УДК 621.316

Авторы:
к.т.н. Ермаков К.И.,
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Ermakov K.I.,
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia.

РАСПОЗНАВАНИЕ ОТРАЖЁННЫХ ВОЛН В СИГНАЛЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ЛОКАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЭП

RECOGNITION OF REFLECTED WAVES IN TRANSIENT SIGNAL FOR FAULT LOCATION ON POWER TRANSMISSION LINES

Дата поступления рукописи в редакцию: 07.05.2026
Дата принятия рукописи в печать: 10.06.2026

Аннотация: в статье представлены результаты распознавания отражённых волн в осциллограммах при коротких замыканиях (КЗ) на воздушной линии электропередачи (ЛЭП). В исследованиях применены методы цифровой обработки сигналов: спектрально-временной анализ, полосовая фильтрация, композитное представление сигнала. Описан метод выделения отражённой волны на основе корреляционного сравнения с паттерном прямой (падающей) волны. Предложенный алгоритм позволяет верифицировать результат двухстороннего волнового расчёта и обеспечивает возможность односторонней локации при отказе основного метода. Все результаты получены на реальных аварийных осциллограммах с известной координатой повреждения.

Ключевые слова: линия электропередачи, определение места повреждения, короткое замыкание, электромагнитная волна, отражённая волна.

Abstract: this paper presents the results of recognizing reflected waves in oscillograms during short circuits on power transmission lines. The research employs digital signal processing methods, including time–frequency analysis, bandpass filtering, and composite signal representation. A method for extracting the reflected wave based on correlation matching with a pattern of the direct (incident) wave is proposed. The developed algorithm allows verification of the results of two-ended traveling wave fault location and provides a means for one-ended fault location in the event of a failure of the primary method. All

Введение

Волновое определение места повреждения (ОМП) основано на измерении времени пробега электромагнитных волн по ЛЭП. Точность метода зависит от двух групп факторов, связанных с волновыми параметрами:

- длина линии – её достоверное задание, а также учёт провисания проводов;
- скорость распространения волны, используемая в расчёте, должна соответствовать реальному значению; также необходимо принимать во внимание нарушение однородности линии.

Степень влияния волновых параметров на погрешность ОМП значительно меньше, чем удельные параметры линии влияют на расчёт по параметрам аварийного режима [1, 2, 3, 4]. Данный фактор обеспечивает системе волнового ОМП точность на порядок выше по сравнению с альтернативными методами [5, 6, 7].

Наилучшим с точки зрения точности является двухстороннее волновое ОМП [8], при котором регистрируются первые фронты волн на разных концах ЛЭП. Технически реализация данного метода возможна только при соблюдении двух условий: синхронизация полукомплектов с точностью не менее 1 мкс и наличие канала связи между ними для обмена временными метками прихода волны. Анализ эксплуатации устройств волнового ОМП за последние 15 лет показывает, что эти два элемента системы являются наиболее уязвимыми (именно они чаще всего приводят к отсутствию двухстороннего расчёта).

Распространение волн в линии сопровождается отражениями в местах нарушения однородности – место повреждения, шины подстанций (ПС), ответвления. В указанных точках часть падающей волны начинает движение в обратном направлении [9, 10]. Регистрируя моменты времени прямой и отражённой волн на одном конце ЛЭП, возможно рассчитать координату повреждения односторонним методом [11, 12, 13]:

$$Xf = \frac{t_2 - t_1}{2} \cdot v, \quad (1)$$

где t_1, t_2 – моменты времени прихода падающей и отражённой волн; v – скорость электромагнитной волны.

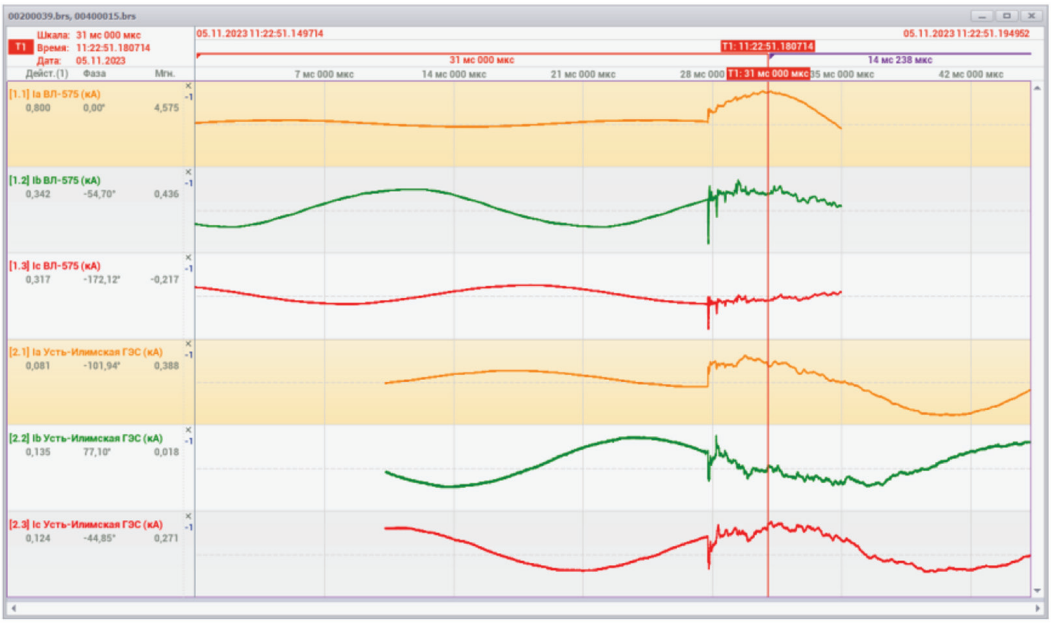

Рис. 1. Высокочастотная осциллограмма токов с двух сторон ЛЭП при однофазном КЗ

Важно отметить, что в формуле (1) время t_2 должно соответствовать волне, отразившейся непосредственно от места повреждения, а не от иных неоднородностей [14]. Таким образом, главная задача одностороннего волнового ОМП сводится к идентификации отражённых волн.

Исследования характеристик волн выполнялись на реальных аварийных осциллограммах, полученных с устройств волнового ОМП производства ООО «НПП Бреслер». На рис. 1 представлен переходный процесс в сигналах токов при однофазном КЗ воздушной линии 500 кВ. Первые три сигнала зарегистрированы на ПС, расположенной **в 67 км от места повреждения.** Следующие три сигнала – противоположной ПС. Осциллограммы записаны с частотой дискретизации 2,5 МГц.

В дальнейшем для анализа используется сигнал тока повреждённой фазы «А». В расчётах принимаются следующие волновые параметры ЛЭП, уточнённые по аварийным осциллограммам с известными координатами повреждений:

- волновая длина линии 296,66 км;
- скорость волны $v = 295$ км/мс.

Спектральные характеристики аварийной электромагнитной волны

Признаком аварийной волны является наличие высокочастотных составляющих. Обратимся к спектрально-временным графикам (рис. 2), на которых яркость цветовой индикации соответствует интенсивности сигнала на данной частоте в определенный момент времени. Для анализа выбран **рабочий диапазон** 5-30 кГц, где сосредоточе-

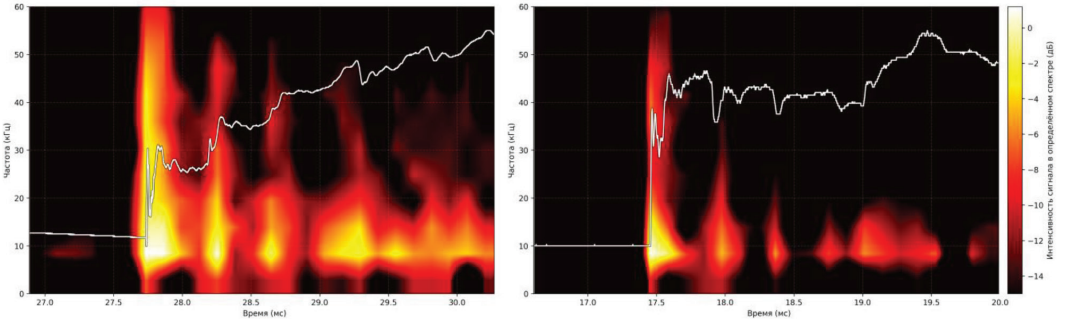

Рис. 2. Спектрально-временной анализ сигналов переходного процесса для левого и правого концов ЛЭП

results are obtained using actual fault oscillograms with a known fault location.

Keywords: power transmission line, fault location, short circuit, electromagnetic wave, reflected wave.

Ермаков Константин Игоревич
В 2009 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий».
В 2022 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ».
Заведующий сектором ОМП и РАС ООО «НПП Бреслер».

ermakov@bresler.ru

на основная энергия высокочастотных составляющих волны. Расширение указанного диапазона может ухудшить выделение целевого сигнала из-за потенциального преобладания в нём составляющих, не связанных с волной.

Для того, чтобы выделить сигнал в заданном частотном диапазоне, использованы следующие программные полосовые фильтры:

• **Фильтр Баттерворта** 2-го порядка – использует передаточную функцию с максимально плоской (гладкой) амплитудно-частотной характеристикой в полосе пропускания. Сигнал раскладывается на частотные составляющие, а те из них, которые выходят за пределы заданного диапазона, подавляются.

• **Фильтр Чебышева** 2-го порядка – характеризуется более крутым срезом на границах полосы, чем фильтр Баттерворта того же порядка, однако внутри полосы пропускания появляются пульсации амплитуды.

• **Вейвлет-фильтр** – сигнал разделяется по частотным уровням, после чего обнуляются уровни, частоты которых лежат вне заданной полосы.

Фильтр Баттерворта выбран как эталон минимальных фазовых искажений, фильтр Чебышева обеспечивает наиболее крутой срез (важный для разделения близких спектральных компонент), а вейвлет-фильтр – как представитель методов с нестационарным частотным разложением. Рассмотрение разных принципов фильтрации позволяет выявить объективные закономерности в сигнале отражённых волн. Сравнение характеристик фильтров приведено в табл. 1.

На рис. 3 изображены графики отфильтрованных сигналов, а также усреднённый, который нивелирует индивидуальные особенности каждого фильтра. Такой подход позволяет выявить устойчивые временные позиции экстремумов, которые соответствуют отражённым волнам. При этом выделяются отражения не только от точки КЗ (отмечены на графике зелёным цветом), но и от шин противоположной ПС (синий цвет). Идентифицировать отражённую от точки повреждения волну возможно по её полярности – она должна быть такой же, как у падающей волны. Волны, отражённые от противоположного конца ЛЭП, имеют обратную полярность.

Таблица 1. Сравнение характеристик программных фильтров

Характеристика фильтра	Баттерворт	Чебышев	Вейвлет
Крутизна среза	● средняя	● высокая	● нестабильная
Переходная зона	● средняя	● узкая	● ступенчатая
Подавление вне полосы	● хорошее	● отличное	● среднее
Пульсации в полосе	● нет	● есть	● могут быть
Сохранение формы сигнала	● хорошее	● среднее	● хорошее
Краевые эффекты	● низкие	● низкие	● заметные

Таким образом, для ближней к месту повреждения ПС (левый график рис. 3) с учётом (1) получаем следующие расчётные значения координаты повреждения:

для первой отражённой волны:

$$Xf = \frac{28{,}2029 - 27{,}7501}{2} \cdot 295 = 66{,}788\ (\text{км})$$
$$[\Delta = 0{,}212\ \text{км}],$$

для второй отражённой волны:

$$Xf = \frac{28{,}6545 - 28{,}2029}{2} \cdot 295 = 66{,}611\ (\text{км})$$
$$[\Delta = 0{,}389\ \text{км}].$$

Для дальней ПС (правый график рис. 3) выявлена только одна волна, которая может быть использована для расчёта:

$$Xf = \frac{19{,}0294 - 17{,}4682}{2} \cdot 295 = 230{,}277\ (\text{км})$$
$$[\Delta = 0{,}617\ \text{км}].$$

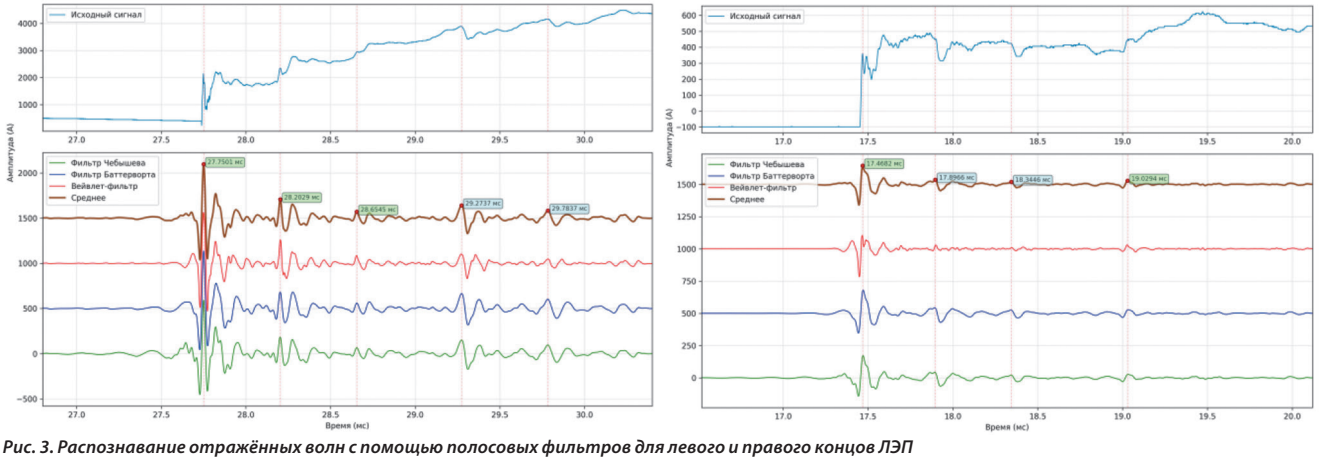

Рис. 3. Распознавание отражённых волн с помощью полосовых фильтров для левого и правого концов ЛЭП

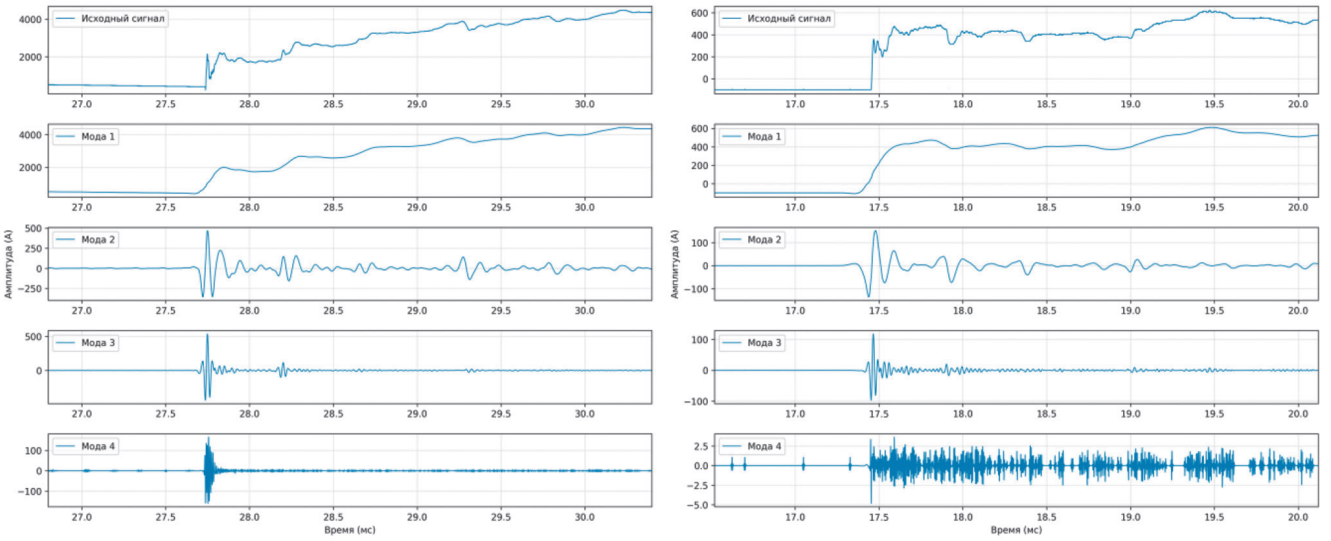

Рис. 4. Вариационное разложение по модам сигналов переходного процесса для левого и правого концов ЛЭП

Точность расчётов зависит от расстояния, пройденного волной. Это связано с тем, что энергия рассеивается, форма волны искажается, и временная метка может быть неточной. Минимальная погрешность получена при использовании первого отражения с ближней ПС, в этом случае волна преодолела расстояние двойного пробега до точки КЗ 134 км. Второе отражение для той же стороны ЛЭП соответствует пути 268 км. Наибольшее расстояние 459,32 км прошла отражённая волна, зарегистрированная на противоположном конце линии.

Вариационное разложение сигнала по модам

Использованные фильтры сталкиваются с фундаментальными ограничениями. Они обеспечивают заданные характеристики в частотной области, но предполагают стационарность сигнала и используют фиксированные полосы пропускания и подавления. Это делает их неэффективными в ситуациях, когда полезные компоненты сигнала перекрываются по частоте или когда их спектральный состав изменяется во времени. Кроме того, такие фильтры вносят фазовые искажения и не способны адаптироваться к локальной структуре сигнала.

Выходом из описанных ограничений служит **преобразование Гильберта-Хуанга,** которое используется для адаптивного анализа нелинейных и нестационарных процессов. Данный метод включает два этапа: сначала выполняется разложение сигнала на моды, а затем применяется преобразование Гильберта к каждой моде для получения мгновенных частот [15]. Ниже приведены характеристики преобразования:

• Ключевая идея заключается в переходе от глобального частотного анализа к локальному, мгновенному частотно-временному описанию, где каждая мода имеет физический смысл отдельного колебательного процесса.

• Не требует стационарности, не навязывает сигналу фиксированные частотные полосы и не использует заранее выбранные базисы.

• При пересечении частотных диапазонов моды «отталкиваются» друг от друга, сохраняя ортогональность.

• В результате формируется трёхмерное частотно-временно-амплитудное представление (спектр Гильберта), позволяющее отслеживать эволюцию каждой моды, что принципиально недоступно классическим фильтрам и вейвлетам.

Рис. 4 демонстрирует разложение сигналов волны на 4 моды. Частота каждой последующей моды выше предыдущей. При добавлении 5-й моды (и более) первые 3 останутся без изменений, а 4-я будет разложена на более высокочастотные компоненты. Количество мод, которое необходимо выделить, является единственным задаваемым параметром для метода разложения Гильберта-Хуанга.

Стоит отметить схожесть 2-й моды с усреднённым отфильтрованным сигналом на рис. 3. Это означает, что преобразование Гильберта-Хуанга позволяет выделить полезный сигнал для идентификации отражённых волн. При этом исключаются этапы выявления рабочего диапазона частот (рис. 2) и последующей фильтрации сигнала в найденном диапазоне (рис. 3).

Распознавание отражённых волн с помощью корреляции Пирсона

Ранее было показано, что при регистрации меток времени отражённых волн доступен волновой односторонний метод ОМП. Однако в такой реализации возникают определённые сложности. Во-первых, идентификация волны, отражённой именно от места

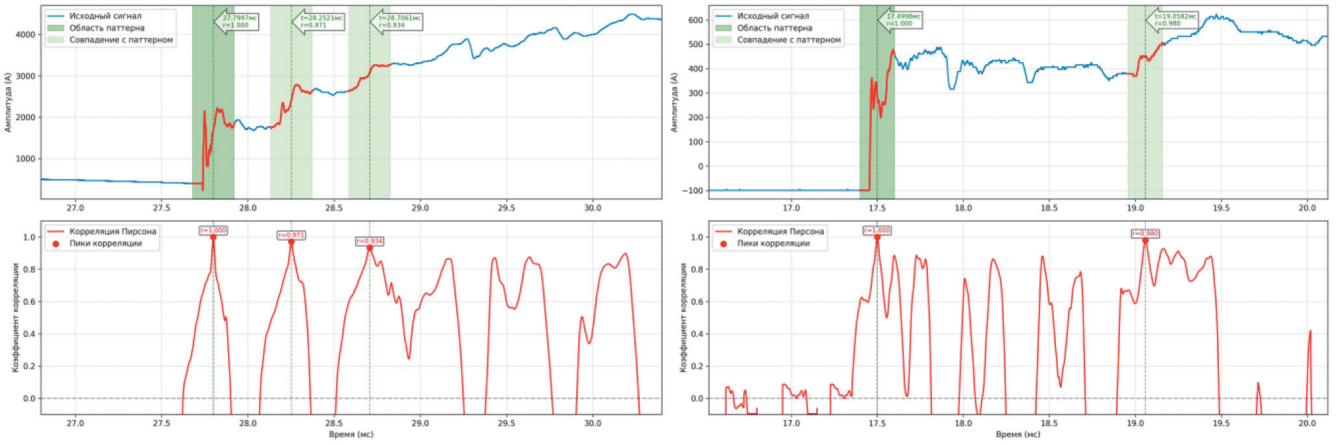

Рис. 5. Распознавание отражённых волн на основе корреляционного сравнения для левого и правого концов ЛЭП

повреждения [15], требует отдельного алгоритма. В автоматическом режиме решение данной задачи может быть затруднено. Во-вторых, энергии высокочастотной составляющей волны может не хватить для её уверенной распознаваемости в определённом частотном диапазоне.

Для более точной идентификации отражённой волны предлагается метод, основанный на **корреляционном сходстве формы падающей и отражённой волны.** В отличие от предыдущего подхода, здесь используется исходный сигнал без фильтрации. Сигнал падающей волны записывается в виде эталона-паттерна и нормализуется для устранения зависимости от амплитуды. Далее в скользящем по сигналу окне вычисляется график корреляционного сходства сигнала с паттерном. Пики корреляции, превышающие уровень 0,9, интерпретируются как отражённые волны (рис. 5) (схожесть 90% и выше – это эмпирическое значение, которое может требовать адаптации).

Корреляция Пирсона принимает значения в интервале [-1; 1], поэтому при сравнении сигнала с паттерном учитывается их полярность. Положительный коэффициент корреляции характерен для волн, отражённых от места повреждения. Для отражений от иных неоднородностей также возможен высокий коэффициент корреляции, но с отрицательным знаком.

Рассчитаем координаты повреждения по (1) с учётом новых меток времени. Для ближней к месту повреждения ПС получаем:

для первой отражённой волны:

$$Xf = \frac{28{,}2521 - 27{,}7997}{2} \cdot 295 = 66{,}729\ (\text{км})$$

$$[\Delta = 0{,}271\ \text{км}],$$

для второй отражённой волны:

$$Xf = \frac{28{,}7061 - 28{,}2521}{2} \cdot 295 = 66{,}965\ (\text{км})$$

$$[\Delta = 0{,}035\ \text{км}].$$

На дальней ПС выявлена только одна волна, коррелирующая с падающей:

$$Xf = \frac{19{,}0582 - 17{,}4998}{2} \cdot 295 = 229{,}864\ (\text{км})$$

$$[\Delta = 0{,}204\ \text{км}].$$

По точности данный алгоритм сопоставим с расчётом по меткам времени в отфильтрованном сигнале. Однако его главное преимущество – не в точности, а в надёжности, поскольку корреляция исключает ложные расчёты для волн, отражённых не от места повреждения.

Выводы

1. Аварийная электромагнитная волна содержит высокочастотные составляющие, которые сосредоточены в определённом частотном диапазоне. Фильтрация с заданной полосой пропускания позволяет получить сигнал, экстремумы которого соответствуют отражённым волнам. Данный подход может быть положен в основу одностороннего волнового ОМП.

2. Эффективным способом идентификации отражённых волн является разложение сигнала на моды с помощью преобразований Гильберта-Хуанга. Этот метод не требует предварительного определения частотного диапазона и настройки полосовых фильтров, он адаптивно формирует одну или несколько мод, содержащих отражённые волны.

3. Корреляционное сравнение скользящего окна с паттерном падающей волны позволяет автоматически идентифицировать отражения именно от места по-

вреждения, предотвращая ложные расчёты по волнам от других неоднородностей.

4. Предложенный алгоритм может использоваться как резервный способ односторонней локации при отказе двухстороннего волнового ОМП (например, при потере синхронизации или канала связи). Полученные в статье результаты с использованием предложенных алгоритмов показали, что с увеличением расстояния, пройденного волной, точность локации закономерно снижается: погрешность составила от 0,035 км на малых расстояниях до 0,617 км – на максимальных.

Литература:

1. Козлов, В.Н. Повышение точности волновых методов ОМП высоковольтных ЛЭП / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, М.И. Кирюшин, А.В. Шашкий // Энергия единой сети. – 2022. – № 5-6 (66-67). – С. 26-35.
2. Подшивалин, А.Н. Распознаваемость коротких замыканий в задаче определения места повреждения по одностороннему наблюдению параметров аварийного режима / А.Н. Подшивалин, Г.Н. Исмуков // Релейщик. – 2025. – № 1 (51). – С. 34-39.
3. Лачугин, В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / В. Ф. Лачугин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1 (50). – С. 58-61.
4. Васильев В.Д. Определение мест повреждения волновым методом в распределительных сетях древовидной структуры / В.Д. Васильев, А.П. Кирпичников, Ш.А. Шайхутдинов, Г.В. Спиридонов // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 11. – С. 131-137.
5. Хузяшев Р.Г. Практическая реализация волнового метода определения места повреждения в разветвленных распределительных электрических сетях 6(10) кВ / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин, В.Д. Васильев, С.М. Тукаев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 2 (53). – С. 98-107.
6. Гура, Д.Н. Сравнение традиционных и волнового методов определения места повреждения по итогам опытов натурных испытаний на ЛЭП 220-330 кВ / Д.Н. Гура, А.Л. Корольков // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017: Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. Том 1. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 415-418
7. Куликов, А.Л. Применение алгоритмов поиска при определении мест повреждений на воздушных линиях электропередачи по параметрам аварийного режима / А.Л. Куликов, П.В. Илюшин, А.А. Лоскутов // Известия РАН. Энергетика. – 2023. – № 5. – С. 40-59
8. Лачугин, В.Ф. Разработка и применение устройств определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием волновых методов / В.Ф. Лачугин, Д.И. Панфилов, С.Г. Попов [и др.] // Энергия единой сети. – 2021. – № 5-6 (60-61). – С. 50-67.
9. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
10. Перелыгин, Л.В. Применение синхронизированных векторных измерений и волнового метода определения места повреждения в распределительных сетях / Л.В. Перелыгин, И.Ф. Ершов // Энергоэксперт. – 2023. – № 2 (86). – С. 38-41.
11. Козлов, В.Н. Расширение возможностей пассивного волнового определения места повреждения за счет отраженных волн / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, Ю.В. Бычков // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 4 (37). – С. 34-37.
12. Федоров, А.О. Волновое определение места повреждения линии электропередачи / А.О. Федоров, В.С. Петров, Р.В. Разумов, А.А. Петров // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 2 (55). – С. 28-35.
13. Chen P., Xu B., Li Jing A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines // International Conference on Power System Technology, Chongqing, 22-26 October, 2006: Abstr. – Chongqing, 2006 – P. 1-4.
14. Федоров, А.О. Одностороннее волновое определение места повреждения на основе сверточной нейронной сети / А.О. Федоров, В.С. Петров, А.А. Ильин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 3 (52). – С. 48-53.
15. Huang N.E., Shen S.S.P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications / 2nd ed. – Singapore: World Scientific Publishing, 2014. – 447 с.