

# Рекомендации по выбору и сравнение методов ОМП в сетях различной топологии

В статье рассматриваются особенности использования существующих методов определения места повреждения в сетях различной конфигурации и классов напряжения. Анализируются импедансные, локационные, топографические, волновые и спектральные методы определения места повреждения с кратким описанием методов, практики их использования в электросетях различной топологии. Выделены недостатки и погрешности для каждого метода, в том числе на основе практических испытаний в реальных энергосистемах. Даются рекомендации по особенностям ввода в эксплуатацию устройств определения места повреждения в зависимости от того, какой метод используется.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** методы определения места повреждения, топология электрической сети, применимость методов ОМП, ввод в эксплуатацию систем ОМП

## Авторы:

Кучерявенков А.А.,  
Карташева Е.А.,  
Горожанкин П.А.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ПРОБЛЕМАТИКЕ ВЫБОРА МЕТОДОВ ОМП

В настоящее время можно выделить несколько трендов в сфере электроэнергетики большинства стран мира. Во-первых, в развитых странах постепенно происходит трансформация электроэнергетики от централизованной к децентрализованной модели за счёт «энергетического перехода»<sup>1</sup>, базирующегося на понятии «активный потребитель» – новый субъект электроэнергетики, который, кроме традиционной функции потребления энергии от сторонних источников, выполняет также функцию накопления и генерации энергии. Энергоснабжение становится экосистемой производителей и потребителей энергии,

<sup>1</sup> Renewable energy prospects for Central and South-Eastern Europe Energy Connectivity (CESEC). International Renewable Energy Agency, 2020. P 56-57. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Oct/IRENA\\_REmap\\_CESEC\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Oct/IRENA_REmap_CESEC_2020.pdf)

которые беспрепятственно интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией.<sup>2</sup>

Во-вторых, идёт стремительное появление многочисленных объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии. Возобновляемые источники энергии, имеющие стохастический характер выработки, при включении в сеть могут нарушить оптимальность потоков активной и реактивной мощности.<sup>3</sup> Это вызывает перегрузку отдельных участков сети и увеличение потерь электроэнергии. При этом солнечные, ветровые, гидроэлектростанции находятся в местах расположения ресурсов, что часто приводит к удалению генерирующих мощ-

<sup>2</sup> Бучнев А.О. Создание класса энергетических просьюмеров как цель государственной политики в области регулирования возобновляемой энергетики // Государственная служба, 2022, № 24 (2 (136)). С. 44

<sup>3</sup> Насыров Р.Р., Альдженди Р., Хербик Т. Выбор мощности возобновляемых источников энергии для покрытия дефицита активной мощности // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2019, № 5(56). С. 75

ностей от центров нагрузки, возникают новые регионы с ограниченной существующей передающей инфраструктурой.

С увеличением числа потребителей, ростом числа объектов малой генерации на основе возобновляемых источников энергии и увеличением числа просьюмеров, которые кроме потребления энергии, могут также накапливать и генерировать энергию, существенно усложняется топология распределительных сетей среднего и низкого класса напряжения. Увеличение числа элементов сети требует перехода на новые цифровые технологии для обеспечения процесса определения точки аварии в режиме реального времени. Методы определения места повреждения, используемые в традиционных системах защиты, зачастую показывают низкую точность в сетях сложной топологии.

В течение последних пятидесяти лет непрерывно совершенствуются традиционные методы определения мест повреждения и появляются новые разработки методов ОМП, ряд из которых, ещё не имеют серийного применения. В данной статье мы рассмотрим наиболее распространённые методы ОМП, такие как: импедансные (по параметрам аварийного режима), локационные (так же называемые импульсными или зондирующими), топографические, волновые и спектральные. При анализе рассматривается эффективность применения метода при определённых конфигурациях сети и проблемы ввода в эксплуатацию. Так же предлагаются комбинированные методы ОМП с результатами проведения полевых испытаний.

### ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД: ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА – ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ В МОМЕНТ ПОВРЕЖДЕНИЯ

#### Описание и применимость метода

Импедансный метод, появившийся в практике энергосистем в 1970-х годах, в настоящее время является наиболее распространённым методом, особенно на линиях электропередачи класса напряжения 110 кВ и выше.<sup>4</sup> Этот метод основан на анализе напряжений и токов трехфазной линии, измеренных с одного конца ВЛ при одностороннем или с двух концов при двухстороннем способе ОМП. Расстояние до места замыкания определяется по токам и напряжениям основной частоты:

- для 2-х и 3-х фазных КЗ – по фазным токам и напряжениям;
- для однофазных КЗ – по токам и напряжениям нулевой последовательности.

Погрешность расчёта расстояния до места повреждения во многом зависит от точности соответствия модели ВЛ, построенной по заданным расчётным параметрам, реальному объекту. На точность измерения расстояния также оказывает влияние класс точности измерительных трансформаторов тока – ТТ (обычно используются ТТ класса 5Р или 10Р, обеспечивающих погрешность не хуже 5 % или 10 % при номинальной предельной кратности). На линиях без ответвлений и при отсутствии других факторов, существенно снижающих точность метода, рассмотренных ниже, погрешность определения расстояния до места

<sup>4</sup> Шальт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. Энергоиздат, 1982. С. 24–25

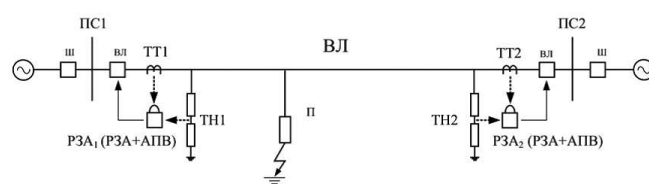


Рис. 1. Первичная схема участка сети ВЛ с установленными устройствами импедансного ОМП<sup>5</sup>

повреждения при одностороннем алгоритме измерения обычно не превышает 5 % от длины линии, а при двухстороннем – 3 %.<sup>6</sup>

Импедансный метод эффективно применяется на всех неветвящихся линиях, на линиях с одно- и двухсторонним питанием.

#### Недостатки применимости метода

При использовании импедансного метода ОМП на точность результата оказывает неблагоприятное влияние такая неопределённость линейных параметров как сопротивление нулевой последовательности, которое зависит от сопротивления земли под линией (неодинакового вдоль трассы и изменяющегося с погодой). При 20% погрешности в определении  $Z_0$  линии может образоваться 15% погрешность в вычисленном результате определения места повреждения.

Снижается эффективность использования импедансного метода ОМП при недостаточной точности модели линии, принятой в расчёте, связанной с наличием шунтовых реакторов или конденсаторных батарей, небалансом нагрузок и ошибок измерений (ТН, ТТ, АЦП) и погрешностью в системе фильтрации входных сигналов.

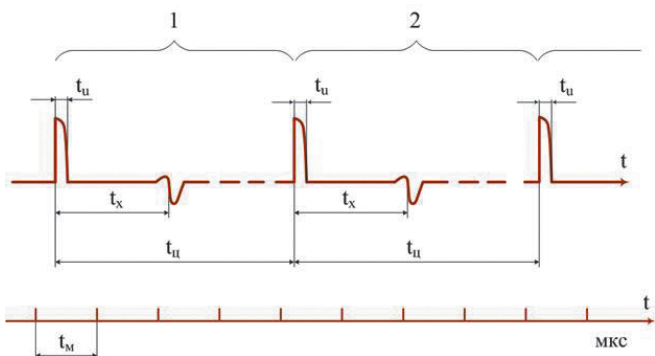
При определении расстояния до места КЗ по фиксированным токам и напряжениям с одного конца ВЛ неизбежно возникает ошибка из-за неизвестного значения переходного сопротивления  $R_n$  в месте КЗ, а также неизвестного тока КЗ противоположной подстанции. При этом переходным сопротивлением может оказаться не только наиболее вероятное сопротивление заземления опоры ВЛ (случай перекрытия на опору), но и сопротивление цепи тока КЗ при перекрытии на деревья вдоль трассы ВЛ. Если значение сопротивления заземления опоры ВЛ, как известно, нормируется ПУЭ (в пределах 10–30 Ом), то сопротивление дерева – величина неопределённая и ее значение может оказаться выше предельных.

Ещё одним ограничением эффективности применения метода являются сложные аварийные процессы, такие как переход одного вида аварии в другой, например, однофазного замыкания на землю в межфазное замыкание и так далее. Существенно снижается точность определения места повреждения при неоднородности и ветвлении линий. Часть погрешностей удастся уменьшить при использовании двухстороннего метода ОМП. Перечень факторов, оказывающих существенное влияние на погрешность, приведен в таблице 1<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> Иванова Е.А. Комбинированный способ определения места повреждения в линии электропередачи переменного тока // Электричество, 2015, № 7. С. 13

<sup>6</sup> То же. С. 14

<sup>7</sup> Смирнов А.Н. Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110–220 кВ. ОАО «Энергетический институт им. Кржижановского», 2015. С. 19



**Рис. 2.** Временная развертка зондирующих и отраженных сигналов при импульсном методе определения мест повреждения

Погрешность импедансного метода оценивается как:

1. Сравнительно высокая погрешность, не менее 5 %. Для ВЛ длиной, например, 400 км погрешность в ОМП может составить 20 км.

2. Зависимость точности от фазового сдвига между током и напряжением. При уменьшении угла, которое происходит с ростом  $R_n$ , погрешность возрастает и при угле  $<45^\circ$  может превысить 5%.

### Особенности ввода в эксплуатацию

При вводе в эксплуатацию устройств, основанных на импедансном методе ОМП необходимо отстроиться от влияния свободных составляющих электромагнитного переходного процесса при КЗ. Для линий 110–220 кВ особо важна отстройка от апериодических составляющих; для линий 500–1150 кВ – от высших гармонических составляющих.

При вводе в эксплуатацию необходимо учесть проблемы селективности – часто при КЗ на одной из линий срабатывают приборы и поврежденной и соседних линий. Необходимо моделирование линии, чтобы настройка пороговых уровней учитывала (была не ниже, чем) возможные аварийные токи на этой линии, таким образом «отсекая» шумы или аварии на других линиях.

Как рассматривалось выше, переход сопротивления земли при смене почвы (степь-заболоченные территории-проход линии над водными преградами), а также смена параметров линии, существенно ухудшает точность определения места повреждения. Для успешного решения задачи определения расстояния до места замыкания все «погонные» параметры ВЛ должны быть заранее известны – измерены или рассчитаны в соответствии с геометрией проводов на опоре.

## ЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ОМП

### Описание и применимость метода

Принцип автоматического локационного обнаружения повреждений на линии электропередачи основан на измерении времени между моментом посылки в ЛЭП зондирующего импульса и моментом прихода к началу ЛЭП импульса, отраженно-го от места повреждения.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Минуллин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Касимов В.А., Мустафин Р.Г., Виноградов В.Ю. Определение места повреждения локационным методом на линиях электропередачи с ответвлениями// Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2023, №13 (3 (51)). С. 71–72

**Таблица 1.** Перечень факторов оказывающих влияние на точность импедансного метода

Факторы, которые могут оказать влияние на погрешность импедансного метода	Односторонний импедансный метод	Двухсторонний несинхронизованный импедансный метод
Нелинейность характеристик ТН и ТТ (насыщение ТТ)	влияет	влияет
Схема соединения ТН и ТТ (ТН соединённый в треугольник)	влияет	влияет
Величина нагрузки линии	влияет	нет
Неоднородность параметров линии	влияет	нет
Параллельные линии (взаимоиндукция линий)	влияют	нет
Величина переходного сопротивления	влияет	нет
Угол фазового сдвига	влияет	влияет
Величина сопротивления грунта	влияет	нет
Линия без транспозиции	влияет	влияет
Тупиковые линии	влияют	влияют
Линии с отпайками	влияют	влияют
Вид повреждения	влияет	нет
Погрешность задания величины сопротивления прямой последовательности	влияет	нет
Погрешность задания величины сопротивления обратной последовательности	влияет	влияет

Искомое расстояние равно  $L=t_x \cdot v/2$ , где  $t_x$  – это время между отправкой зондирующего импульса и моментом прихода отраженного импульса,  $v$  – скорость распространения волны.

Локационный метод чаще всего используется в топологически однородных сетях без отпаек, аналогично импедансному методу. Точность данного метода при длинных линиях (более 10 км) выше, чем точность импедансного метода. При правильной настройке может быть достигнута точность порядка 0,3–0,5%.<sup>9</sup>

При реализации локационного метода на ВЛ необходимо распознать «полезные» отраженные сигналы на фоне побочных отражений и различных видов электрических помех.

### Недостатки применимости метода

Локационный метод ОМП сложен в эксплуатации для разветвленных линий и применение метода ограничено топологией линий:

- на линиях с отпайками появляется неопределенность в определении места повреждения: на отпайке или на основной линии;
- энергетические потери на отпайках линии уменьшают допустимую длину ВЛ;
- необходимость средств ВЧ-обработки (фильтр присоединения, загрядитель, конденсатор связи) – на ВЛ 6–35 кВ они, как правило, отсутствуют.

Кроме того, есть еще несколько факторов, влияющих на возможность определения места повреждения данным методом:

- необходимость отстройки от ВЧ-помех, создаваемых дугой в месте КЗ;
- наличие «мертвой зоны», связанной с минимальной длительностью зондирующего импульса;

<sup>9</sup> Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования. Энергоатомиздат, 2009. С. 65

- ограничения по длине линии (обычно не более 100 км);
- снижение точности измерения, обусловленное зависимостью параметров линии от погоды.<sup>10</sup>

### Особенности ввода в эксплуатацию

Развитием локационного метода является использование разностных рефлектограмм, что позволяет применять локационный метод при наличии большого количества ответвлений, когда визуальный анализ рефлектограммы затруднен. При этом необходимо выполнение требования: достаточность разрешающей способности локационного зондирования при конкретной длине и конфигурации линии, т.е. необходимо, чтобы отраженные импульсы были предельно короткими и на рефлектограмме не накладывались друг на друга и выделялись отдельно, что может быть обеспечено за счет разбиения линии на отдельные участки (например, по удаленности от начала), для каждого из которых подбираются свои оптимальные параметры зондирующего сигнала и независимо проводится поиск повреждения.

Ввод в эксплуатацию включает в себя:

- имитационное моделирование ЛЭП;
- диагностика ЛЭП и снятие эталонной рефлектограммы;
- синтез режекторного и полосового фильтров;

При повреждении ВЛ выполняется сравнение эталонной и реальной рефлектограммы.

Воздушные линии электропередачи, как правило, имеют значительную протяженность и разветвленную структуру, что в конечном итоге приводит к уменьшению амплитуды сигналов на рефлектограмме линии. Однако отношение сигнал/шум может быть повышено при помощи увеличения энергии излучаемого в линию сигнала, а также за счет применения метода накопления, заключающегося в когерентном суммировании получаемых рефлектограмм и расчете усредненной рефлектограммы. В результате накопления амплитуда случайных и несинхронных помех уменьшается при сохранении амплитуды полезного отраженного сигнала, и отношение сигнал/шум возрастает пропорционально корню из числа накоплений.<sup>11</sup>

### ТОПОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

#### Описание и применимость метода

Топографический метод ОМП может реализовываться несколькими способами:

- расстановкой на воздушных линиях топографических указателей аварийной ситуации, фиксирующих токи и напряжения аварийного режима;
- использование специальных приборов аварийной бригадой при движении вдоль трассы ВЛ, позволяющих фиксировать магнитное и/или электрическое поле ВЛ.

В настоящее время селективность топографических индикаторов существенно улучшилась за счёт применения микропроцес-

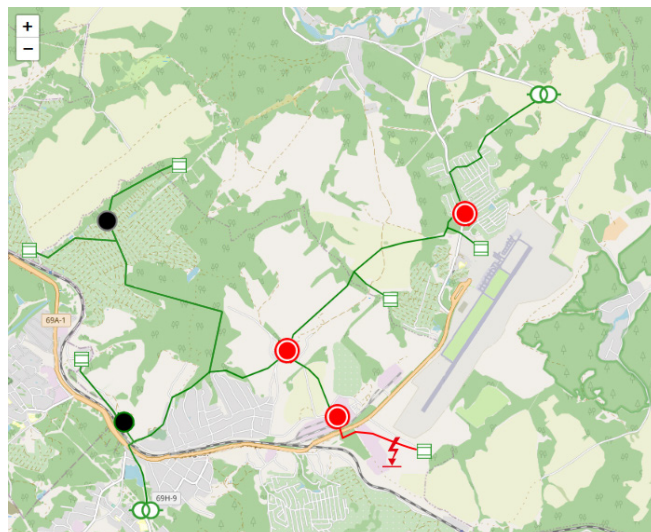


Рис. 3. Работа системы мониторинга на основе топографических индикаторов ИКЗ в ПАО «Россети»

сорной техники, позволяющей настраивать условия срабатывания приборов в зависимости от параметров конкретной линии.<sup>12</sup> Резкий скачок произошёл и в чувствительности к токам КЗ за счёт установки приборов на каждый фазный провод, их периодической синхронизации, использованию новой алгоритмической методики и внедрению в некоторых устройствах методов анализа характеристик переходного процесса режима ОЗЗ. Большинство устройств не определяет селективно-направленные однофазные земляные замыкания и замыкания на линиях с двухсторонней запиткой.<sup>13</sup>

Использование топографического метода ОМП эффективно на линиях с ветвлением, как с многочисленными короткими отпайками, так и с отпайками длиной более ствола. Самые современные топографические средства ОМП определяют токи ОЗЗ от 0,5 А и могут применяться на линиях с изолированной нейтралью и однофазной и двухсторонней запиткой.<sup>14</sup>

Делая вывод о точности топографического метода ОМП, рассмотрим результаты эксплуатации топографических индикаторов. На рисунке 3 мы видим локализацию повреждённого участка в сети ПАО «Россети» с помощью топографического метода. При возникновении однофазного замыкания фазы С на боковой отпайке линии, погрешность метода составила не более 10%.<sup>15</sup>

#### Недостатки применимости метода

Применение топографического метода ОМП не позволяет определить точное место возникновения аварии. Точность метода меняется в зависимости от плотности расстановки устройств

<sup>10</sup> Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Физические основы диагностики повреждённых воздушных линий распределительных электрических сетей// Известия ВУЗов. Проблемы энергетики, 2004, № 5–6. С. 45

<sup>11</sup> Минуллин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Касимов В.А., Мустафин Р.Г., Виноградов В.Ю. Определение места повреждения локационным методом на линиях электропередачи с ответвлениями// Вестник КГЭУ, 2021, № 13 (3(51)). С. 73

<sup>12</sup> Кучерявенков А.А., Карташев А.С., Рукавицын А.А. Индикатор короткого замыкания. Патент № 108071 РФ, Заявл.04.05.17; Опубл. 24.04.18. С. 7

<sup>13</sup> Kucheryavenkov A., Kartasheva E., Kondrashenko E. Outage Monitoring and management in overhead and cable networks with various types of architecture. CIGRE Workshop-Ljubljana, 7–8 June 2018 Paper 0467.-С. 4

<sup>14</sup> Kucheriavenkov A., Feoktistov A., Rukavitsyn A. Optimal solution for fault location and intelligent monitoring in the distribution lines of the complex architecture. CIGRE International Symposium Ljubljana 1–4 June 2021. Paper 1188

<sup>15</sup> Карташев А.С., Кучерявенков А.А., Рукавицын А.А. Задача поиска ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. Автоматизация и ИТ в энергетике. № 12 (89). Москва. 2016. – С. 39

ОМП в сети и позволяет выделить аварийный участок либо между двумя сработавшими устройствами с разным указанием направления (к источнику или к потребителю), либо между сработавшим и не сработавшим устройством или сработавшим устройством и потребителем. Также если не сработало ни одно устройство, а на линии было МФЗ, то авария находится на участке между источником и ближайшими к нему устройством ОМП в случае с односторонним питанием.

Данный метод применяется на ВЛ распределительной сети, имеющей ветвления. Обычно это линии напряжением от 6 до 67 кВ.

Но целесообразно применять данный метод и на однородных неразветвленных линиях с целью выделения участка, начинающегося с конкретного места установки устройства ОМП на проводе ВЛ. Это важно, например, при пересечении водных преград, чтобы точно знать, на каком берегу произошло повреждение, также при пересечении административных и государственных границ, или при переходе ВЛ в КЛ и др. В этом случае применимость топографического метода расширяется на линии до 220 кВ. На более высоких классах напряжения в большинстве случаев ВЛ имеет расщепленную на несколько проводов фазу и это существенно затрудняет использование топографического метода.

### Особенности ввода в эксплуатацию

При применении устройств ОМП, использующих топографический метод, необходима правильная настройка устройств при вводе в эксплуатацию. Значения уставок приборов должны быть согласованы со следующими эксплуатационными параметрами линии:

- токи максимальной токовой защиты, нагрузочный ток линии;
- время срабатывания защиты;
- длительность процессов АПВ;
- емкостной ток линии;
- требование по отключению линии при ОЗЗ.

Данные параметры определяют такие уставки приборов, как выбор вида порога срабатывания по току (абсолютный/дифференциальный в амперах/дифференциальный в процентах), значение уставки по току, время бланкирования аварии (также используется для отстройки от переходных процессов в трансформаторах), время фиксации аварии, настройки параметров фиксации ОЗЗ.<sup>16</sup>

Место размещения прибора определяется наличием устойчивой GSM-связи, топологией ВЛ (оптимально устанавливать устройства ОМП в начала отпаек, перед труднодоступными участками, в местах перехода ВЛ-КЛ – это позволяет получить приемлемую наблюдаемость линии при использовании минимально необходимого количества приборов). При настройке приборов необходимо проверять качество связи приборов с сервером, проводя несколько сеансов связи. В случае неустойчивой связи в районе потенциальной установки приборов можно рекомендовать либо перенести точку установки прибора (иногда это может потребовать установки нескольких приборов вместо одного), либо отказаться от использования GSM-связи на данном участке, оставив визуальный контроль.

<sup>16</sup> Кучерявенков А.А., Карташев А.С. Устройство для определения местоположения и вида повреждения воздушной линии электропередачи (варианты). Патент № 126144 РФ, Заявл. 07.06.12; Оpubл. 20.03.12. С. 5

При нормальной работе GSM-связи индикация на приборах, не является необходимой, и время её работы можно минимизировать, уменьшив, таким образом, затраты энергии встроенных элементов питания; в случае отсутствия связи, напротив, время индикации может быть увеличено, особенно в случае, когда оперативно-выездной бригаде требуется большое время, чтобы добраться в труднодоступные районы. Впрочем, т.к. в приборах сохраняется журнал аварий, доступный для считывания по каналу ближней связи переносными пультами, анализ аварии возможен и в случае отсутствия индикации.

## МЕТОД ОДНО И ДВУХСТОРОННЕГО ВОЛНОВОГО ОМП

### Описание и применимость метода

Принципы синхронно определения местоположения повреждения основаны на измерении времени между моментами прихода фронтов электромагнитных волн, вызванных аварийной ситуацией, к концам линии электропередачи. Чтобы проиллюстрировать принцип, рассмотрим один провод длиной  $L$ , который в момент повреждения заряжен напряжением  $U$ , например, с положительной полярностью. При возникновении повреждения в виде короткого замыкания фазного провода на землю, напряжение в точке пробоя, расположенной на расстоянии  $L_f$  от конца линии, становится равным нулю. В результате в месте повреждения появляются отрицательные электромагнитные волны с напряжением  $U$ , распространяющиеся в обоих направлениях, стремящиеся с определенной скоростью  $v$  распространить нулевой потенциал по всей длине провода линии электропередачи.<sup>17</sup>

$$L_f = (L + dT \cdot v \cdot Cc) / 2,$$

$$dT = |t_1 - t_2|$$

где:  $L_f$  – расстояние до аварии,  $L$  – общая длина линии,  $t_1$  – время прихода фронта электромагнитной волны на один конец линии,  $t_2$  – время прихода фронта электромагнитной волны на второй конец линии,  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны<sup>18</sup>.

Применение двухстороннего волнового ОМП возможно на линиях с ветвлением, с односторонней, так и с двухсторонней запиткой.

Существенным являются следующие особенности волнового метода:

- точность не зависит от протяженности ВЛ;
- точность не зависит от наличия в сети собственной генерации;
- точность не зависит от наличия параллельных линий;
- точность не зависит от насыщения ТТ, нагрузки ВЛ, сопротивления грунта;
- работает при неустойчивых ОЗЗ и МФЗ.<sup>19</sup>

Для определения точности метода двухстороннего волнового ОМП рассмотрим результаты практической эксплуатации приборов, использующих этот метод. Приборы были установлены

<sup>17</sup> Лачугин В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи// Релейная защита и автоматизация, 2023, № 1(50). С. 58

<sup>18</sup> Abdelsalam M. A. E. Power transmission line fault location based on current traveling waves. Doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, 2008. P. 10–11

<sup>19</sup> Беляков Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи. ПЭИПК, 2008. С. 69

на двух концах линии СЦБ 10 кВ ПАО «РЖД». Линия представляет собой смешанную воздушно-кабельную линию общей длиной 37800 м, на которой имеются 8 кабельных вставок общей длиной 1270 м. Для проверки работы системы были проведены ряд искусственных однофазных замыканий на землю на разных точках линии. По результатам испытаний были получены результаты работы системы, приведённые в таблице 2.

Как видно из приведенных данных, полученные результаты имеют кучность в каждой из точек, но при этом погрешность возрастает к краям линии. Проблема в данной линии в том, что она неоднородна, и эта неоднородность не равномерно распределена вдоль линии.

Аналогичные испытания были проведены на линии 110 кВ с глухозаземленной нейтралью. Линия однородная воздушная общей длиной 193,4 км. Помимо приборов двухстороннего волнового ОМП на линии уже были установлены приборы, работающие по одностороннему методу ОМП, использующие импедансный метод. За время опытной эксплуатации был зафиксирован ряд аварийных событий. Данные указаны в таблице 3.

Приведённые испытания показывают, что погрешность метода двухстороннего волнового ОМП не превышает 100 метров на однородной линии, и имеет большую погрешность на неоднородной линии – до 600 метров. При этом погрешность одностороннего импедансного метода может достигать более 5 % от длины линии.

### Недостатки применимости метода

Недостатками двухстороннего волнового ОМП является необходимость установки приборов на всех концах линии, что для линий среднего класса напряжений с большим количеством отпаек будет экономически нецелесообразно. Также для работы системы необходимо наличие каналов связи и приборов синхронизации времени по системам точного времени GPS/GLONASS. Точность определения зависит от однородности линии и точности данных по реальной длине линии.

### Особенности ввода в эксплуатацию

После установки приборов для двухстороннего волнового ОМП необходимо произвести настройку и калибровку системы. Для этого необходимо соотнести электрическую длину линии с реальной длиной линии.<sup>20</sup> Для определения электрической длины линии требуется произвести включение линии как с одной стороны, так и с другой. Таким образом мы получаем время прохождения волны от одного прибора к другому. Зная данное время и длину линии вычисляем скорость распространения волны для данной линии.

Для этой цели необходимо проводить предварительно несколько включений линии; если имеется возможность двухсторонней запитки, то проводить эту процедуру с одной и с другой стороны. При такой операции также возникает электромагнитная волна, распространяющаяся по линии от места включения к противоположному концу.

Приборы ОМП, установленные в начале и в конце линии, фиксируют моменты прохождения этой волны через место их уста-

<sup>20</sup> Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Попов С.Г., Платонов П.С., Алексеев В.Г., Ключкин Н.Г., Подшивалин А.Н. Разработка и применение устройств определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием волновых методов // Энергия единой сети, 2021, № 5-6. С. 60

Таблица 2. Результаты работы системы ОМП установленной на ВЛ РЖД

№ испытания	dT, μs	расстояние до места аварии, м	Расстояние, полученное от приборов, м	Погрешность волнового метода, %
1	-137.6	36400	36006	1.04
2	-136.4	36400	35809	1.56
3	+26.1	13060	13325	0.7
4	+28.1	13060	13148	0.23
5	+26.5	13060	13289	0.6
6	+126.8	1700	1525	0.46
7	+127.5	1700	1438	0.69
8	+134.4	1700	1368	0.87

Таблица 3. Результаты работы импедансного и волнового методов ОМП

№ события	расстояние до места аварии, м	Расстояние по данным одностороннего ОМП (импедансного), м	Расстояние, полученное от 2-х стороннего волнового ОМП, м	Погрешность импедансного метода, %	Погрешность волнового метода, %
1	114 050	114 300	114 125	0.12	0.03
2	163 240	173 800	163 138	5.46	0.05
3	162 800	159 600	162 900	1.65	0.05
4	127 650	133 300	127 700	2.92	0.02
5	152 400	154 000	152 300	0.8	0.05

новки, и по разнице моментов  $dT$  можно рассчитать эквивалентную скорость распространения волны по формуле  $v = L / dT$ , где  $L$  – физическая длина линии, предоставляемая пользователем, получаемая из данных однолинейной схемы или измеренная тем или иным способом.

При наличии нескольких значений  $dT$ , полученных по результатам анализа набора включений линии, необходимо использовать среднее по набору этих значений:  $dT = \sum(dTi) / n$ , где  $dTi$  – значения, полученные при включениях с номерами  $i$  от 1 до  $n$ ,  $n$  – число включений.

Полученную величину  $v$  необходимо занести в программный комплекс для учёта впоследствии при вычислении расстояния до места аварии.

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОМП – МЕТОД, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИНЦИПЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

### Описание и применимость метода

Спектральный метод ОМП находится в стадии исследования применимости и используется в линиях постоянного тока. При возникновении КЗ в линии постоянного тока, напряжение поврежденного полюса резко снижается, и линия начинает разряжаться через место КЗ. Спектральный анализ процесса разряда позволяет выделить резонансную частоту короткозамкнутого контура, соответствующую нулевой проводимости контура. Зная «погонные» значения индуктивности и емкости ВЛ и значение резонансной частоты короткозамкнутого контура, представляется возможным вычислить длину короткозамкнутого участка.<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Болдырев И.В., Владимиров Л.В., Ощепков В.А. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи в распределительных сетях // Омский научный вестник, 2011, №3 (103). С. 206

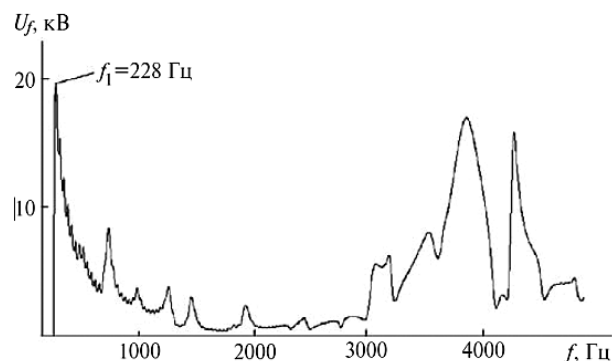


Рис. 5. Спектр напряжения повреждённой фазы

Спектральный метод ОМП предполагает использование информации об аварийных составляющих процесса, полученных с измерительных трансформаторов, установленных по концам линии постоянного тока и не требует применения дополнительного оборудования и позволяет определить расстояние до места повреждения с высокой точностью. На текущий момент исследуется возможность использования данного метода и для линии переменного тока.<sup>22</sup>

#### Недостатки применимости метода

Погрешность, возникающая при применении спектрального метода ОМП, складывается из следующих компонент: при низкой добротности контура (в случае высокого переходного сопротивления) частота переходного процесса смещается, что приводит к ошибке в расчете расстояния до места повреждения на ВЛ; погрешность определения затухания; погрешность задания «погонных» параметров линии (индуктивность, емкость, активное сопротивление); дополнительные факторы, связанные со структурой линии (наличие отпаек, неоднородностей, шунтирующих реакторов, других присоединений к РУ и других).

Теоретические расчёты показывают, что погрешность спектрального метода ОМП, обусловленная наличием переходного сопротивления в месте КЗ значением порядка 30 Ом, не превышает 0,3 % длины короткозамкнутого участка для ВЛ 110 и 220 кВ. Для ВЛ 330 кВ данная погрешность не превышает 0,5 %. Однако наряду с погрешностью расчета метода возникает дополнительная погрешность, связанная с ошибочным определением основной частоты в спектре сигнала, которая возрастает с увеличением переходного сопротивления. Появление нескольких максимумов обусловлено связью короткозамкнутых участков линии через переходное сопротивление, из-за чего сигнал из одного контура попадает в другой контур, и наоборот. Если, к тому же, переходное сопротивление нелинейно, возможна генерация комбинационных частот, что еще больше усложняет картину спектра. Данный вид погрешности вносит основной вклад в ухудшение точностных характеристик метода.<sup>23</sup>

<sup>22</sup> Иванова Е.А. Комбинированный способ определения места повреждения в линии электропередачи переменного тока. Электричество, 2015, № 7. С. 15

<sup>23</sup> Иванова Е.А. Комбинированный способ определения места повреждения в линии электропередачи переменного тока. Электричество, 2015, № 7. С. 18

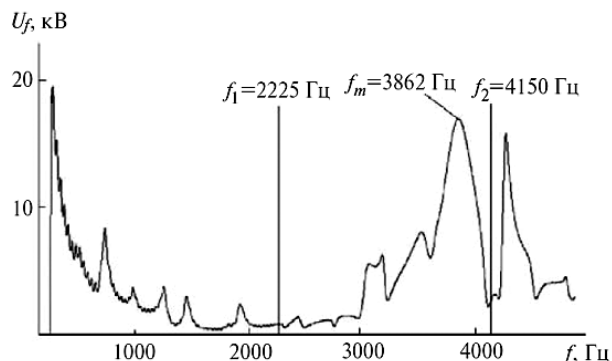


Рис. 6. Диапазон значимых частот в спектре напряжения повреждённой фазы

#### ОСОБЕННОСТИ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Для устранения погрешности, связанной с неточностью определения затухания, предлагается следующая последовательность преобразований: фильтрация сигнала для исключения частоты 50 Гц; амплитудное детектирование; логарифмирование.

Поскольку метод не используется в массовом производстве приборов ОМП и не используется серийно в производстве приборов ОМП для энергосистем, требования к вводу в эксплуатацию устройств защиты, построенных на таком методе, находятся в стадии формирования.

#### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДА ОМП И СПОСОБА КОМБИНИРОВАНИЯ МЕТОДОВ

Для распределительных сетей ВЛ 6–67 кВ:

- для протяженных ВЛ с небольшим количеством отпаек рекомендуется использовать волновой двухсторонний метод, при наличии длинных отпаек – с установкой постов ОМП на концах отпаек. Для определения мест ОЗЗ на ВЛ 6–67 кВ с изолированной нейтралью, а также при наличии собственной генерации в сети 6–67 кВ, этот метод является наиболее надёжным;
- для разветвленных ВЛ с большим количеством отпаек наиболее предпочтительны топографические методы с установкой индикаторов на ВЛ; использование переносных приборов нежелательно по соображениям электробезопасности и трудодоступности;
- импедансный односторонний метод применим для линий, когда нет доступа к противоположному концу ВЛ, однако места ОЗЗ этим методом определить затруднительно.

Для линий электропередачи класса напряжения 110–800 кВ:

- для ВЛ с одно- и двухсторонним питанием возможно применение как импедансного, так и волнового метода, но точность волнового метода при большой длине ВЛ и при больших переходных сопротивлениях в месте повреждения, выше;
- топографический метод применим на отпайках а так же для ВЛ, пересекающих административные и государственные границы, реки, болота и проходящих в горной местности на линиях с нерасщепленной фазой;
- спектральный и локационные методы применимы в равной степени для радиальных ВЛ с односторонней запиткой с малым количеством отпаек.

Перспективным представляется комбинация методов:

- для линий без отпаек длиной менее 100 км — комбинация импедансного и спектрального метода. Если определение расстоя-

яния до места повреждения на базе известных импедансных методов имеет погрешность до 9% длины линии, то уточнение расстояния до места повреждения с помощью спектрального метода позволяет снизить погрешность ОМП в рассмотренных случаях до 0,3%. Таким образом, проверка алгоритмов предлагаемого спектрального метода для уточнения ОМП по параметрам аварийного режима на цифровой модели ВЛ показывает, что такой подход действительно повышает точность нахождения расстояния до места замыкания;

- для протяженных линий с короткими отпайками наиболее оптимальным, в том числе с точки зрения стоимости, будет комбинация двухстороннего волнового метода на стволе и топографического на отпайках. В этом случае устройства топографического ОМП устанавливаются на отпайках и определяют поврежденную, а волновым методом определяется расстояние до повреждения ВЛ. Такая комбинация обеспечивает достаточную точность определения места повреждения при минимуме затрат. При необходимости повышения точности в дополнение к предыдущим методам рекомендуется добавить импедансный метод для получения расстояний до повреждения на отпайках;

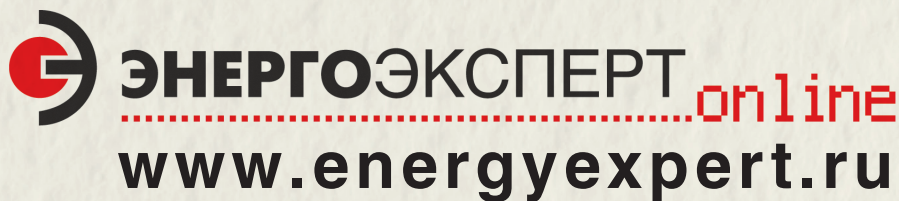
- для протяженных смешанных кабельно-воздушных линий обоснованным выглядит применение двухстороннего волнового метода и спектрального метода.

### ВЫВОДЫ

Как видно по результатам исследования, не существует универсального метода ОМП, подходящего под любую топологию сети, тип заземления и класс напряжения. Для каждого конкретного случая необходимо подбирать свой метод ОМП, учитывая все особенности ввода в эксплуатацию, которые могут стать основным ограничивающим фактором применения конкретного метода в конкретной системе. Так, существуют сети, в которых невозможно провести отключение линии, чтобы провести ввод в эксплуатацию нового оборудования, поэтому методы, которые предполагают отключение для калибровки, не смогут показать достаточную эффективность.

В статье показано, что комбинирование разных методов может дать лучшее решение, которое позволит минимизировать погрешность и дать точность до 100 метров при любой топологии сети и вида нейтралли. Это может быть ключевым фактором для высоконагруженных линий, питающих критические объекты.

Методы ОМП непрерывно развиваются и возникают новые, построенные на других принципах, которые могут дать лучший результат, чем те, которые приведены в данной статье. Поэтому следует продолжать работу над практическими испытаниями и результатами применения новых методов, разработку методических указаний по выбору методов и формирование технологических стандартов по вводу в эксплуатацию и тестированию систем ОМП.



Интернет-портал  
Издательского дома  
«Вся электротехника»