

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК (621.315.1)

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ЗАЗЕМЛЕННЫМ ГРОЗОЗАЩИТНЫМ ТРОСОМ ПУТЁМ РЕШЕНИЯ КВАДРАТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Куликов <sup>1</sup>А.Л., Федосов <sup>2</sup>Д.С., Чернеев <sup>1</sup>П.П.

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия  
paulchereen@yandex.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Методы определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) высокого напряжения основаны на допущении резистивности сопротивления повреждения, что является некорректным по отношению к линиям, оснащенным заземленным грозозащитным тросом. При решении задачи ОМП на линиях с заземленным грозозащитным тросом следует учитывать особенности, связанные с возникновением реактивной составляющей переходного сопротивления повреждения при коротких замыканиях на землю. **ЦЕЛЬ.** Повышение точности ОМП, обеспечение устойчивости одностороннего ОМП к реактивной составляющей сопротивления повреждения. **МЕТОДЫ.** Предлагаемый алгоритм ОМП, основанный на решении системы квадратных уравнений, был исследован путем имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В проведенных модельных экспериментах предлагаемый алгоритм показывает значительное повышение точности по сравнению с существующими методами ОМП. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработанный метод одностороннего ОМП по ПАР обеспечивает устойчивость к реактивной составляющей повреждения, а ошибки расчета расстояния до места повреждения не превысили 1% от длины ВЛ. Реализация метода возможна путем модернизации программного обеспечения устройств ОМП и терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА).

**Ключевые слова:** определение места повреждения; воздушная линия электропередачи; грозозащитный трос.

**Для цитирования:** Куликов А.Л., Федосов Д.С., Чернеев П.П. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи с заземленным грозозащитным тросом путём решения квадратных уравнений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 26-36. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36.

## FAULT-LOCATION ON HIGH-VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES WITH A GROUNDED GROUND WIRE BY SOLVING QUADRATIC EQUATION

Kulikov<sup>1</sup> A.L., Fedosov<sup>2</sup> D.S., Cherneev<sup>1</sup> P.P.

<sup>1</sup>R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University,  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia  
paulchereen@yandex.ru

**Abstract:** *OBJECT.* High-voltage overhead power lines (HVOPL) are the most vulnerable objects in the path of electrical energy system. Damage to HVOPL is the most common cause of

*disruptions in normal operation. For relay protection and automation (RPA) devices, one of the important functions is fault location (FL). Accurate fault location enables the restoration of normal operation in the shortest possible time and with minimal costs. The greatest influence on the accuracy of FL methods is exerted by random factors characterized by damage parameters. Existing one-end impedance-based fault location methods based are implemented under the assumption of resistivity of the resistance at the fault site. It is not applicable for ground faults, which are the most common type of damage on overhead transmission lines. METHODS. The article proposes a fault location (FL) algorithm based on solving Kirchhoff's voltage law equation for the closed loop using quadratic equations. RESULTS. The proposed FL algorithm was tested on the simulation models of overhead transmission lines of the Nizhny Novgorod region. In all conducted tests, the algorithm demonstrated an error of no more than 1%. CONCLUSIONS. The proposed one-end impedance-based fault location algorithm ensures robustness against the reactive component of the fault resistance. The high accuracy of the proposed method is confirmed by test results on simulation models. The algorithm is versatile and can be applied to both power lines with a grounded ground wire and lines without a grounded ground wire, regardless of the type of fault.*

**Keywords:** *fault-location; high-voltage overhead power lines; grounded ground wire.*

**For citation:** Kulikov A.L., Fedosov D.S., Cherneev P.P. Fault-location on high-voltage overhead power lines with a grounded ground wire by solving quadratic equation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 26-36. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-26-36.

#### **Введение (Introduction)**

Линии электропередачи (ЛЭП) являются одними из ключевых объектов в электроэнергетических системах. Постоянный рост потребляемой электрической энергии приводит к расширению электроэнергетических систем, и, как следствие, увеличению количества ЛЭП. В то же время рынок электроэнергии требует более надежного и качественного электроснабжения, что особенно актуально при глобализации интеллектуальных и компьютерных технологий.

Высокие требования к качеству и надежности электроснабжения определяют со стороны потребителя дополнительный запрос об удержании темпов роста стоимости электрической энергии. Таким образом, для поставщика, в условиях ограниченных ресурсов и необходимости снижения затрат на передачу электроэнергии, также необходимо стремиться к обеспечению надёжности электроснабжения потребителей.

ЛЭП являются наиболее уязвимыми объектами на пути передачи электрической энергии от поставщика к потребителю. Повреждения на ЛЭП являются наиболее распространенной причиной нарушения нормального режима работы электрических сетей. Для устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), контролирующих ЛЭП, одной из важных функций является определение их места повреждения (ОМП). Точное ОМП позволяет в кратчайшие сроки и с минимальными затратами восстановить нормальный режим работы электроэнергетической системы.

Наиболее распространенными причинами повреждений на воздушных ЛЭП (ВЛ) являются: грозовые перекрытия; механические повреждения линейной арматуры; загрязнение, износ и устаревание изоляции; падения деревьев на провода; перекрытие ЛЭП строительными машинами и механизмами и другие.

Неустойчивый характер повреждений, непредсказуемость причин и мест коротких замыканий (КЗ) осложняет задачу ОМП на ВЛ. В основе устройств ОМП лежат различные принципы и алгоритмы. Применение топографических методов затруднительно в связи с затратами на обход трассы ВЛ линейной бригадой; применение волновых методов затруднительно ввиду высокой стоимости устройств ОМП; применение односторонних методов по параметрам аварийного режима (ПАР) требует повышения их точности, а применение двухсторонних методов по ПАР связано с более высокими капитальными затратами.

Учитывая особенности различных методов ОМП, одним из наиболее перспективных направлений является усовершенствование односторонних методов ОМП по ПАР. Двухсторонние методы демонстрируют более высокую точность по сравнению с односторонними, но затраты на два устройства ОМП и организацию канала связи, а также потенциальные нарушения в работе, связанные с задержками в передаче информации с

противоположного конца линии или выводом в ремонт одного из двух устройств, ограничивают их применение.

Наибольшее влияние на точность методов ОМП по ПАР оказывают случайные факторы, характеризующиеся параметрами повреждения, сети и ВЛ. К таким факторам относятся: переходное сопротивление в месте повреждения, параметры системы удаленного конца (расхождение фаз ЭДС питающих систем, сопротивление систем), неоднородность линий (взаимоиндукция параллельных линий, наличие ответвлений) и другие.

Существующие методы одностороннего ОМП по ПАР реализованы с допущением о резистивности переходного сопротивления в месте повреждения. Такой подход справедлив при междуфазных КЗ без земли. Однако, указанное допущение не соблюдается на ЛЭП с заземленным грозозащитным тросом (ГТ) для однофазных и двухфазных КЗ на землю, которые являются наиболее распространенным видом повреждений.

Большая часть ВЛ высокого напряжения оборудованы ГТ с встроенным в него оптическим кабелем связи. Для таких линий регламентировано заземление ГТ на каждой опоре. Наличие заземленного грозозащитного троса на ВЛ при КЗ на землю приводит к возникновению дополнительной реактивной составляющей переходного сопротивления в месте повреждения. Это связано с активно-индуктивным сопротивлением троса, индуктивная составляющая которого определяется его удельными параметрами и геометрическим расположением относительно земли и фазных проводов. Например, при однофазных КЗ на землю ток нулевой последовательности может протекать по цепи от источника питания по земле, заземляющему устройству опоры, телу опоры и ГТ, в случае его заземления на опоре, далее к месту повреждения. Реактивная составляющая сопротивления повреждения может быть достаточно большой, и, в случае ее пренебрежения, точность метода ОМП значительно снижается.

В работе [1] отмечено снижение точности ОМП до 10% и более при применении существующих методов на ВЛ с заземленным ГТ. В работе [2] указано на снижение точности односторонних методов ОМП при однофазных КЗ на ВЛ с заземленным ГТ, в начале ЛЭП характерна погрешность в 5-7%, в середине ЛЭП – 15-20%, в конце ЛЭП – 50-60%.

Цель исследования – разработка алгоритма ОМП на ВЛ, обеспечивающего устойчивость расчета расстояния до места КЗ к реактивной составляющей сопротивления повреждения.

Научная значимость исследования заключается в усовершенствовании односторонних методов ОМП по ПАР при их применении на ВЛ с заземленным ГТ.

Практическая значимость включает разработку точного алгоритма ОМП для ВЛ с заземленным ГТ, а также формирование расчетных соотношений для реализации в составе программного обеспечения терминалов ОМП и РЗА.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

Специфика одностороннего ОМП по ПАР заключается в использовании значений расчетных параметров токов и напряжений, определенных только со стороны ВЛ в месте установки устройства ОМП.

Большинство односторонних методов ОМП по ПАР основано на использовании одной из трёх величин (функций): реактивного сопротивления до места повреждения, распределения реактивной мощности вдоль линии, итерационный расчет расстояния до места повреждения по ПАР. Методы, в основе которых используются первые две величины, наиболее широко применимы в устройствах ОМП отечественных производителей.

Для формирования соотношений для расчёта расстояния до места повреждения, как правило, применяется схема замещения поврежденной линии согласно рисунку 1. Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура с передающей стороны (стороны S на рисунке 1)

$$V_{sf} = m \cdot Z_{L1} \cdot I_{sf} + Z_f \cdot I_f, \quad (1)$$

где  $V_{sf}$ ,  $I_{sf}$  – напряжение и ток в месте замера;  $m$  – коэффициент, характеризующий расстояние до места повреждения (лежит в интервале от 0 до 1);  $Z_{L1}$  – сопротивление линии до места повреждения;  $I_f$  – ток в месте повреждения;  $Z_f$  – переходное сопротивление в месте повреждения.

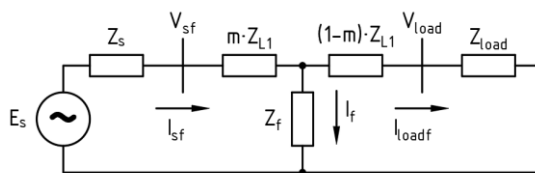


Рис. 1. Схема замещения поврежденной линии  $S$  – передающая сторона,  $load$  – нагрузка,  $f$  – повреждение

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Уравнение (1) не может быть решено, поскольку количество неизвестных ( $m$ ,  $I_f$ ,  $Re(Z_f)$ ,  $Im(Z_f)$ ) равно четырем. Дальнейшие способы исключения неизвестных из уравнения (1) и методы его решения определяют различные алгоритмы ОМП ЛЭП по ПАР. Практически во всех существующих методах принимают, что отсутствует реактивная составляющая переходного сопротивления ( $Im(Z_f)=0$ ) в месте повреждения, что существенно упрощает решение уравнения (1).

При решении задачи ОМП ВЛ по ПАР широко применяется имитационное моделирование. Например, в работе [3] предлагается использование цифровых трансформаторов тока и напряжения, оснащенных блоком имитационного моделирования повреждений на линиях. Модель содержит в себе значения физических факторов, оказывающих влияние на точность ОМП, которые задаются по методу Монте-Карло. Расстояние до места повреждения определяется с помощью интервальной оценки.

В работе [4] предложен метод интервального определения места повреждения, основанный на многомерном подходе. Используя модель линии, сопоставляются наблюдаемые токи и напряжения в линии с токами и напряжениям в предполагаемом месте повреждения. Наблюдаемые ПАР преобразуются в комплексы токов и напряжений в потенциальных местах повреждений, затем получают комплексы основного и дополнительного замера. Место повреждения фиксируется при условии попадания отображений обоих замеров в соответствующим им области.

Метод ОМП ВЛ [5] основан на имитационном моделировании с последующим сопоставлением параметров реальных и моделируемых объектов. После проведения моделирования вычисляют ошибки между наблюдаемыми и моделируемыми токами и напряжениями. Место повреждения определяется минимальным значением ошибки между моделируемыми и реальными аварийными параметрами.

В статье [6] предложен метод ОМП, основанный на проведении моделирования и последующем сопоставлении моделируемых и аварийных параметров ВЛ путём расчета расстояния Махаланобиса. При моделировании создают базу данных о повреждениях и соответствующих ошибках методов ОМП. В случае повреждения на ЛЭП, линию разбивают на участки установленной длины, формируют корреляционную матрицу ошибок и вычисляют расстояние Махаланобиса для каждого участка. Наименьшее расстояние будет соответствовать отрезку линии, в пределах которого лежит искомое место повреждения.

К достоинствам методов ОМП, основанных на имитационном моделировании, можно отнести более высокую точность и многокритериальный подход, который позволяет учесть множественные взаимосвязи параметров линии, сети и повреждения. К недостаткам можно отнести необходимость проведения большого количества итераций моделирования для составления корректных баз данных о параметрах защищаемого объекта при различных повреждениях, а также вычислительная сложность.

Развитие современных компьютерных технологий позволяет применять интеллектуальные методы для решения задачи ОМП.

В работе [7] испытана модель искусственной нейронной сети для ОМП на ВЛ большой длины. Модель основана на анализе данных о повреждениях в некотором количестве характерных точек с помощью искусственной нейронной сети.

В [8] рассмотрено применение для ОМП ВЛ алгоритма байесовской регуляризации в искусственной нейронной сети с целью обеспечения требуемой точности. Байесовская регуляризация позволяет учесть неопределённости в результате обучения нейронной сети.

В работе [9] описан метод ОМП на основе графовых нейронных сетей. Графовая нейронная сеть позволяет определять состояние узлов энергосистемы путём создания многомерных векторов-признаков и объединять отношения смежности между узлами.

В статье [10] представлен обзор применения подходов глубокого обучения для решения задачи ОМП и диагностики ВЛ. Рассмотрены исследования при применении сверточных нейронных сетей (CNNs), рекуррентных сетей (LSTM/GRU), механизмов генеративных моделей в задаче ОМП и диагностике линий.

В статье [11] предлагается интеграция принципов доказательства идентичности (Proof of Identity, PoID) в методы локализации места повреждения. Модели идентичности связывают с повреждением посредством создания уникальных функций, характеризующих повреждение путём синтеза электрических, пространственных и временных характеристик.

Однако, применение методов искусственного интеллекта на предприятиях электрических сетей требует квалифицированного персонала, а также больших временных и вычислительных затрат. Важно, что реализация таких методов затруднительна в терминалах релейной защиты и других устройствах, включающих функцию ОМП ВЛ.

Поэтому актуальной является задача совершенствования более простых расчетных способов ОМП ВЛ, обеспечивающих требуемую точность и эффективную их реализацию в терминалах защиты и автоматики в виде компонентов специального программного обеспечения. Одно из решений такой задачи основывается на модификации расчетных соотношений для предполагаемого места повреждения ВЛ и характеризуется использованием квадратных уравнений.

#### *Материалы и методы (Materials and methods)*

Предлагаемый алгоритм представляет собой модернизацию метода [12]. При этом осуществляется приведение равенства (1) к форме квадратного уравнения, а также введение в расчеты величин сопротивления источника и нагрузки, исходя из замеров токов и напряжения в моменты до и после повреждения (4).

При реализации предлагаемого метода переходное сопротивление в месте повреждения принимается полным, включая активную и реактивную составляющую. Затем, выделяя действительную и мнимую части, исключим неизвестные составляющих переходного сопротивления и получим квадратное уравнение относительно расстояния до места повреждения.

В уравнении (1) заменим активное переходное сопротивление на полное переходное сопротивление в месте повреждения.

$$V_{sf} = m \cdot Z_{L1} \cdot I_{sf} + (R_f + jX_f) \cdot I_f, \quad (2)$$

где  $R_f = Re(Z_f)$ ,  $X_f = Im(Z_f)$ .

Уравнение (2) содержит четыре неизвестных переменных: ток в месте повреждения, активную и реактивную составляющие переходного сопротивления и коэффициент, характеризующий расстояние до места повреждения.

Ток в месте замыкания может быть выражен через токи нулевой последовательности, чисто аварийный ток и ток обратной последовательности [13], таким образом одна неизвестная будет исключена.

Ток в месте замыкания выразим через ток нулевой последовательности. Коэффициент токораспределения нулевой последовательности имеет вид:

$$d_0 = \frac{Z_{load0} + (1 - m) \cdot Z_{L0}}{Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0}}, \quad (3)$$

где  $Z_{load0}$  – сопротивление нулевой последовательности нагрузки;  $Z_{L0}$  – сопротивление нулевой последовательности линии,  $Z_{S0}$  – сопротивление нулевой последовательности источника.

Расчет сопротивления нагрузки ( $Z_{load}$ ) и сопротивления источника ( $Z_s$ ) выполняется с использованием известных параметров линии, а также значений тока и напряжения до ( $I_{ps}, V_{ps}$ ) и после ( $I_{sf}, V_{sf}$ ) повреждения:

$$Z_{load} = \frac{V_{ps}}{I_{ps}} - Z_{L1}, \quad Z_s = -\frac{V_{sf} - V_{ps}}{I_{sf} - I_{ps}}. \quad (4)$$

Учитывая выражение (3) уравнение (2) принимает вид

$$V_{sf} = m \cdot Z_{L1} \cdot I_{sf} + Z_f \cdot I_0 \cdot \frac{Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0}}{Z_{load0} + (1 - m) \cdot Z_{L0}}. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5) к виду квадратного уравнения относительно переменной  $m$ .

$$m^2 - m \cdot \left( \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} + \frac{Z_{load0}}{Z_{L0}} + 1 \right) + \frac{V_{sf} \cdot Z_{load0}}{Z_{L1} \cdot I_{sf} \cdot Z_{L0}} + \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} - Z_f \cdot I_0 \cdot \frac{(Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0})}{Z_{L1} \cdot I_{sf} \cdot Z_{L0}} = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) введем следующие коэффициенты:

$$k_4 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} + \frac{Z_{load0}}{Z_{L0}} + 1, k_5 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} \cdot \left( \frac{Z_{load0}}{Z_{L0}} + 1 \right), k_6 = I_0 \cdot \frac{(Z_{S0} + Z_{load0} + Z_{L0})}{Z_{L1} \cdot I_{sf} \cdot Z_{L0}}. \quad (7)$$

Аналогичным образом выполним преобразования, используя коэффициент токораспределения прямой последовательности. Тогда расчетные коэффициенты примут следующий вид:

$$k_1 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} + \frac{Z_{load1}}{Z_{L1}} + 1, k_2 = \frac{V_{sf}}{Z_{L1} \cdot I_{sf}} \cdot \left( \frac{Z_{load1}}{Z_{L1}} + 1 \right), k_6 = \frac{\Delta I_s}{I_{sf} \cdot Z_{L1}} \cdot \left( \frac{Z_{S1} + Z_{load1}}{Z_{L1}} + 1 \right). \quad (8)$$

где  $\Delta I_s$  – чисто аварийный ток, определяется как разница между током аварийного режима и током нормального режима работы.

Тогда целесообразно составить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} m^2 - m \cdot k_1 + k_2 - k_3 \cdot Z_f = 0, \\ m^2 - m \cdot k_4 + k_5 - k_6 \cdot Z_f = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В таком виде система неразрешима, поскольку имеет три неизвестных при двух уравнениях. Выделим в каждом уравнении действительную и мнимую часть для получения системы из четырёх уравнений:

$$\begin{cases} m^2 - m \cdot \text{Re}(k_1) + \text{Re}(k_2) - (\text{Re}(k_3) \cdot R_f - \text{Im}(k_3) \cdot X_f) = 0, \\ -m \cdot \text{Im}(k_1) + \text{Im}(k_2) - (\text{Re}(k_3) \cdot X_f + \text{Im}(k_3) \cdot R_f) = 0, \\ m^2 - m \cdot \text{Re}(k_4) + \text{Re}(k_5) - (\text{Re}(k_6) \cdot R_f - \text{Im}(k_6) \cdot X_f) = 0, \\ -m \cdot \text{Im}(k_4) + \text{Im}(k_5) - (\text{Re}(k_6) \cdot X_f + \text{Im}(k_6) \cdot R_f) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Выразим переменную  $X_f$  из второго и четвертого равенств системы. Подставим в первое и третье равенство системы, таким образом получим систему с двумя уравнениями. Данные уравнения приводим к виду квадратных посредством ввода коэффициентов

$$a_1 \cdot m^2 + b_1 \cdot m + c_1 + d_1 \cdot R_f = 0, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \text{Re}(k_3), \quad b_1 = -(\text{Re}(k_1) \cdot \text{Re}(k_3) + \text{Im}(k_1) \cdot \text{Im}(k_3)), \\ c_1 &= \text{Im}(k_2) \cdot \text{Im}(k_3) + \text{Re}(k_2) \cdot \text{Re}(k_3), \quad d_1 = -((\text{Re}(k_3))^2 + (\text{Im}(k_3))^2). \end{aligned} \quad (12)$$

и

$$a_2 \cdot m^2 + b_2 \cdot m + c_2 + d_2 \cdot R_f = 0, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= \text{Re}(k_6), \quad b_2 = -(\text{Re}(k_4) \cdot \text{Re}(k_6) + \text{Im}(k_4) \cdot \text{Im}(k_6)), \\ c_2 &= \text{Im}(k_5) \cdot \text{Im}(k_6) + \text{Re}(k_5) \cdot \text{Re}(k_6), \quad d_2 = -((\text{Re}(k_6))^2 + (\text{Im}(k_6))^2). \end{aligned} \quad (14)$$

Для решения системы из двух уравнений исключаем переменную  $R_f$  путем вычитания одного уравнения из другого

$$a \cdot m^2 + b \cdot m + c = 0, \quad (15)$$

где

$$a = d_2 \cdot a_1 - d_1 \cdot a_2, \quad b = d_2 \cdot b_1 - d_1 \cdot b_2, \quad c = d_2 \cdot c_1 - d_1 \cdot c_2. \quad (16)$$

Находим корни уравнения (15). Из полученных корней выбираем только один корень уравнения, лежащий на отрезке от 0 до 1, а расстояние до места повреждения определяем по формуле:

$$L_k = m \cdot L, \quad (17)$$

где  $L$  – длина ЛЭП.

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма ОМП и определены основные операции:

1. Определение и ввод исходных параметров сети и линии: длина; полные продольные сопротивления прямой и нулевой последовательности.
2. Регистрация аварийной осциллограммы. Запись параметров аварийного режима.
3. Расчет сопротивления нагрузки и сопротивления питающей системы.
4. Реализация алгоритма ОМП:
  - Расчет коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  по формулам из уравнений (7) и (8).
  - Расчет коэффициентов по формулам (12), (14) и (16).
  - Решение квадратного уравнения (15).
  - Выбор корня, исходя из условия:  $0 < m < 1$ .
  - Расчет расстояния до места повреждения по формуле (17).
5. Вывод полученного расстояния до места повреждения.

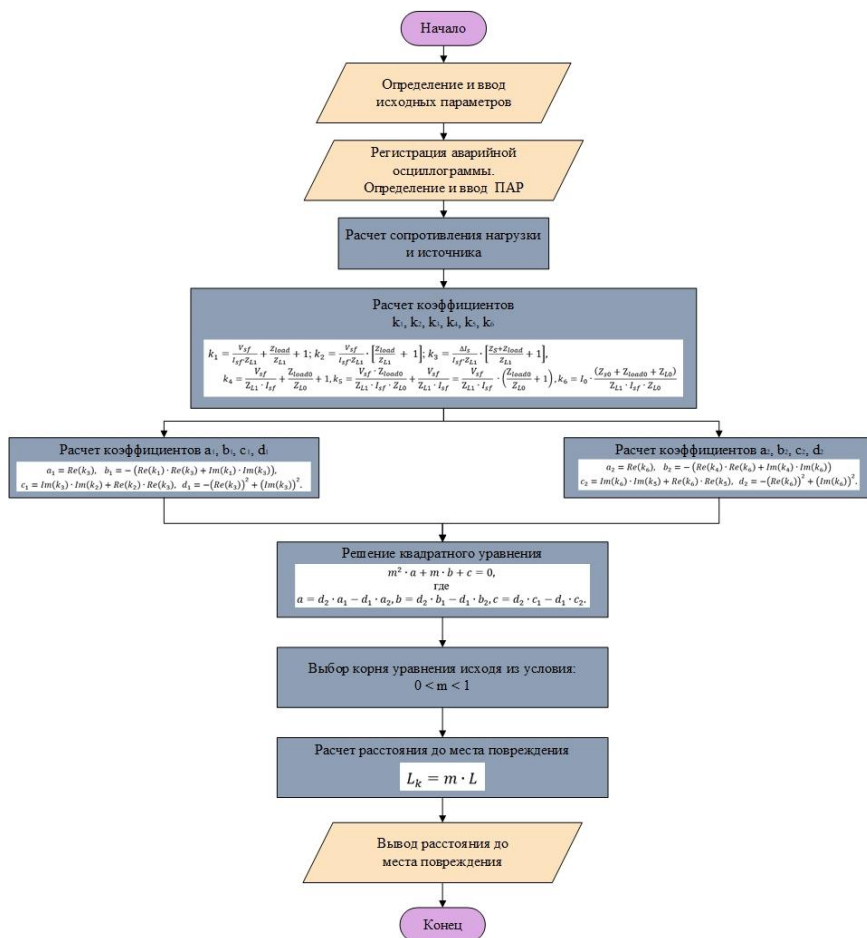


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Fig. 2. Flowchart of the algorithm

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

**Результаты (Results)**

Для оценки эффективности предлагаемого метода разработана модель одноцепной тупиковой ВЛ с ГТ в программной комплексе MATLAB/Simulink. Имитационная модель линии с заземленным ГТ приведена на рисунке 3.

Линия представлена четырехпроводной, учитывая три фазных провода и грозотрос. В начале и конце линии грозотрос заземлен наглухо, на промежуточных участках грозотрос заземлен через искровой промежуток.

Для испытаний на модели разработан скрипт-файл, выполняющий расчеты ОМП различными методами.

В качестве примера рассмотрим ряд однофазных КЗ, выполненных на модели линии со следующими параметрами: длина ЛЭП – 100 км. Напряжение линии – 110 кВ. Марка провода – АС 150/24. Марка грозозащитного троса – С70. В месте КЗ искровой промежуток пробит. Активная составляющая сопротивления повреждения изменялась в диапазоне от 10 Ом до 14 Ом, реактивная составляющая изменялась в диапазоне от 1 Ом до 4 Ом, в зависимости от места повреждения.

Результаты расчета расстояния до места повреждения по различным алгоритмам сведены в таблицу 1.

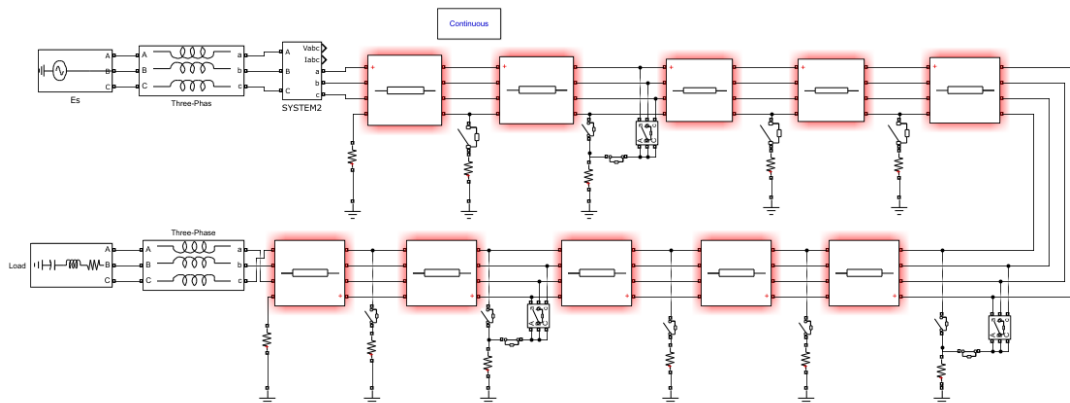


Рис. 3. Имитационная модель ВЛ

Fig. 3. The simulation model

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Результаты расчета расстояния до места повреждения приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Результаты ОМП моделируемой ВЛ  
WMD results of the simulated overhead line

Расстояние до места повреждения, км	Относительная погрешность метода ОМП, %				
	L-метр [14]	Метод Wiszniewski [15]	Метод Аржанникова [13]	Метод Висячева [14]	Предлагаемый метод
10	2,97	0,93	1,28	3,85	0,01
20	3,74	1,57	1,78	4,72	0,01
30	4,76	2,45	2,48	5,85	0,01
40	6,15	3,69	3,51	7,35	0,01
50	8,07	5,49	5,05	9,35	0,01
60	10,78	8,16	7,46	12,07	0,03
70	14,65	12,16	11,34	15,81	0,06
80	20,17	18,18	17,67	20,94	0,13
90	27,74	26,77	27,44	27,83	0,22

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Согласно таблице 1, предложенный алгоритм демонстрирует значительное повышение точности ОМП ВЛ. Максимальная абсолютная ошибка составила 220 м (или 0,22 % от длины ВЛ), что характеризует высокую точность метода. Существующие методы одностороннего ОМП имеют тенденцию к увеличению погрешности при удалении места повреждения от места установки устройства ОМП. Напротив, разработанный метод ОМП ВЛ на основе квадратных уравнений обеспечивает высокую точность расчетов на всем протяжении линии. Во всех проведенных имитационных экспериментах алгоритму была свойственна погрешность ОМП не более 1% от длины ВЛ. Высокая точность предлагаемого метода продемонстрирована в условиях имитационного моделирования, где не учитываются погрешности измерений. В реальных условиях погрешность будет выше за счет ошибок, вносимых измерительными устройствами.

**Обсуждение (Discussion)**

Результаты имитационных экспериментов подтверждают большие ошибки существующих методов ОМП ВЛ по ПАР в сравнении с разработанным алгоритмом. В случае повреждений, расположенных ближе к противоположному концу ВЛ от места установки устройства ОМП, для существующих методов ОМП характерно значительное увеличение ошибок, достигающих до половины длины ВЛ. Предложенный алгоритм ОМП сохраняет высокие показатели точности при повреждениях по всей длине линии.

При разработке новых алгоритмов ОМП по ПАР следует придерживаться следующих принципов:

- алгоритм должен быть устойчив к влиянию случайных факторов, определяющих точность ОМП;

- зона обхода должна быть достаточно большой, чтобы фактическое место повреждения действительно располагалось внутри зоны обхода; в том же время зона обхода должна быть достаточно малой, чтобы минимизировать затраты на поиск и устранение повреждения;

- необходимо стремиться к наименьшим вычислительным затратам на реализацию алгоритма, при этом обеспечивая устойчивость и точность метода.

#### **Заключение (Conclusions)**

Актуальность задачи повышения точности алгоритмов ОМП на линиях электропередачи связана с отсутствием алгоритмов, обеспечивающих устойчивость к влиянию случайных факторов, в частности, к влиянию реактивной составляющей повреждения. Применение таких алгоритмов на ВЛ с заземленным грозотросом приводит к существенным погрешностям, и как следствие, к большим временным и экономическим затратам на устранение аварии.

Предлагаемый алгоритм одностороннего ОМП по ПАР обеспечивает устойчивость к реактивной составляющей сопротивления повреждения. Высокая точность предлагаемого метода подтверждается результатами испытаний.

Разработанный алгоритм является универсальным и может быть применен как на ВЛ с заземленным грозотросом, так и на линиях без заземленного грозотроса.

Реализация нового метода возможна путём модернизации программного обеспечения терминалов ОМП и РЗА без необходимости внесения изменений в аппаратную часть.

#### **Литература**

1. Висящев А.Н., Пленков Э.Р., Федосов Д.С. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2 С. 78–89. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_78.

2. Чернеев П. П., Куликов А. Л. Особенности определения места повреждения линий электропередачи с заземленным грозозащитным тросом // Конференция «Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики»; 22-24 апреля 2025 г., Чебоксары: изд-во ЧГУ, 2025. С. 13-16.

3. Шарыгин Д. С., Филатова Г. А., Яблоков А. А. Способ определения места повреждения и зоны обхода на воздушной линии электропередачи. Патент РФ на изобретение №2850379. 11.11.2025. Бюл. №32. Доступно по: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1\\_20251111?q=&from=search\\_simple&hash=-754904597](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1_20251111?q=&from=search_simple&hash=-754904597). Ссылка активна на 30 января 2026.

4. Лямец Ю. Я., Мартынов М. В., Воронов П. И. и др. Способ интервального определения места повреждения линии электропередачи. Патент РФ на изобретение №2639718. 22.12.2017. Бюл. №36. Доступно по: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1\\_20171222?q=&from=search\\_simple&hash=-297927110](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1_20171222?q=&from=search_simple&hash=-297927110). Ссылка активна на 30 января 2026.

5. Мартынов М. В. Способ интервального определения места повреждения линии электропередачи. Патент РФ на изобретение №2720949. 15.05.2020. Бюл. №14. Доступно по: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1\\_20200515?q=&from=search\\_simple&hash=488670835](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1_20200515?q=&from=search_simple&hash=488670835). Ссылка активна на 30 января 2026.

6. Чернеев П. П., Куликов А. Л., Федосов Д. С. Повышение точности определения места повреждения на воздушной линии электропередачи с заземленным грозозащитным тросом // Релейщик. 2025. №2(52). С. 8-13.

7. F. Alpsalaz, Z. Yalçınöz, A. Kaygusuz, et al. Fault Location Prediction in Power Transmission Lines Using an Artificial Neural Network Model // 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP). 2024. pp. 1-6.

8. A. A. K. Majhi, S. Mohanty. Fault Localization in DG-Integrated Radial Distribution Network Using ANN-Enhanced Impedance Method // IEEE 5th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET). 2025. pp. 1-6.

9. Z. Guo, Z. Song, T. Xu et al. Research on power system topology identification and fault location based on graph neural network // IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE). 2025. pp. 1602-1607.

10. M. Kouraichi, M. Mansouri, M. Trabelsi. Deep Learning for Fault Diagnosis in Power Transmission Lines: Current Trends, Limitations, and Future Directions // IEEE Access. 2025. Vol. 13. pp. 192105-192142.

11. B. A. Wokoma, O. E. Ojuka, O. J. Effiong. An Investigation on Fault Localization in Power Transmission Lines using Anomaly Detection and Proof-of-Identity Model // IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2025. pp. 1-6.

12. Novosel D., Hart D., Yi Hu et al. System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads. Patent USA №5839093. 17.11.1998. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5839093A/en>. Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).

13. Аржанников Е. А., Лукоянов В. Ю., Мисриханов М. Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.

14. Висящев А. Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи. Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2001. 146 с.

15. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer; 2010.

#### Авторы публикации

**Куликов Александр Леонидович** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского Государственного Технического Университета имени Р. Е. Алексеева. Email: [inventor61@mail.ru](mailto:inventor61@mail.ru).

**Федосов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрических станций, сетей и систем» Иркутского национального исследовательского технического университета. Email: [fedosov\\_ds@istu.edu](mailto:fedosov_ds@istu.edu).

**Чернеев Павел Павлович** – аспирант Нижегородского Государственного Технического Университета имени Р. Е. Алексеева. Email: [paulchereeen@yandex.ru](mailto:paulchereeen@yandex.ru).

#### References

1. Visyashchev A.N., Plenkov E.R., Fedosov D.S. Evaluation of value and type of fault impedance on high voltage overhead transmission lines // *Smart Electrical Engineering*. 2023; 2:78–89. (In Russ). doi: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_78.

2. Cherneev P. P., Kulikov A. L. Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi s zazemlennym grozozashchitnym trosom. In: Konferentsiya “*Sovremennye tendentsii razvitiya tsifrovyykh sistem releinoi zashchity i avtomatiki*”; 22-24 Apr 2025; *Cheboksary, Russia*. 2025. pp. 13-16 (In Russ).

3. Sharygin D. S., Filatova G. A., Yablokov A. A. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya i zony obkhoda na vozduшной linii elektroperedachi*. Patent RUS №2850379. 11.11.2025. Byul. №32. Available at: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1\\_20251111?q=&from=search\\_simple&hash=-754904597](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2850379C1_20251111?q=&from=search_simple&hash=-754904597). Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).

4. Lyamets Yu. Ya., Martynov M. V., Voronov P. I. et al. *Sposob interval'nogo opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi*. Patent RUS №2639718. 22.12.2017. Byul. №36. Available at: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1\\_20171222?q=&from=search\\_simple&hash=-297927110](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2639718C1_20171222?q=&from=search_simple&hash=-297927110). Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).

5. Martynov M. V. *Sposob interval'nogo opredeleniya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi*. Patent RUS №2720949. 15.05.2020. Byul. №14. Available at: [https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1\\_20200515?q=&from=search\\_simple&hash=488670835](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2720949C1_20200515?q=&from=search_simple&hash=488670835). Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).

6. Cherneev P. P., Kulikov A. L., Fedosov D. S. Povyshenie tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na vozduшной linii elektroperedachi s zazemlennym grozozashchitnym trosom. *Releishchik*. 2025; 2(52):8-13. (In Russ).

7. F. Alpsalaz, Z. Yalçınöz, A. Kaygusuz, et al. Fault Location Prediction in Power Transmission Lines Using an Artificial Neural Network Model // 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Malatya, Turkiye, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IDAP64064.2024.10710637.

8. A. A. K. Majhi, S. Mohanty. Fault Localization in DG-Integrated Radial Distribution Network Using ANN-Enhanced Impedance Method // *IEEE 5th International Conference on*

*Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Jaipur, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEFET65155.2025.11255285.

9. Z. Guo; Z. Song; T. Xu et al. Research on power system topology identification and fault location based on graph neural network // *IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE)*, Jinzhou, China, 2025, pp. 1602-1607, doi: 10.1109/ICSECE65727.2025.11256901.

10. M. Kouraichi, M. Mansouri, M. Trabelsi. Deep Learning for Fault Diagnosis in Power Transmission Lines: Current Trends, Limitations, and Future Directions // *IEEE Access*. 2025; 13:192105-192142. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3628908.

11. B. A. Wokoma, O. E. Ojuka, O. J. Effiong. An Investigation on Fault Localization in Power Transmission Lines using Anomaly Detection and Proof-of-Identity Model // *IEEE PES/IAS PowerAfrica*. 2025. pp. 1-6. doi: 10.1109/PowerAfrica65840.2025.11289185.

12. Novosel D., Hart D., Yi Hu et al. *System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads*. Patent USA №5839093. 17.11.1998. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5839093A/en>. Accessed: 30 Jan 2026. (In Russ).

13. Arzhannikov E. A., Lukoyanov V. Yu., Misrikhanov M. Sh. *Opređenje mesta korotkogo замыкания на высоковольтных линиях электропередачи*. Moscow: Energoatomizdat; 2003. (In Russ).

14. Visyashchev A. N. *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi*. Irkutsk: INRTU; 2001. (In Russ).

15. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*. London: Springer; 2010.

#### **Authors of the publication**

**Aleksandr L. Kulikov** - professor of the chair "Electric power engineering, power supply and power electronics" R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University Nizhny Novgorod, Russia. *Email: inventor61@mail.ru*.

**Denis S. Fedosov** - head of the department "Electrical Stations, Grids and Systems" Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. *Email: fedosov\_ds@istu.edu*.

**Pavel P. Cherneev** - postgraduate student, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. *Email: paulchereev@yandex.ru*.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **19.02.2026 г.**

**Отредактировано** **07.04.2026 г.**

**Принято** **14.04.2026 г.**