fig. 2.** Three-phase transmission line circuit:  $h_i, h_k$  – conductor height  $i, k$  above ground;  $d_{ik}$  – distance between conductors  $i$  and  $k$ ;  $D_{ik}$  – distance between conductor  $i$  and earth return conductor  $k$

В математическом описании первичных параметров ЛЭП, согласно табл. 1, применяются поправочные интегралы Карсона  $\Delta R_{ii}, \Delta R_{ik}, \Delta L_{ii}, \Delta L_{ik}$ , необходимые для учёта влияния удельного сопротивления грунта при расчётах электромагнитного состояния линии [18–20]. В разработанном способе предлагается вместо поправочных интегралов Карсона производить корректировку первичных параметров ЛЭП поправочными величинами  $\delta R, \delta L$  и  $\delta C$  исходя из её конструктивных особенностей, природно-климатических факторов и удельного сопротивления грунта района размещения:

$$\begin{aligned} R_{\text{коррект}} &= R \sum (1 + \delta R); \\ L_{\text{коррект}} &= L \sum (1 + \delta L); \\ C_{\text{коррект}} &= C \sum (1 + \delta C). \end{aligned} \quad (2)$$

Графики зависимостей поправочных величин  $\delta R, \delta L, \delta C$  первичных параметров ЛЭП от температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления и удельного сопротивления грунта приведены на

**Таблица 1.** Параметры схемы замещения ЛЭП

**Table 1.** Transmission line circuit parameters

Собственные и взаимные частичные сопротивления (Ом/км) Self and mutual resistance terms (Ω/km)	Собственные и взаимные частичные индуктивности (Гн/км) Self and mutual inductance terms (H/km)	Собственные и взаимные частичные потенциальные коэффициенты (км/Ф) и ёмкости (Ф/км) Self and mutual potential coefficients terms (km/F) and capacitance terms (F/km)
$R_{ii} = R_i + \Delta R_{ii}$ $R_{ik} = \Delta R_{ik}$	$L_{ii} = L_i + \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \lg \frac{2h_i}{r_i} + \Delta L_{ii}$ $L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \lg \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta L_{ik}$	$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \lg \frac{2h_i}{r_i}$ $P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \lg \frac{D_{ik}}{d_{ik}}$ $[C] = [P]^{-1}$

рис. 3, при этом участки характеристик синего цвета соответствуют положительным приращениям, а красного – отрицательным.

Известно, что удельное активное сопротивление провода определяется площадью его поперечного сечения и удельным сопротивлением материала; удельная индуктивность и удельная электрическая ёмкость провода зависят от его сечения и геометрического расположения относительно друг друга и поверхности земли; также в зависимости от состава, пористости, влажности, температуры, наличия химических загрязнителей удельное сопротивление грунтов изменяется в очень широких пределах. При этом указанные в справочной литературе физические величины нормированы и не учитывают сезонные изменения природно-климатических факторов.

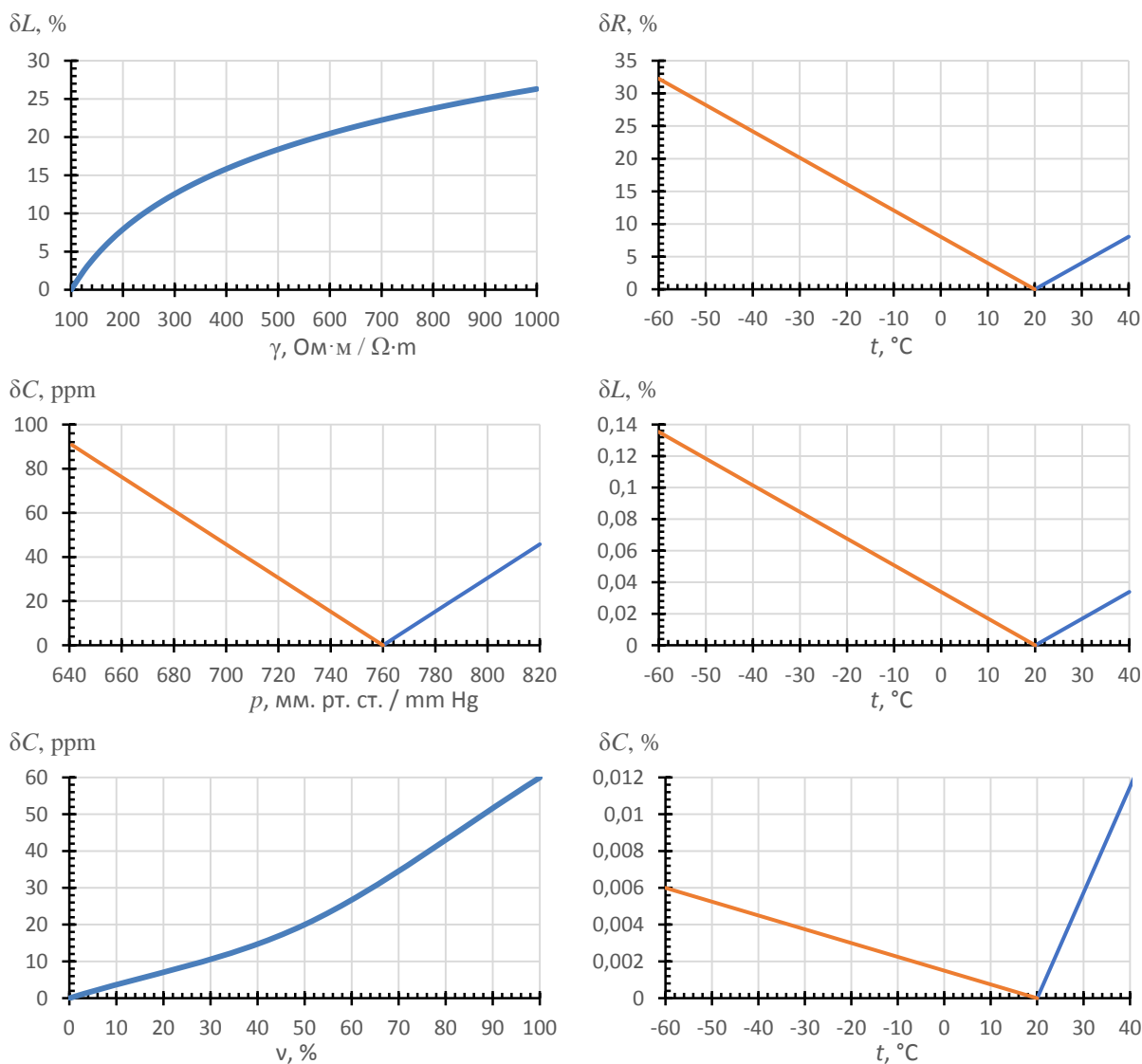
Анализ характеристик, приведённых на рис. 3, показал, что наиболее значительные погрешности определения первичных параметров ЛЭП связаны со следующими факторами: температурой – до 32,5 % при расчёте активного сопротивления, удельным сопротивлением грунта – до 27 % при расчёте индуктивности; остальными воздействиями природно-климатических факторов и удельного сопротивления грунта на первичные параметры ЛЭП при расчёте в первом приближении можно пренебречь.

В последнем пункте алгоритма вычисляется расстояние до места возникновения ОЗЗ вдоль установленного ответвления воздушной линии электропередачи по первой резонансной гармонике [21]:

$$x = \frac{f_{\text{рез}}}{f_{\text{ОЗЗ}}} \cdot l, \quad (3)$$

где  $x$  – расстояние до места повреждения от конца линии (точки регистрирования параметров);  $l$  – длина линии.

В предлагаемом способе определения места повреждения ЛЭП цифровая система определения места однофазного замыкания на землю (ОМОЗЗ) включает следующие функциональные блоки (рис. 4): блок детектирования однофазного замыкания на землю – 1, блок вычисления первичных параметров воздушной линии электропередачи – 2, блок корректировки первичных параметров воздушной линии электропередачи – 3, блок вычисления расстояния до места однофазного замыкания на землю – 4.



**Рис. 3.** Графики зависимостей поправочных величин первичных параметров ЛЭП (активного сопротивления  $\delta R$ , индуктивности  $\delta L$  и ёмкости  $\delta C$ ) от температуры  $t$ , влажности  $v$  окружающей среды, атмосферного давления  $p$  и удельного сопротивления  $\gamma$  грунта

**Fig. 3.** Plots of dependences of relative errors of transmission line circuit parameters (active resistance  $\delta R$ , inductance  $\delta L$  and capacitance  $\delta C$ ) on ambient temperature  $t$ , ambient humidity  $v$ , atmosphere pressure  $p$  and ground resistivity  $\gamma$

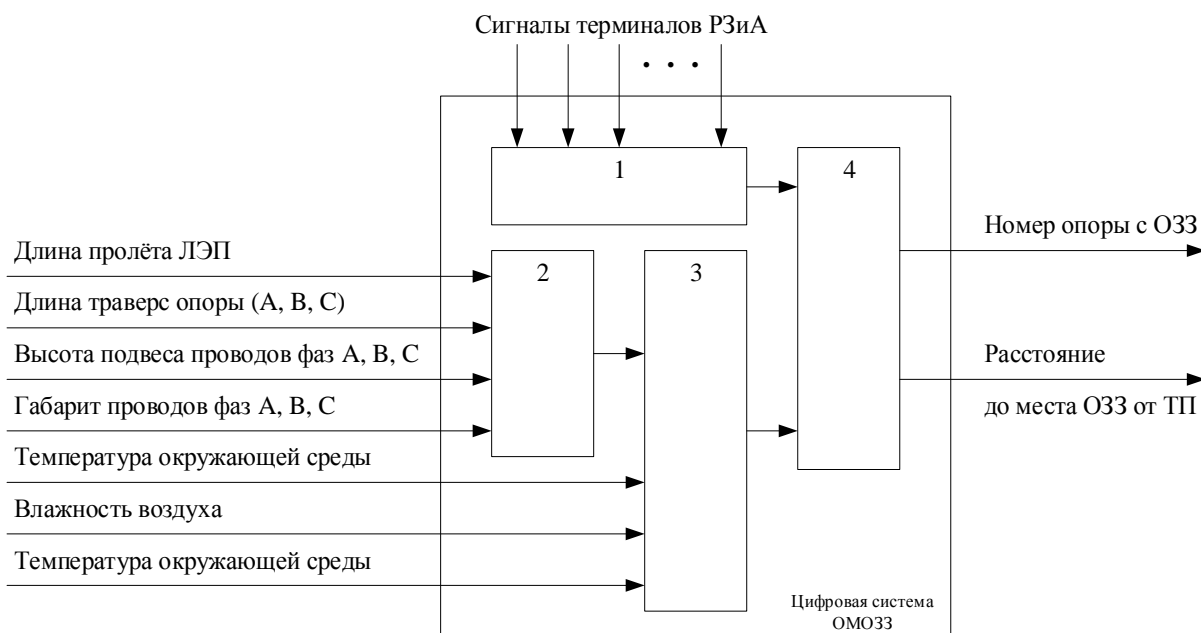
Известны монтируемые в комплектных распределительных устройствах трансформаторных подстанций (ТП) технические устройства [21–24] измерения и передачи в автоматизированную систему управления по стандарту МЭК-61850 величин фазных напряжений и токов, напряжения обратной последовательности присоединения. На основе принятых с каждой ТП электрической сети величин напряжений обратной последовательности блок детектирования однофазного замыкания на землю определяет ответвление линии электропередачи с однофазным замыканием на землю, которой соответствует максимальная величина напряжения обратной последовательности.

Известные методы определения расстояния до места повреждения линии электропередачи [25–37] оперируют первичными параметрами линии электропе-

редачи: сопротивлением, индуктивностью, ёмкостью, от точности вычисления которых зависит точность получаемого результата.

Блок вычисления первичных параметров воздушной линии электропередачи выполняет расчёты с учётом её конструктивных особенностей: длины пролёта, высоты подвеса проводов, длин траверс и габарита проводов.

Блок корректировки первичных параметров воздушной линии электропередачи корректирует продольное активное сопротивление проводов, собственные и взаимные индуктивности, ёмкости на землю и взаимные ёмкости проводов с учётом изменения температуры окружающей среды, влажности воздуха (климатических факторов) и удельного сопротивления грунта по результатам измерений или в соответствии с картой почв.



**Рис. 4.** Схема функционального блока цифровой системы определения места однофазного замыкания на землю  
**Fig. 4.** Functional block diagram of the phase-to-ground fault location digital system

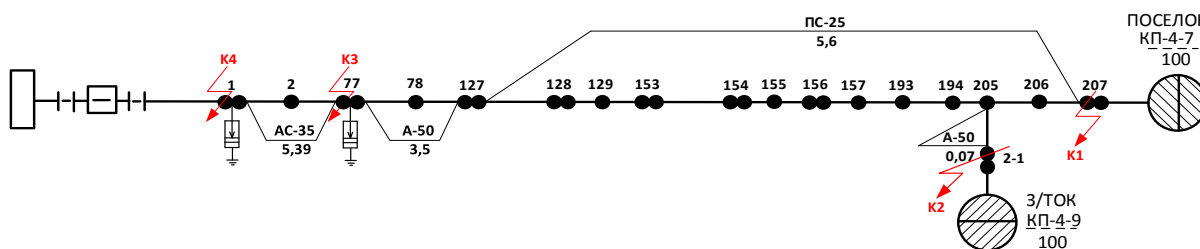
Блок вычисления расстояния до места ОЗЗ определяет расстояние до места ОЗЗ согласно одному из методов ОМП на основе результатов работы блока корректировки первичных параметров воздушной линии электропередачи.

Для подтверждения теоретических выкладок были проведены промышленные испытания на базе Юргамышского РЭС филиала Западные электрические сети АО «СУЭНКО» по определению места повреждения на линии 10 кВ с имитацией ОЗЗ. Место испытания: подстанция (ПС) 35/10 кВ «Кипель», ВЛ 10 кВ «Рождественка». Приборы, используемые при испытаниях: устройство определения места повреждения «Сириус-2-ОМП» производства «Радиус Автоматика» и цифровой измерительный прибор «ИРИС» производства «Микро-

процессорные технологии». Целью проведения испытаний является проверка на соответствие расстояния до места повреждения линии, полученного согласно методики фактическому расстоянию до места повреждения.

В ходе подготовки на ВЛ 10 кВ «Рождественка» (рис. 5) были назначены четыре точки для проведения имитации однофазного замыкания на землю:

- 1) ТП 10 кВ КП 4-7 Поселок (14,5 км от ПС «Кипель»);
- 2) ТП 10 кВ КП 4-9 Зерноток (14,42 км от ПС «Кипель»);
- 3) ВЛ 10кВ «Рождественка» опора 77 (5,4 км от ПС «Кипель»);
- 4) ВЛ 10кВ «Рождественка» опора 1 (0,01 км от ПС «Кипель»).



**Рис. 5.** Поопорная схема ВЛ-10кВ «Рождественка» от ПС 35/10 кВ ПС «Кипель»

**Fig. 5.** Transmission line towers diagram of the 10 kV Rozhdestvenka overhead line from the 35/10 kV of the Kipel substation

Согласно методике проведения испытания, для имитации ОЗЗ на выбранные точки устанавливали переносное заземление на одну фазу (В). Фиксация фазных напряжений и токов при осуществлении замыкания производилась приборами «Сириус-2-ОМП» и «ИРИС», предварительно установленными в ячейке вторичных цепей В-10 кВ «Рождественка» (рис. 6), а для первых двух измерений приборы дополнительно устанавливались в ТП 10 кВ.

В качестве примера рассмотрим испытания на точке К2: ТП 10 кВ КП 4-9 Зерноток. Бригадой оперативного персонала было установлено переносное заземление на ВЛ-10 кВ на фазу «В». После установки переносного заземления на ПС «Кипель» отключили заземляющие ножи на В-10 кВ, включили линейный разъединитель и В-10 кВ. После имитации однофазного замыкания на землю прибор «ИРИС», установленный на ТП 10 кВ КП 4-7 Поселок, и «Сириус-2-ОМП»,

установленный во вторичных цепях В-10 кВ, зафиксировали замыкание в линии и записали осциллограммы

напряжений и токов в формате COMTRADE. Фрагмент массива записанных данных приведён в табл. 2.

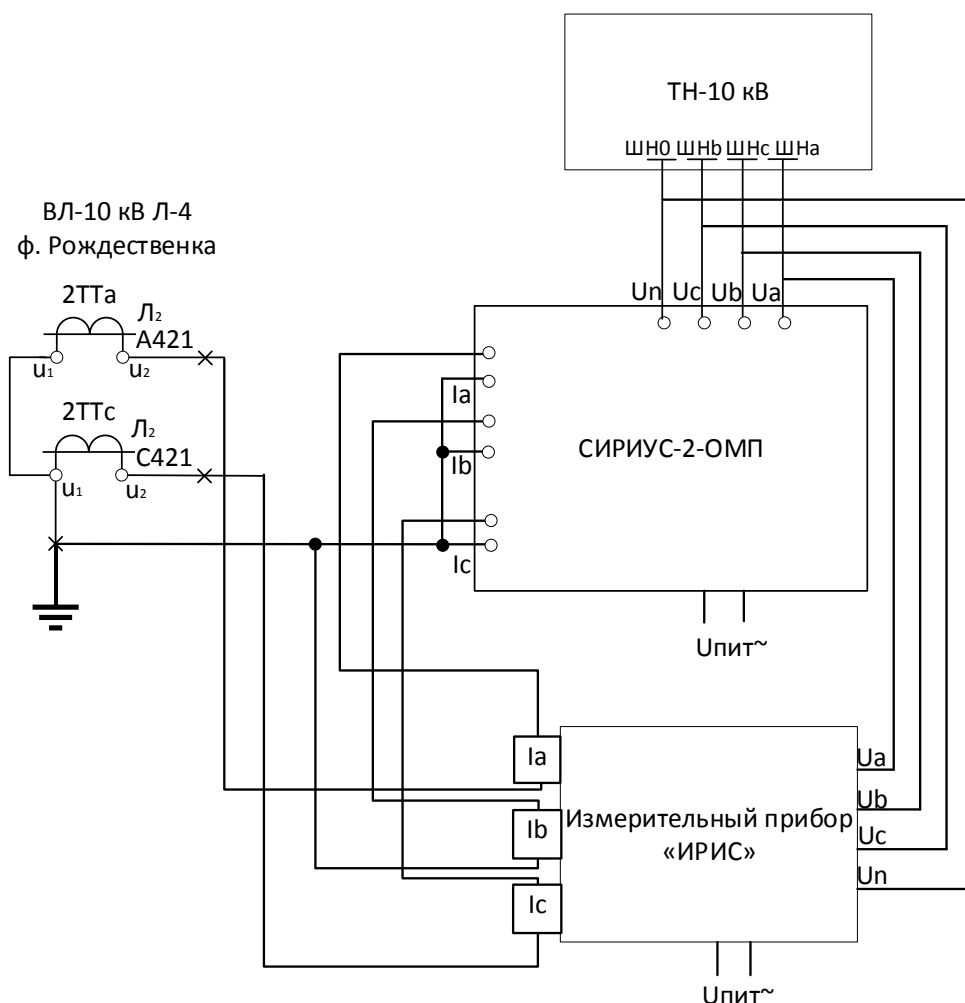


Рис. 6. Схема подключения ИРИС и Сириус-ОМП на ПС «Купель»

Fig. 6. Connection circuit of IRIS and Sirius-OMP devices at Kipel substation

Таблица 2. Фрагмент массива данных с цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии

Table 2. Dataset fragment from digital devices of quality control and electricity metering

Номер записи в массиве данных Dataset record number	Метка времени, мкс Time stamp, $\mu\text{s}$	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$u_a$	$u_b$	$u_c$
		о.е./пу					
1	0	1	-2	0	-1817	300	1525
2	1000	0	-3	-1	-1529	-356	1897
3	2000	0	-1	-1	-1057	-839	1895
4	3000	-2	-1	0	-459	-1439	1864
5...	4000	-1	-2	0	129	-1801	1605

В соответствии с табл. 2 интервал времени выборки анализируемого сигнала  $\Delta t=1000$  мкс, следовательно, верхний предел частоты в спектре анализируемого сигнала равен  $1/(2\Delta t)=500$  Гц. Результат применения к элементам выборки прямого преобразования Фурье приведён на рис. 7 в виде фазо-частотной характеристики (ФЧХ) отношения фазного напряжения к фазному току повреждённой воздушной линии электропередачи.

Из рис. 7 следует, что первая резонансная частота повреждённой фазы (b) воздушной линии электропередачи составляет  $f_{033}=79,602$  Гц.

Для вычисления резонансной частоты  $f_{рез}$  воздушной линии электропередачи в нормальном режиме работы разобьём воздушную линию электропередачи (рис. 5) на участки в зависимости от марки применяемого провода: участок 1 (провод АС-35) – опоры с номерами 1–77, участок 2 (провод А-50) – опоры с номерами 77–127, участок 3 (провод А-50) – от опоры номер 205 до КП-4-9, участок 4 (провод ПС-25) – опоры с номерами 127–207. Тип опор на каждом участке: ПС10П-27М. Результаты расчёта первичных параметров воздушной линии электропередачи по формулам табл. 1 сведены в табл. 3.



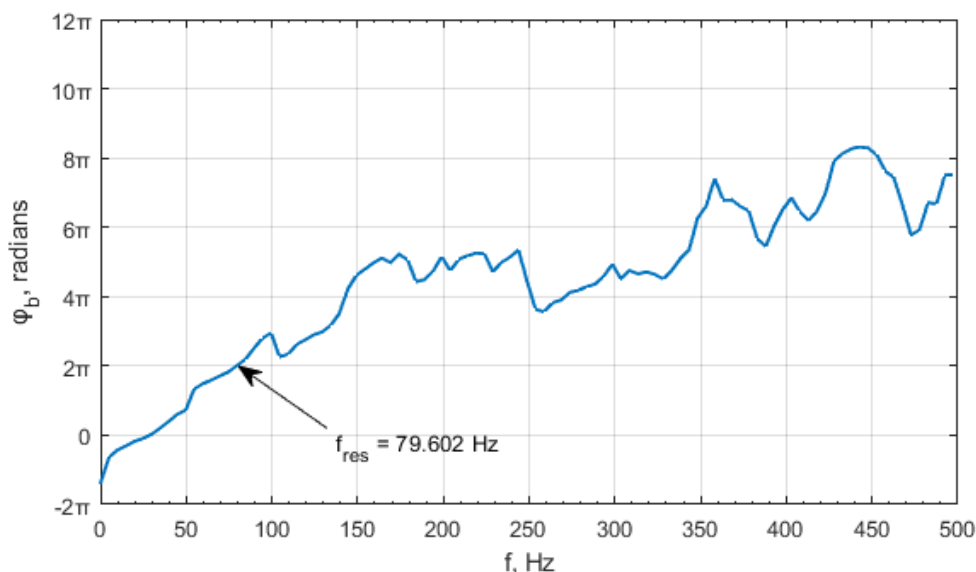


Рис. 7. ФЧХ отношения фазного напряжения к фазному току при ОЗЗ в точке К2: ТП 10 кВ КП 4-9 Зерноток

Fig. 7. Frequency ratio of phase voltage to phase current at phase-to-ground fault at point K2: 10 kV transformer substation Zernotok

Таблица 3. Результаты расчёта первичных параметров воздушной линии электропередачи

Table 3. Transmission line circuit parameters calculation results

	R, Ом/км (Ω/km)			L, мГн/км (mH/km)			C, нФ/км (nF/km)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
AC-35	0,826	0,049	0,049	2,615	1,262	1,322	7,314	-1,253	-1,523
	0,049	0,826	0,049	1,262	2,615	1,321	-1,253	7,166	-1,588
	0,049	0,049	0,826	1,322	1,321	2,615	-1,523	-1,588	7,447
A-50	0,627	0,049	0,049	2,610	1,262	1,322	7,386	-1,273	-1,549
	0,049	0,627	0,049	1,262	2,610	1,321	-1,273	7,235	-1,615
	0,049	0,049	0,627	1,322	1,321	2,610	-1,549	-1,615	7,522
ПС-25	5,659	0,049	0,049	2,666	1,262	1,322	7,102	-1,195	-1,448
	0,049	5,658	0,049	1,262	2,667	1,321	-1,195	6,961	-1,510
	0,049	0,049	5,659	1,322	1,321	2,666	-1,448	-1,510	7,225

Климатические факторы в районе проведения промышленных испытаний на 17.06.2021 г. следующие:  $t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p=751\text{ мм. рт. ст.}$ ,  $v=47\text{ \%}$ , удельное сопротивление грунта  $\rho=300\text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В соответствии с приведёнными величинами необходимо выполнить корректировку данных в табл. 3, согласно рис. 3 и формулам (2), а именно:

$$R_{\text{коррект}} = R \cdot \sum (1 + 0,00806) = R \cdot 1,00806;$$

$$L_{\text{коррект}} = L \cdot \sum (1 + 0,1255 + 0,00003382) = L \cdot 1,12553382;$$

$$C_{\text{коррект}} = C \cdot \sum (1 - 6,8644 \cdot 10^{-6} + 19,9884 \cdot 10^{-6} + 0,0000181) = C \cdot 1,000031224.$$

Из условия возникновения резонанса путём численного решения системы уравнений (1) с учётом климатических факторов по формулам (2) рассчитана ре-

зонансная частота в нормальном режиме работы воздушной линии электропередачи  $f_{\text{рез}}=79,127\text{ Гц}$ . Тогда в соответствии с формулой (3) расстояние до места возникновения ОЗЗ вдоль установленного ответвления воздушной линии электропередачи равно 14,334 км.

Результаты расчёта расстояния до места возникновения ОЗЗ в остальных точках воздушной линии электропередачи, указанных на рис. 5, сведены в табл. 4.

По итогу испытаний были произведены сравнения гармоник повреждённых фаз на данных с приборов «ИРИС» и «Сириус-2-ОМП». Массив записанных данных с приборов позволяет рассчитать величины напряжений обратной последовательности и выделить резонансные частоты, возникающие при переходном процессе вследствие ОЗЗ. Резонансные частоты позволяют определить расстояние до места повреждения воздушной линии в соответствии с разработанным способом.

Таблица 4. Результаты испытаний по определению расстояния до места повреждения линии согласно разработанному способу

Table 4. Transmission line phase-to-ground fault location test results by the developed method

Точка ОЗЗ/Phase-to-ground fault place	K1	K2	K3	K4
Расстояние до места ОЗЗ, км/Distance to phase-to-ground fault, km	14,404	14,334	5,372	0,00996
Абсолютная погрешность, м/Absolute error, m	96,1	85,8	27,9	0,038



### Заключение

На основании выполненной работы получены следующие результаты:

1. Разработанный способ определения места ОЗЗ воздушной линии электропередачи напряжением 6(10) кВ с изолированной нейтралью, основанный на определении первичных параметров воздушной линии электропередачи, скорректированных с учётом её конструктивных особенностей, изменений климатических факторов и удельного сопротивления грунта, позволяет получить требуемый технический результат, заключающийся в повышении надёжности электрических сетей и обеспечении потребителей электроэнергией требуемого качества.
2. Произведены промышленные испытания по апробации способа определения места повреждения ЛЭП напряжением 6(10) кВ с изолированной

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи / А.Я. Бигун, О.А. Сидоров, Д.С. Осипов, С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, Е.В. Петрова // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 8–17.
2. Зарипова С.Н., Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э. Работа электропередачи распределительной электрической сети напряжением 6–10 кВ в режиме длинной линии // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1–2. – С. 177–181.
3. Иванов И.Е. Оценка влияния различных факторов на значения сопротивлений и проводимостей высоковольтной воздушной линии электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 3. – С. 30–39.
4. Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниятуллин 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.
5. Оптимизация энергетических параметров в установившихся режимах электротехнических комплексов отходящих линий, подключенных к одному центру питания / Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, Е.В. Рюмин, А.Д. Махт // Энергетика Татарстана. – 2012. – Т. 1. – № 25. – С. 20–23.
6. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода раннего диагностирования однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / Г.В. Вагапов, А.М. Амосов, Н.В. Чернова, Л.И. Абдуллин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 89–92.
7. Nuthalapati B., Sinha U.K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – V. 14. – Iss. 22. – P. 483–489.
8. Nuthalapati B., Sinha U.K. Location of downed or broken power line fault not touching the ground // European Journal of Electrical Engineering. – 2019. – V. 21. – Iss. 1. – P. 7–10.
9. Swetapadma A., Chakrabarti S., Abdelaziz A.Y. Feasibility study of intelligent fault location estimation methods for double-circuit transmission lines // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2021. – V. 31. – Iss. 12. – № e13198. URL: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13198> (дата обращения 02.05.2023).
10. Taheri B., Salehimehr S., Sedighzadeh M. A fault-location algorithm for parallel line based on the long short-term memory model using the distributed parameter line model // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2021. – V. 31. – Iss. 11. – № e13032. URL: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13032> (дата обращения 02.05.2023).

нейтралью с имитацией однофазного короткого замыкания на землю. Получен массив данных с цифровых приборов контроля качества и учёта электроэнергии, определены величины напряжений обратной последовательности, частотные характеристики фазных напряжений, выделены резонансные частоты, возникающие при переходном процессе вследствие ОЗЗ, что позволяет установить ответвление воздушной линии электропередачи с ОЗЗ, а также расстояние до места его возникновения. Абсолютная погрешность определения расстояния до места ОЗЗ воздушной линии электропередачи по разработанному способу не превышает 1–2 пролётов воздушной линии электропередачи.

*Статья опубликована при грантовой поддержке Тюменского индустриального университета.*

11. Transient voltage measurements for overhead transmission lines and substations by metal-free and contactless integrated electro-optic field sensors / H. Wang, C. Zhuang, R. Zeng, X. Shijun, H. Jinliang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – V. 66. – Iss. 1. – P. 571–579.
12. Способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью: пат. 2655948 Российская Федерация № 2022135489; заявл. 31.12.2022; опубл. 19.04.2023. – 8 с.
13. Определение места обрыва линейных проводов воздушной линии по вторичному напряжению трансформаторных подстанций / В.В. Сушков, С.В. Сидоров, И.С. Сухачев, А.М. Газзов, В.Е. Кармазина // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Омск: ОмГТУ, 2018. – С. 41–44.
14. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: монография. – СПб: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
15. Солянов Ю.И., Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э. Частотные характеристики электропередачи распределительной электрической цепи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 9–10. – С. 177–183.
16. Mardiana R., Motairy H.A., Su C.Q. Ground fault location on a transmission line using high-frequency transient voltages // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – V. 26. – № 2. – P. 1298–1299.
17. Wang D., Hou M., Guo Y. Travelling wave fault location of HVAC transmission line based on frequency-dependent characteristic // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021. – V. 36. – Iss. 6. – P. 3496–3505.
18. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Technical Journal. – 1926. – V. 5. – Iss. 4. – P. 539–554.
19. Гольдштейн В.Г., Сайдова Н.В., Танаев А.К. Математическое моделирование продольных токов смещения и поверхностного эффекта в многослойной земле и проводах линий электропередачи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2004. – № 30. – С. 170–177.
20. Гольдштейн В.Г., Сайдова Н.В., Танаев А.К. Уточнённая математическая модель поверхностного эффекта в многослойной земле // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2003. – № 19. – С. 129–133.
21. Способ определения места повреждения воздушных линий в распределительных сетях: пат. 2647536 Российская Федерация № 2016145359; заявл. 18.11.2016; опубл. 16.03.2018, Бюл. № 8. – 11 с.
22. Способ определения места повреждения при коротких замыканиях на линии электропередачи переменного тока: пат. 2498330 Российская Федерация № 2012129228/28; заявл. 27.06.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 11 с.

23. Способ определения места повреждения линии электропередачи: пат. 2552388 Российская Федерация № 2013125429/28; заявл. 31.05.2013; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16. – 9 с.
24. Способ дистанционного определения места однофазного замыкания на землю: пат. 2637378 Российская Федерация № 2016125792; заявл. 28.06.2016; опубл. 04.12.2017, Бюл. № 34. – 14 с.
25. Солдатов В.А. Дистанционное определение места повреждения в распределительных электрических сетях 6–10–35 кВ // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. – 2018. – Т. 2. – № 47. – С. 391–397.
26. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Определение мест однофазных замыканий на землю воздушных линий электропередачи напряжением 6–35 кВ // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы Международной научно-практической конференции. – Альметьевск: АГНИ, 2018. – С. 16–21.
27. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
28. Abu-Siada A., Mosaad M.I., Mir S. Voltage-current technique to identify fault location within long transmission lines // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2020. – V. 14. – Iss. 23. – P. 5588–5596.
29. Ahsae M.G., Sadeh J. New fault-location algorithm for transmission lines including unified power-flow controller // Controller. IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27. – Iss. 4. – P. 1763–1771.
30. An integrated monitoring system and automatic data analysis to correlate lightning activity and faults on distribution networks / A.E. Lazzaretti, S.L. Franca Santos, K.K. Kuster, L.F. Ribeiro Barrozo Toledo, M.A. Ravaglio, A. Piantini, C.L. da Silva Pinto // Electric Power Systems Research. – 2017. – V. 153. – P. 66–72.
31. Anand A., Affijulla S. Hilbert-Huang transform based fault identification and classification technique for AC power transmission line protection // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2020. – V. 30. – Iss. 10. – № e12558. URL: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12558> (дата обращения 02.05.2023).
32. Ananthan S.N., Santoso S. Universal model-based fault location for improved system integrity // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2019. – V. 13. – Iss. 8. – P. 1212–1219.
33. Benato R., Rinzo G., Poli M. Overcoming the limits of the charge transient fault location algorithm by the artificial neural network // Energies. – 2019. – V. 12. – Iss. 4. – № 722. URL: <https://doi.org/10.3390/en12040722> (дата обращения 02.05.2023).
34. Dzafic I., Jabr R.A., Namas T. Locating ground faults in non-solidly grounded networks via nonlinear least-squares // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2020. – V. 121. – № 106038. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106038> (дата обращения 02.05.2023).
35. Traveling wave based fault location for power transmission lines using morphological filters and clarke modal components / E. Khoudry, A. Belfqih, J. Boukherouaa, F. Elmariami // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2020. – V. 10. – Iss. 2. – P. 1122–1134.
36. Fault location in overhead transmission line: A novel non-contact measurement approach for traveling wave-based scheme / P.O. Kwasi Anane, Q. Huang, O. Bamisile, P.N. Ayimbire // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2021. – V. 133. – № 107233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107233> (дата обращения 02.05.2023).
37. Valdes M., Papallo T., Premerlani B. Finding fault Locating a ground fault in low-voltage, high-resistance grounded systems via the single-processor concept for circuit protection // Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. – 2007. – V. 13. – P. 24–30.

Поступила 16.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 29.05.2023 г.

#### Информация об авторах

**Сушков В.В.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Сухачев И.С.**, кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего базовой кафедрой АО «СУЭНКО», доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Сидоров С.В.**, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.311

## DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE APPROACH TO DIAGNOSING THE OVERHEAD LINE FAULTS LOCATION IN SINGLE-PHASE GROUND FAULTS BASED ON A DIGITAL SUBSTATION DATA PROCESSING ALGORITHM

**Valery V. Sushkov<sup>1</sup>,**  
sushkovvv@gray-nv.ru

**Ilya S. Sukhachev<sup>1</sup>,**  
suhachevis@tyuiu.ru

**Sergey V. Sidorov<sup>1</sup>,**  
sidorovsv@tyuiu.ru

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

**Relevance.** Emergency of electric complex of outgoing transmission lines is associated with the occurrence of damage to the line isolation and the resulting transients, marked by the presence of higher harmonic components of currents and voltage, which reduce the reliability and energy efficiency of electrical equipment of oil and gas companies: degrade the mechanical characteristics and efficiency of electric motors, accelerate aging of their isolation, disrupt the operation of control systems and emergency automatics, fault diagnostics systems. One of the reasons of high-level emergency situations, outages and emergency repairs in electric complexes of outgoing transmission lines of oil and gas companies is appearance of phase-to-ground faults. A large number of changing factors are known to influence the reliability of phase-to-ground fault location methods: parameters of transmission line operating mode, its structural and electrical parameters, fault type, transient resistance value, ground resistance and others. Inclusion in the transmission line fault location algorithms of averaged values of a number of the factors listed above independent of changes of humidity of soil and air, its temperature and other factors causes an error of methods of fault location up to 30 %. Accordingly, the research to develop a fault location method for overhead transmission lines with isolated neutral points during phase-to-ground faults based on a digital substation data processing algorithm, accounting for tower parameters and natural-climatic factors, is relevant.

**Objective:** improving the reliability of power grids and providing consumers with power of the required standard by applying a digital fault location system to the outgoing transmission lines electrical complex.

**Methods:** mathematical analysis of a power transmission line, taking into account its design features and natural-climatic factors on the basis of the method of mirror images; mathematical analysis of steady-state and transient modes of transmission line operation considering self and mutual parameters terms of wires; transmission line currents and voltages Fourier analysis; validation of developed method of phase-to-ground fault location in power grid of Tyumen region energy company.

**Results.** The authors have developed the phase-to-ground faults location method for transmission lines in power grids with isolated neutral points, which differs in the following – first the faulty overhead line feeder branch is identified by correspondences between the negative sequence voltage values of the phase voltages at the transformer substation inputs, and then the distance to the location of the single-phase ground fault is determined along the branch line based on the resonant frequencies of the line taking into account its design features and natural-climatic factors.

### Key words:

Electrotechnical complex, power quality, power supply reliability, digital substation, math modeling, intelligent data processing complex.

*The research was carried out with the grant support of Tyumen Industrial University.*

### REFERENCES

- Bigun A.Ya., Sidorov O.A., Osipov D.S., Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V. Influence of regime and climatic factors on energy losses under non-stationary thermal conditions of power transmission lines. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 8–17.
- Zaripova S.N., Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E. The operation of the power transmission of the distribution electrical network with a voltage of 6–10 kV in the long line mode. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2012, no. 1–2, pp. 177–181. In Rus.
- Ivanov I.E. Assessment of the influence of various factors on the values of resistance and conductance of a high-voltage overhead power transmission line. *«Vestnik IGEU» journal*, 2017, no. 3, pp. 30–39. In Rus.
- Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R., Giniatullin R.A. Transient resistance influence on one-phase ground fault location in distribution grids with isolated neutral wire. *Bulletin of the Chuvash University*, 2019, no. 1, pp. 39–46. In Rus.
- Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V., Ryumin E.V., Makht A.D. Optimization of energy parameters in steady modes of electrical complexes of outgoing lines connected to the same power center. *Power industry of Tatarstan*, 2012, vol. 1, no. 25, pp. 20–23. In Rus.
- Vagapov G.V., Amosov A.M., Chernova N.V., Abdullin L.I. Experimental research of display of higher voltage harmonics of 0.4 kV of consumer substations as a method for early diagnosis of single phase earth fault in networks with isolated neutral. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*, 2014, no. 4, pp. 89–92. In Rus.
- Nuthalapati B., Sinha U.K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, vol. 14, no. 22, pp. 483–489.
- Nuthalapati B., Sinha U.K. Location of downed or broken power line fault not touching the ground. *European Journal of Electrical Engineering*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 7–10.
- Swetapadma A., Chakrabarti S., Abdelaziz A.Y. Feasibility study of intelligent fault location estimation methods for double-circuit transmission lines. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, vol. 31, no. 12, no. e13198. Available at: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13198> (accessed 2 May 2023).

10. Taheri B., Salehimehr S., Sedighzadeh M. A fault-location algorithm for parallel line based on the long short-term memory model using the distributed parameter line model. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, vol. 31, no. 11, no. e13032. Available at: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13032> (accessed 2 May 2023).
11. Wang H., Zhuang C., Zeng R., Shijun X., Jinliang H. Transient voltage measurements for overhead transmission lines and substations by metal-free and contactless integrated electro-optic field sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 571–579.
12. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu vozdushnykh liniy elektropredachi v elektricheskikh setyakh s izolirovannoy neytralyu* [Method for determining the location of a single-phase ground fault of overhead power lines in electrical networks with isolated neutral]. Patent RF, no. 2022135489, 2023.
13. Sushkov V.V., Sidorov S.V., Sukhachev I.S., Gayazov A.M., Karmazina V.E. Opredelenie mesta obryva lineynykh provodov vozdushnoy linii po vtorichnomu napryazheniyu transformatornykh podstantsiy [Determining the location of a break in the linear wires of an overhead line by the secondary voltage of transformer substations]. *Aktualnye voprosy energetiki. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Current issues of energy. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Omsk, OmSTU Publ., 2018. pp. 41–44.
14. Shabad M.A. *Raschety releyonoy zashchity i avtomatiki raspredelitelnykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. St Petersburg, Federal State educational establishment Publ., 2003. 350 p.
15. Soluyanov U.I., Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E. Frequency characteristics of the electricity transmission line of the distributive electrical grid. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2011, no. 9–10, pp. 177–183. In Rus.
16. Mardiana R., Motairi H.A., Su C.Q. Ground fault location on a transmission line using high-frequency transient voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 1298–1299.
17. Wang D., Hou M., Guo Y. Travelling wave fault location of HVAC transmission line based on frequency-dependent characteristic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, vol. 36, no. 6, pp. 3496–3505.
18. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell System Technical Journal*, 1926, vol. 5, no. 4, pp. 539–554.
19. Goldstein V.G., Saidova N.V., Tanaev A.K. Mathematical modeling of longitudinal displacement currents and surface effect in multilayer earth and wires of power lines. *Journal of Samara state technical university. Ser. Physical and mathematical sciences*, 2004, no. 30, pp. 170–177. In Rus.
20. Goldstein V.G., Saidova N.V., Tanaev A.K. Refined mathematical model of the surface effect in multilayer ground. *Journal of Samara state technical university. Ser. Physical and mathematical sciences*, 2003, no. 19, pp. 129–133. In Rus.
21. Oshchepkov V.A., Boldyrev I.V., Vladimirov L.V., Dolinger S.Yu. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdushnykh liniy v raspredelitelnykh setyakh* [Method of determining the place of damage to airlines in distribution networks]. Patent RF, no. 2647536, 2018.
22. Lozinova N.G., Mazurov M.I., Ivanova E.A. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya pri korotkikh zamykaniyakh na linii elektropredachi peremennogo toka* [Method to detect area of damage in case of short circuits on ac power transmission line]. Patent RF, no. 2498330, 2013.
23. Kulikov A.L., Obalin M.D. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektropredachi* [Method for localising damaged point of power transmission lines]. Patent RF, no. 2552388, 2015.
24. Filatova G.A., Shuin V.A., Gandzhaev D.I. *Sposob distantsionnogo opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu* [Method of remote determination of single phase-to-ground-fault location]. Patent RF, no. 2637378, 2017.
25. Soldatov V.A. Distant definition of the place of damage to distributive electrical networks of 6–10–35 kV. *Bulletin of the Kyrgyz national agrarian university named after n. K.I. Scryabin*, 2018, vol. 2, no. 47. pp. 391–397. In Rus.
26. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Chernova N.V. Opredelenie mest odnofaznykh zamykaniy na zemlyu vozdushnykh liniy elektropredachi napryazheniyem 6–35 kV [Determining the places of single-phase short circuits to the ground of overhead power lines with a voltage of 6–35 kV]. *Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoy otrasli. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Achievements, problems and prospects for the development of the oil and gas industry. Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Almeteyevsk, AGNI Publ., 2018. pp. 16–21.
27. Shalyt G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh* [Determining fault locations in electrical networks]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 312 p.
28. Abu-Siada A., Mosaad M.I., Mir S. Voltage-current technique to identify fault location within long transmission lines. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2020, vol. 14, no. 23, pp. 5588–5596.
29. Ahsae M.G., Sadeh J. New fault-location algorithm for transmission lines including unified power-flow controller. *Controller. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 4, pp. 1763–1771.
30. Lazzaretti A.E., Franca Santos S.L., Kuster K.K., Ribeiro Barrozo Toledo L.F., Ravaglio M.A., Piantini A., da Silva Pinto C.L. An integrated monitoring system and automatic data analysis to correlate lightning activity and faults on distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 153, pp. 66–72.
31. Anand A., Affijulla S. Hilbert-Huang transform based fault identification and classification technique for AC power transmission line protection. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, vol. 30, no. 10, no. e12558. Available at: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12558> (accessed 2 May 2023).
32. Ananthan S.N., Santoso S. Universal model-based fault location for improved system integrity. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2019, vol. 13, no. 8, pp. 1212–1219.
33. Benato R., Rinzo G., Poli M. Overcoming the limits of the charge transient fault location algorithm by the artificial neural network. *Energies*, 2019, vol. 12, Iss. 4, no. 722. Available at: <https://doi.org/10.3390/en12040722> (accessed 2 May 2023).
34. Dzafic I., Jabr R.A., Namas T. Locating ground faults in non-solidly grounded networks via nonlinear least-squares. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, vol. 121, no. 106038. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106038> (accessed 2 May 2023).
35. Khoudry E., Belfiqh A., Boukheroua J., Elmariami F. Traveling wave based fault location for power transmission lines using morphological filters and Clarke modal components. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 1122–1134.
36. Kwasi Anane P.O., Huang Q., Bamisile O., Ayimbire P.N. Fault location in overhead transmission line: a novel non-contact measurement approach for traveling wave-based scheme. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, vol. 133, no. 107233. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107233> (accessed 2 May 2023).
37. Valdes M., Papallo T., Premerlani B. Finding fault Locating a ground fault in low-voltage, high-resistance grounded systems via the single-processor concept for circuit protection. *Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, 2007, vol. 13, pp. 24–30.

Received: 16 May 2023.

Reviewed: 29 May 2023.

#### Information about the authors

**Valery V. Sushkov**, Dr. Sc., professor, Tyumen Industrial University.

**Ilya S. Sukhachev**, Cand. Sc., associate professor, Tyumen Industrial University.

**Sergey V. Sidorov**, senior lecturer, Tyumen Industrial University.