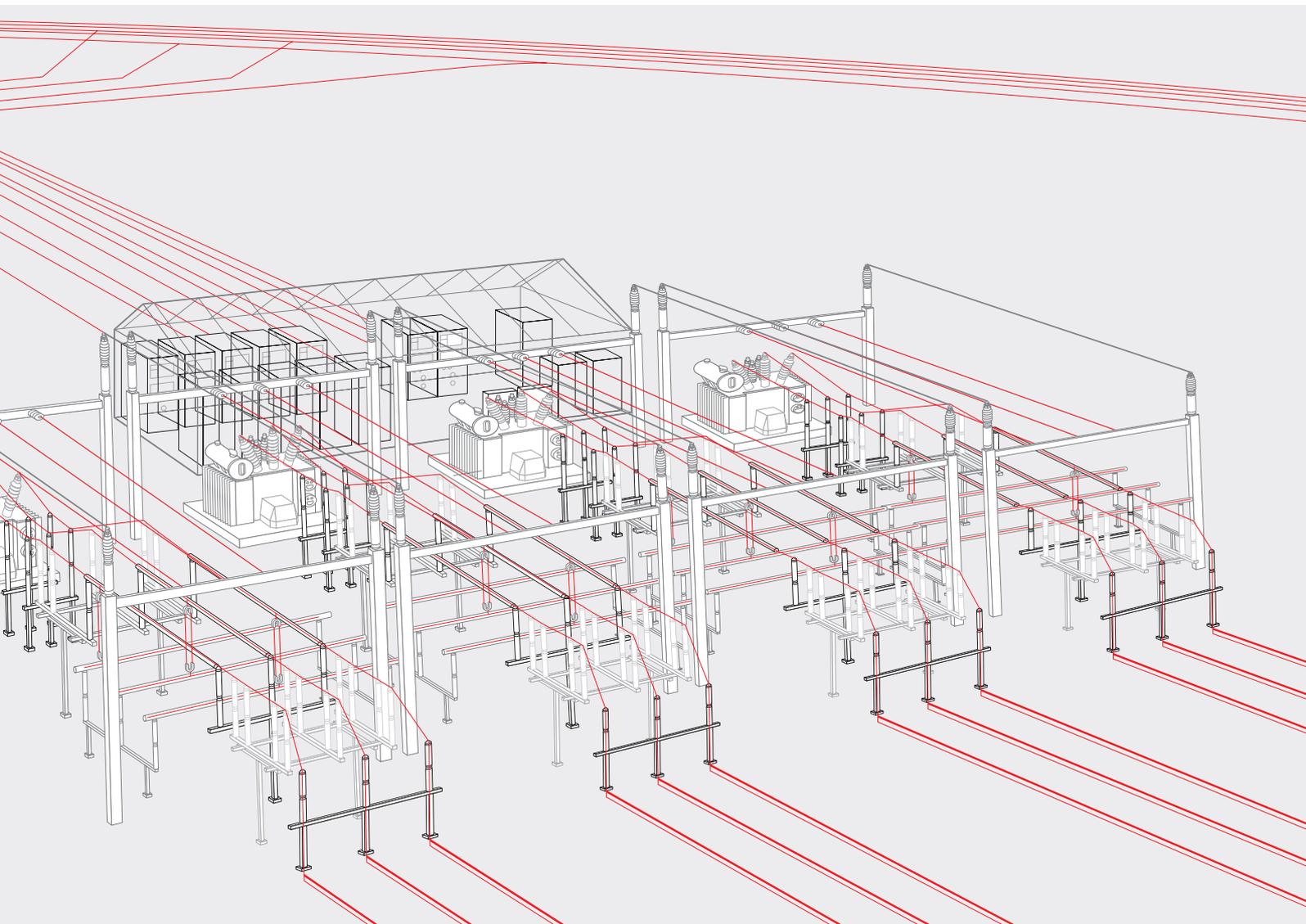


ABB WHITE PAPER

Применение нового метода на основе проводимости по гармоническому спектру при замыканиях на землю в сетях среднего напряжения с компенсированной нейтралью



Применение нового метода на основе проводимости по гармоническому спектру при замыканиях на землю в сетях среднего напряжения с компенсированной нейтралью

Ari Wahlroos*, Janne Altonen*

*ABB Oy Medium Voltage Products, Finland

Перевод: **Павел Давиденко**

Специалист отдела среднего напряжения ООО «АББ Лтд», Украина

Преамбула

В данной статье описан новый алгоритм защиты фидеров от замыканий на землю, применимый для сетей среднего напряжения с изолированной или компенсированной нейтралью. Предложенный алгоритм обеспечивает хорошую чувствительность защиты и очень высокую селективность даже при таких сложных повреждениях, как перемежающиеся замыкания на землю. Работа нового алгоритма основана на измерении гармонического спектра проводимости замыканий на землю в сочетании с техникой последовательного суммирования векторов (ПСВ). В статье сначала описана теория и принцип работы алгоритма, а далее преимущества и особенности при различных видах замыканий. Результаты показывают, что новый алгоритм обеспечивает универсальную функцию защиты, которая селективно определяет любые типы замыканий на землю. Кроме того, безопасность и надежность существующих схем защиты могут быть улучшены за счет нового метода, который может быть применен либо для сигнализации, либо для отключения поврежденного присоединения.

Часть 1. Введение

Потребность в качестве и надежности поставок энергии постоянно растет, так как общество становится все более и более зависимым от непрерывного электроснабжения. В целях повышения качества и доступности энергоснабжения, заземление нейтрали в сетях среднего напряжения по всему миру становится более распространенным. В таких компенсированных сетях самозатухающий характер дуги при замыканиях является основным фактором, способствующим улучшению качества питания. Компенсация также позволяет продолжить эксплуатацию сети в течение устойчивого короткого замыкания на землю, при условии того, что удовлетворяются условия для опасных перенапряжений, установленных законодательством и нормативными актами.

Хотя компенсация обеспечивает эксплуатационные преимущества, защиты от замыканий на землю становятся более сложными. На основании анализа многочисленных осциллограмм и опыте эксплуатации можно утверждать, что чаще всего замыкания на землю имеют перемежающуюся характеристику. Это означает, что замыкание самоустраняется очень быстро, но затем снова и снова повторяются из-за уменьшения прочности изоляции в месте повреждения. Такие замыкания, как правило, имеют малое сопротивление и должны надежно определяться защитой.

С другой стороны, особенно в смешанных сетях с кабельными и участками воздушных линий, существует возможность возникновения высокоомных замыканий на землю, которые так же должны быть обнаружены устройствами защиты.

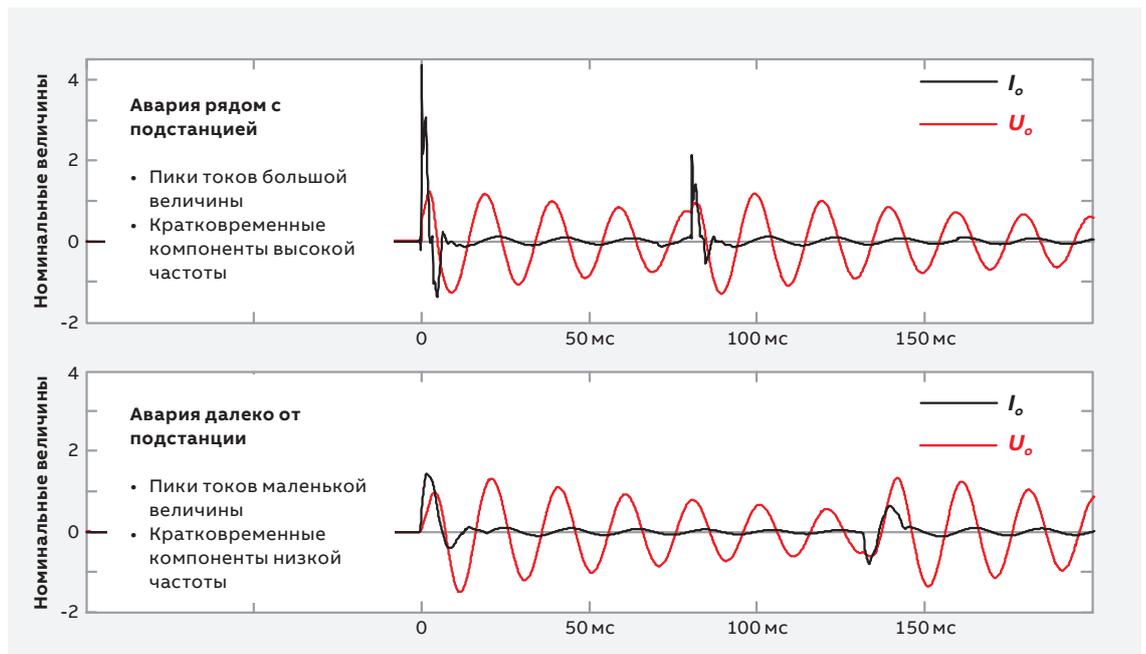
Существует большое разнообразие различных методов, применяемых в реле защиты с целью обнаружения и определения замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью. По принципу действия, методы грубо могут быть классифицированы как:

1. На основе составляющей основной частоты
2. Методы, основанные на гармонических составляющих
3. Методы, основанные на переходных составляющих

Основываясь на принципе их работы, можно сделать вывод, что применение каждого метода ограничено определенными характеристиками типа короткого замыкания. Методы, основанные на фундаментальных составляющих частоты, как правило, используются для выполнения требований к чувствительности защиты, установленных законодательством.

Они правильно работают в случае, если при замыканиях имеется четкий сигнал основной частоты. Но они могут не работать, если замыкания имеют переходную характеристику или присутствуют сильные искажения гармонического спектра. Применение методов, использующих гармонические составляющие ограничена из-за того, что содержание гармоник при замыканиях изменяется в зависимости от источников гармоник и может даже зависеть от времени. Методы, использующие переходные компоненты, как правило, основаны на измерении разрядов при переходных процессах в неповреждённых фазах при замыканиях на землю. Такие методы способны определять установившиеся низкоомные, а также перемежающиеся неустойчивые замыкания на землю при условии точного определения разрядов. Поскольку переходные процессы сильно зависят от сопротивления замыкания, то чувствительность методов на основе переходных составляющих становится весьма ограниченной. Кроме того, физическое расстояние до места повреждения может ввести значительный демфирующий эффект на переходные процессы. Такой пример показан на рисунке 1, где видны результаты полевых испытаний, проведенных авторами. Наблюдалось высокое затухание переходных процессов, когда место замыкания было перемещено в конец кабельной линии (примерно в 30 км от подстанции). Кроме того, переходные процессы при переключениях, наложенные на сигналы неисправности могут привести к неправильной работе защиты на основе переходных процессов. Такая ситуация может возникнуть вклочении выключателя на КЗ, при определении места замыкания или во время неудачного автоматического повторного включения. И, наконец, при установившихся низкоомных замыканиях на землю можно определить только начальный переходный процесс, что делает применение методов только по переходным составляющим устаревшим при ручном определении места замыкания и в случае работы защиты на сигнал.

Рисунок 1: Затухание переходных процессов при замыканиях в зависимости от места повреждения.



Действительно, из-за множества различных типов замыканий на землю, возникающих на практике, обнаружение замыкания на землю и определение направления в сетях с компенсированной нейтралью являются двумя наиболее сложными и важными задачами, возлагаемыми на устройства релейной защиты. Очевидно, что для того, чтобы выполнить требования по чувствительности, надежности и безопасности, различные функции защиты должны быть использованы параллельно, чтобы обеспечить полноценную схему защиты. Такая практика характерна для сегодняшних применений, что требует тщательного выбора и планирования, а также вносит дополнительную сложность в схему защиты.

В этой статье описан новый алгоритм, который обеспечивает решение описанных выше проблем. Все типы замыканий на землю могут быть селективно обнаружены всего одной функцией. Принципиальное новшество алгоритма состоит в том, что единичные векторы напряжений и токов заменяются накопленными значениями тех же величин при замыкании. Такой процесс суммирования векторов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами измерения, главным из которых является стабильная работа даже при тех случаях, когда сигналы тока и напряжения нулевой последовательности сильно искажены и содержат составляющие гармоник не промышленной частоты. Таким образом, этот метод особенно хорошо подходит для сетей с компенсированной нейтралью, где такие искажения измерений могут возникать довольно часто. Еще одним новшеством алгоритма является измерение и учет гармонических составляющих тока и напряжения при замыканиях на землю. С помощью нового алгоритма, проблема искаженных сигналов с точки зрения защиты может быть принята как благоприятная. Чувствительность алгоритма обеспечивается удовлетворением условия превышения напряжения нулевой последовательности $U_o >$, что для симметричной системы позволяет определять замыкания на землю с сопротивлением величиной в кОм-ы. Практически максимальный предел чувствительности зависит от значения напряжения нулевой последовательности в нормальном режиме которое учитывается при задании условия $U_o >$. Еще одно преимущество такого подхода заключается в простоте практической реализации алгоритма в современных устройствах РЗА.

Часть 2. Измерения проводимости по гармоническому спектру

В статье по ссылке [1] описан алгоритм, в котором векторы проводимостей по различным гармоникам суммируются к проводимости основной частоты. Результирующий вектор проводимости, используемый для определения направления при замыканиях на землю, выражается в виде выражения:

$$\bar{Y}_{osum} = \operatorname{Re} \left[\bar{Y}_o^1 \right] + j \cdot \operatorname{Im} \left[\bar{Y}_o^1 + \sum_{n=2}^m \bar{Y}_o^n \right] \quad (1)$$

Где, $\bar{Y}_o^1 = \bar{I}_o^1 / \bar{U}_o^1$ — вектор проводимости нулевой последовательности основной частоты, а $\bar{Y}_o^n = \bar{I}_o^n / \bar{U}_o^n$ — векторы проводимостей гармоник n^{th} , измеряемых устройством защиты (в величинах I_o и U_o это примерно 0,5% от номинального значения).

В уравнении (1) гармоники используются для повышения точности определения направления замыкания, что также справедливо и в случаях более с высоким сопротивлением в месте замыкания на землю, так как всегда учитывается гармоника основной частоты. Источниками гармоник в токах и напряжениях при замыканиях на землю в основном являются генерирующая гармоника нагрузка; намагничивание трансформаторов и дугогасящих реакторов; тип замыканий. Гармоники обладают очень ценными свойствами с точки зрения защиты от замыканий на землю, особенно в случае сетей с компенсированной нейтралью. Это происходит от того, что сопротивление дугогасящего реактора для более высоких частот имеет большее значение. При замыкании на землю векторы проводимостей по гармоническим составляющим для присоединений с повреждением и без направлены, как и в случае изолированной нейтрали, в полностью противоположные стороны, независимо от фактической степени компенсации.

Практическими проблемами для функций защиты на основе гармонического спектра является то, что из-за их природы, гармонические составляющие могут существенно изменяться во времени. Это особенно верно, например, для перемежающихся замыканий на землю. Все это может привести к некорректной работе защиты, а также затрудняет расчет уставок. Кроме того, так как составляющие высших гармоник в значительной степени зависят от сопротивления в месте повреждения, функции защиты только на основе гармонического спектра применимы только для замыканий на землю с малым сопротивлением. Общая схема защиты от замыканий на землю всегда будет требовать дополнительной функции с целью удовлетворения необходимой чувствительности.

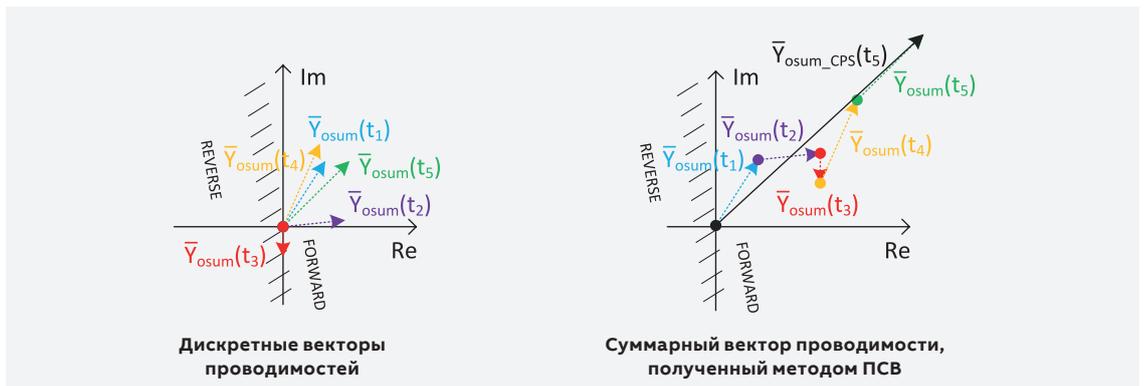
Для решения проблем защиты по основной частоте, гармонических и переходных методов, для защиты от коротких замыканий на землю, а также для стабильной и корректной работы во время перемежающихся и замыканий на землю, новый метод *последовательного суммирования векторов* (ПСВ) был представлен авторами в документе по ссылке [2]. Предложенный метод реализует расчет векторов при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ), но также обеспечивает точные результаты, когда измеряемые сигналы носят временный характер, сильно искажены или содержат составляющие высших гармоник. Даже переходные короткие замыкания на землю с бросками тока очень короткой продолжительности могут быть точно обнаружены благодаря фильтрации сглаживания до расчета векторов, что увеличивает их продолжительность, и позволяет обнаружить после дискретизации.

Часть 3. Последовательное суммирование векторов (ПСВ)

3.1 Применение метода ПСВ для определения направления

Идея последовательного суммирования векторов (ПСВ) очень проста для понимания и реализации. ПСВ является результатом суммирования комплексных величин измеренных векторов с использованием преобразования Фурье начиная с времени t_{start} и заканчивая в момент t_{end} . Данный процесс показан на рисунке 2, где суммарный вектор проводимости \bar{Y}_{osum} используется для расчета ПСВ определения направления.

Рисунок 2: метода ПСВ (для фидера с замыканием на землю).



При использовании алгоритма ПСВ для измерения проводимости нулевой последовательности справедливо выражение (2):

$$\bar{Y}_{osum_CPS} = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \operatorname{Re} \left[\bar{Y}_{osum}(i) \right] + j \cdot \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \operatorname{Im} \left[\bar{Y}_{osum}(i) \right] \quad (2)$$

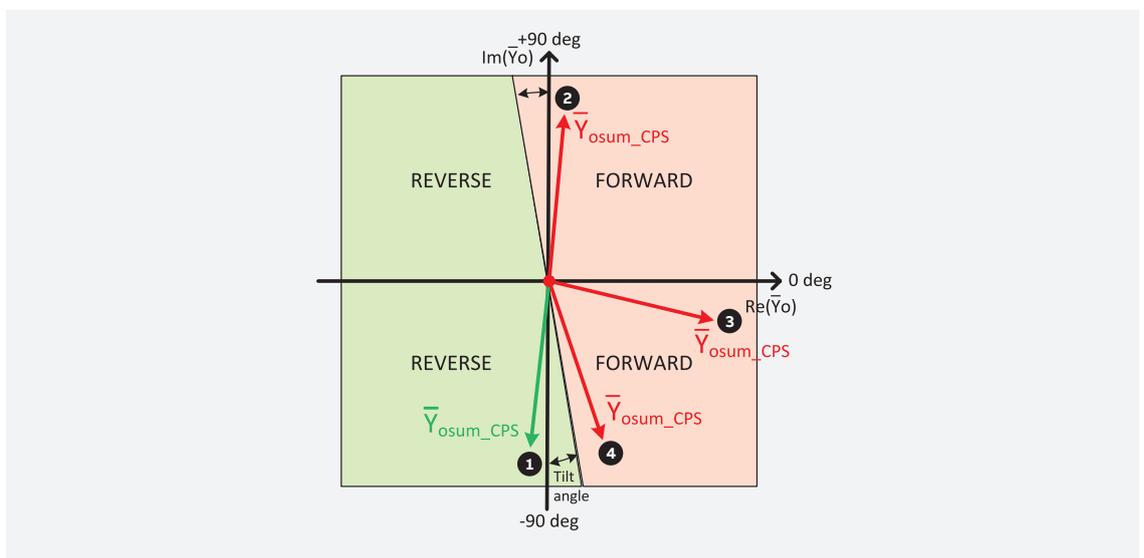
Время начала и окончания суммирования, а именно t_{start} и t_{end} , определяются на основании общего критерия обнаружения замыканий. Как правило таким критерием является условие превышения порога напряжения нулевой последовательности $U_o >$. Для того, чтобы суммирование векторов продолжалось между импульсами при перемежающихся замыканиях задается уставка времени возврата, которая должна превышать максимальное предположительное время между замыканиями (полученное при условиях полного резонанса). Процесс суммирования должен выполняться в достаточно коротких промежутках, например каждые 2,5 мс (400 Гц), чтобы определить векторы начальных переходных процессов при замыканиях настолько точно, насколько это возможно.

Вектор, рассчитанный методом ПСВ согласно уравнению (2), дает очень точное и стабильное представление о направлении замыкания, так как вектор суммы полной проводимости всегда направлен в сторону наибольшего потока электроэнергии, то есть в направлении замыкания. В случае, если в измерениях при замыканиях содержатся гармонические составляющие, направление КЗ становится еще более точным, так как векторы в поврежденных и здоровых фидерах направлены в полностью противоположных направлениях. как и в случае сети с изолированной нейтралью, независимо от фактической степени компенсации. Этот факт обеспечивает селективную работу защиты, позволяя, например, отключать только поврежденный фидер.

Преимуществом алгоритма ПСВ является то, что он обеспечивает стабильное направление вектора, несмотря на то, что одиночные векторы могут сильно отличаться по величине и фазе во времени из-за неустойчивого типа замыкания, особенно, например, при перемежающихся замыканиях на землю. Это также справедливо и для гармонических составляющих, которые могут сильно зависеть от времени. Для реализации такой функции защиты в реле используется характеристика направленности, показанная на рисунке 3. Такая характеристика обеспечивает универсальное применение как в сетях с компенсированной, так и с изолированной нейтралью (или если ДГР отключен). Характеристический угол наклона должен отражать погрешность измерений ТТ и ТН, чем больше погрешности измерений, тем больше должна быть уставка угла наклона, установка должна быть. На рисунке 3, изображены следующие векторы:

- Вектор 1 отображает направление суммарной проводимости при замыкании на землю за пределами защищаемой линии (при условии, что проводимость защищаемого фидера имеет преимущественно емкостной характер). Результат справедлив независимо от типа замыкания (низкоомные, с большим сопротивлением, устойчивые, перемежающиеся). В случае присутствия гармонических компонентов в измерениях, они повернут вектор в отрицательную сторону оси $\text{Im}(\bar{Y}_o)$.
- Вектор 2 отображает направление суммарной проводимости при замыкании на землю на защищаемом фидере для сети с изолированной нейтралью. Результат справедлив также и для сети с скомпенсированной нейтралью при наличии гармонических составляющих в измерениях (как правило, замыкания с малым сопротивлением, устойчивые или перемежающиеся). В этом случае результат справедлив независимо от фактической степени компенсации токов замыкания на землю. Гармоники повернут вектор в положительную сторону оси $\text{Im}(\bar{Y}_o)$.
- Векторы 3 и 4 отображают направление суммарной проводимости при высокоомном замыкании на землю на защищаемом фидере без гармонических составляющих для сети с компенсированной нейтралью. Поскольку гармонические составляющие отсутствуют, фазовый угол суммарного вектора определяется степенью компенсации. При перекомпенсации, вектор поворачивается в сторону оси $\text{Im}(\bar{Y}_o)$ (вектор 4).

Рисунок 3:
 Характеристика
 направленности
 вектора проводимости
 при использовании
 нового метода ПСВ.



3.2 Применение метода ПСВ для определения величины тока

Другой отличительной функцией метода ПСВ является возможность определения величины срабатывания при кратковременных перемежающихся замыканиях, когда измерения нулевых последовательностей сильно искажены. Это достигается путем вычисления соотношения суммарных векторов основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности. Результат представляет собой «устойчивую» проводимость нейтрали:

$$\bar{Y}_{ostab}^{-1} = \frac{\bar{I}_{oCPS}^{-1}}{-\bar{U}_{oCPS}^{-1}} = \text{Re} \left[\bar{Y}_{ostab}^{-1} \right] + j \cdot \text{Im} \left[\bar{Y}_{ostab}^{-1} \right] = G_{ostab} + j \cdot B_{ostab} \quad (3)$$

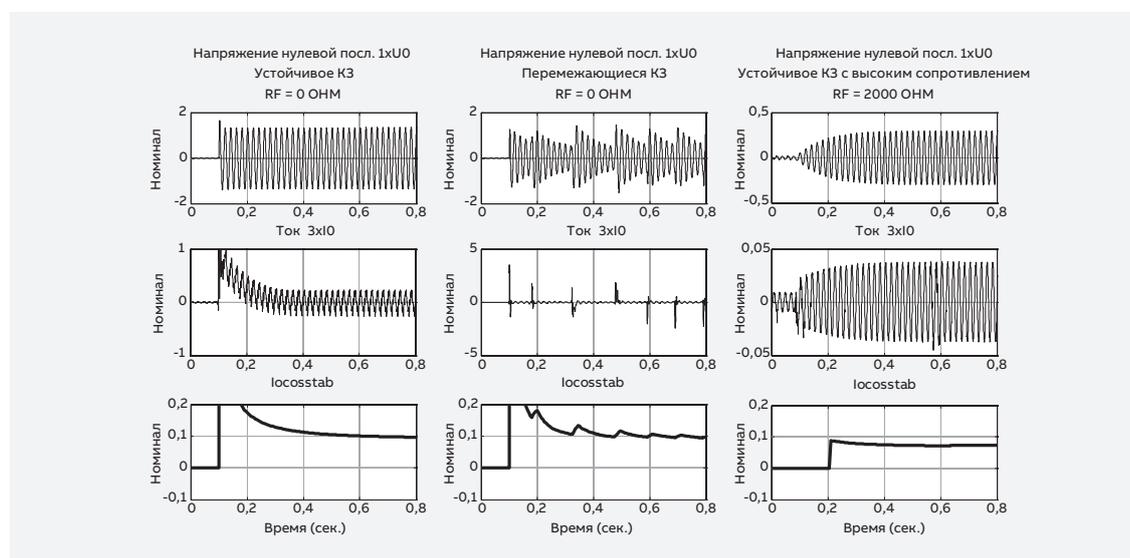
Подробные объяснения результатов измерений для защиты на основе полной проводимости при внешних и внутренних замыканиях можно найти из [1].

Это значение устойчивой проводимости может быть переведено в соответствующий ток путем умножения ее на номинальное фазное напряжение сети [3]:

$$\bar{I}_{ostab}^{-1} = (G_{ostab} + j \cdot B_{ostab}) \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} = I_{oCosstab}^1 + j \cdot I_{oSinstab}^1 \quad (4)$$

Величина тока срабатывания, определенная уравнением (4) на практике не зависит от величины сопротивления и типа замыкания (металлическое, низко- или высокоомное). Это показано на рисунке 4, где показаны результаты полевых испытаний, проведенных авторами. Сравниваются три различных типа короткого замыкания на землю (слева направо): устойчивое КЗ ($R_f=0$), перемежающиеся КЗ ($R_f=0$) и устойчивые КЗ с высоким сопротивлением. На нижних графиках показаны рассчитанные методом ПСВ вещественные составляющие тока срабатывания в сочетании с расчетом проводимости нулевой последовательности основной частоты, уравнение (4). Можно увидеть, что расчетные величины токов практически совпадают независимо от типа замыканий и величины сопротивления. В алгоритме резистивная часть тока используется для контроля определения направленности. При замыкании на защищаемом фидере величина $I_{oCosstab}^1$ положительна, а значение зависит от величины параллельного резистора в цепи ДГР и потерь в сети. При внешних замыканиях величина $I_{oCosstab}^1$ отрицательна, а ее значение соответствует потерям в поврежденном фидере. Тем не менее, из-за погрешностей измерений тока и напряжения, эта величина может оказаться положительной, что необходимо учитывать при расчете и задании уставок.

Рисунок 4: Расчет вещественных составляющих тока срабатывания при помощи метода ПСВ.



Часть 4. Подтверждение работоспособности

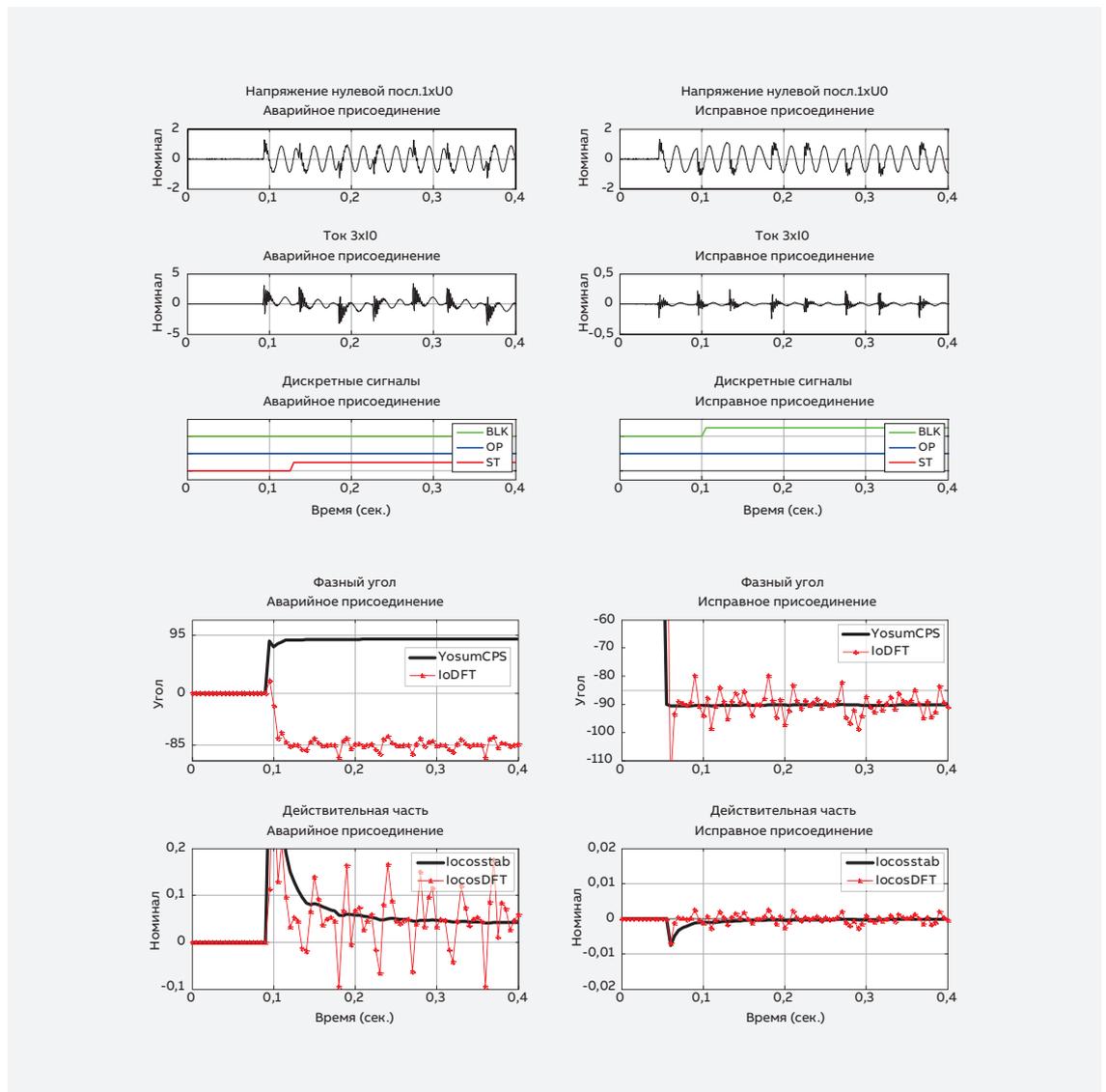
Предложенный алгоритм был активно испытан с записью реальных осциллограмм, представляющих широкий спектр замыканий в сети. Далее результаты алгоритма были проанализированы проанализирован для типовых замыканий, происходящих в сетях с компенсированной нейтралью. На рисунках ниже, показаны фазы вектора Y_{osum_CPS} , а также расчетная активная части величины $I_{oCosstab}^1$. Граница зоны срабатывания -85° и $+95^\circ$ (угол наклона 5°) отмечены на соответствующих графиках. Для сравнения на графиках показаны фаза амплитуда сигналов срабатывания при использовании только основной частоты 50 Гц (обозначенный как IoDFT).

4.1 Многократные замыкания на землю

Многократные замыкания являются наиболее распространенным типом замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью. Эти замыкания, как правило, имеют широкий спектр частот, и зачастую малое сопротивление замыкания. Они образуются как результат самозатухающих замыканий, когда время между повторяющимися импульсами может быть от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд. Многократные повторяющиеся замыкания вызывают сильные несинусоидальные искажения сигналов напряжения и тока, при этом стандартные методы защиты, основанные на измерениях промышленно частоты, не могут использоваться. На рисунке 5 представлен первый тип повторяющихся многократных замыканий на землю. В этом случае происходит повторное замыкание с интервалом приблизительно каждые 50 мс. Еще одной проблемой является то, что каждое переходное замыкание содержит высокие частоты и имеет колебательный характер. Такая форма волны является проблемной для защит на основе переходных методов, в частности основанные на «классическом» сравнении полярностей.

Как видно, новый алгоритм обеспечивает очень точное определение направление замыкания, несмотря на сильные искажения измеряемых сигналов и наличия в них высокочастотных компонентов. Напротив, использование гармонических составляющих обеспечивает полностью противоположное ($+90^\circ/-90^\circ$) направление векторов в поврежденных и здоровых фидерах, так же, как и в случае незаземленной нейтрали сети, независимо от фактической степени компенсации токов замыкания на землю. Новый алгоритм также обеспечивает точный расчет активной составляющей для критерия срабатывания, который используется в качестве дополнительного фактора для обеспечения селективного срабатывания защиты. В неповрежденном фидере, сигнал блокировки ВЛК указывает на то, что повреждение находится вне защищаемой зоны. При этом величина фазового сдвига при использовании стандартного дискретного преобразования Фурье (ДФП) находится на границе зоны срабатывания, что могло бы приводить к неселективным срабатываниям защиты.

Рисунок 5:
 Многократные
 замыкания на землю
 с присутствием
 компонентов
 высоких гармоник.

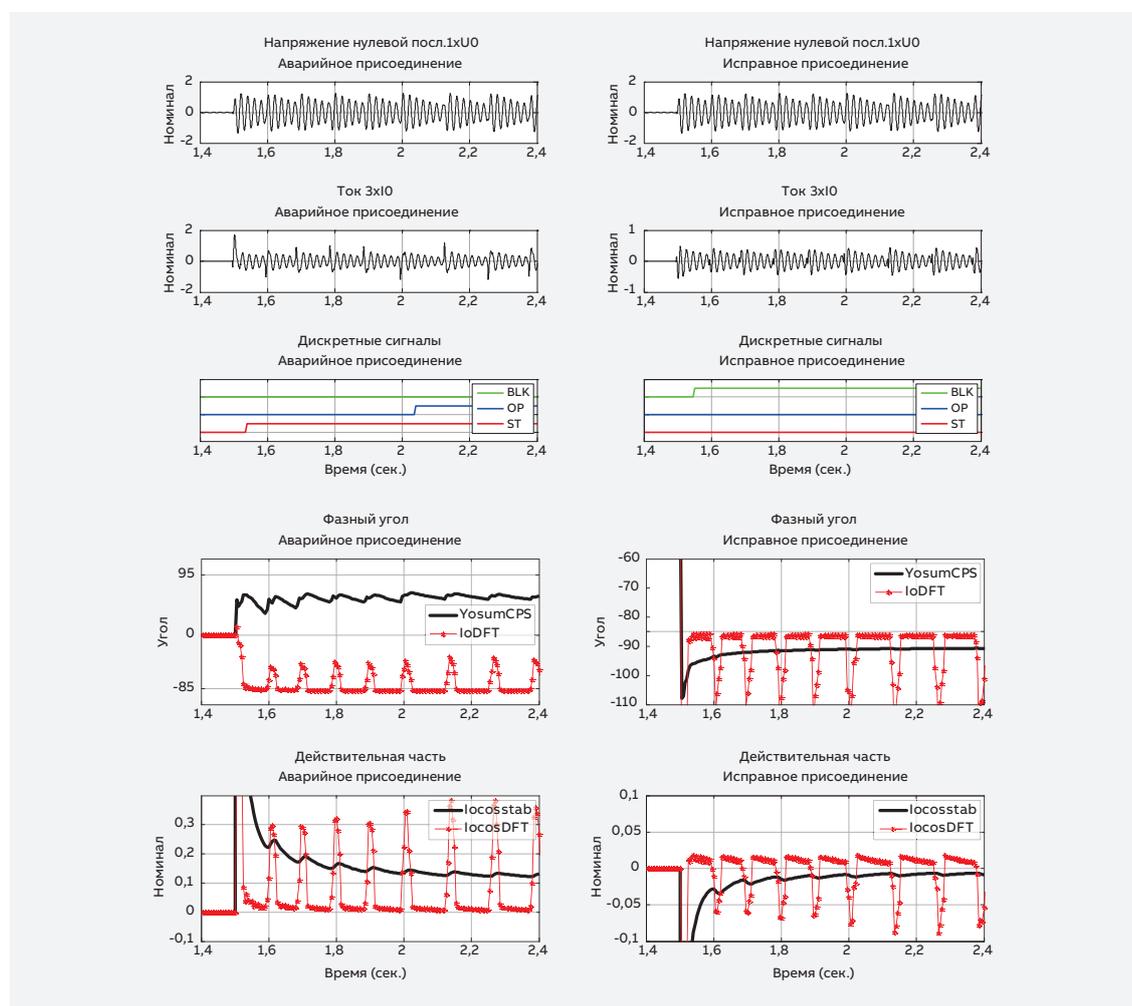


На рисунке 6 показан второй тип многократных замыканий на землю. В этом случае замыкание находится в конце длинной кабельной линии на расстоянии 30 км от подстанции. Дополнительной проблемой для этого теста является низкая амплитуда и частота переходных замыканий, которые могут поставить под угрозу правильное функционирование методов, основанных только на переходных процессах. Кроме того, присутствует затухание сигнала из-за значительного расстояния до места замыкания, а также параметров самой линии. Для стандартного метода ДПФ как величина срабатывания, так и направления очень нестабильны, что приводит к ложной работе защиты. Тем не менее, преимущества нового алгоритма от использования гармонических составляющих обеспечивают очень точное и селективное определение замыканий как по направлению, так и по уровню сигнала срабатывания, при этом все искажения эффективно отфильтровываются.

4.2 Кратковременные дуговые замыкания на землю

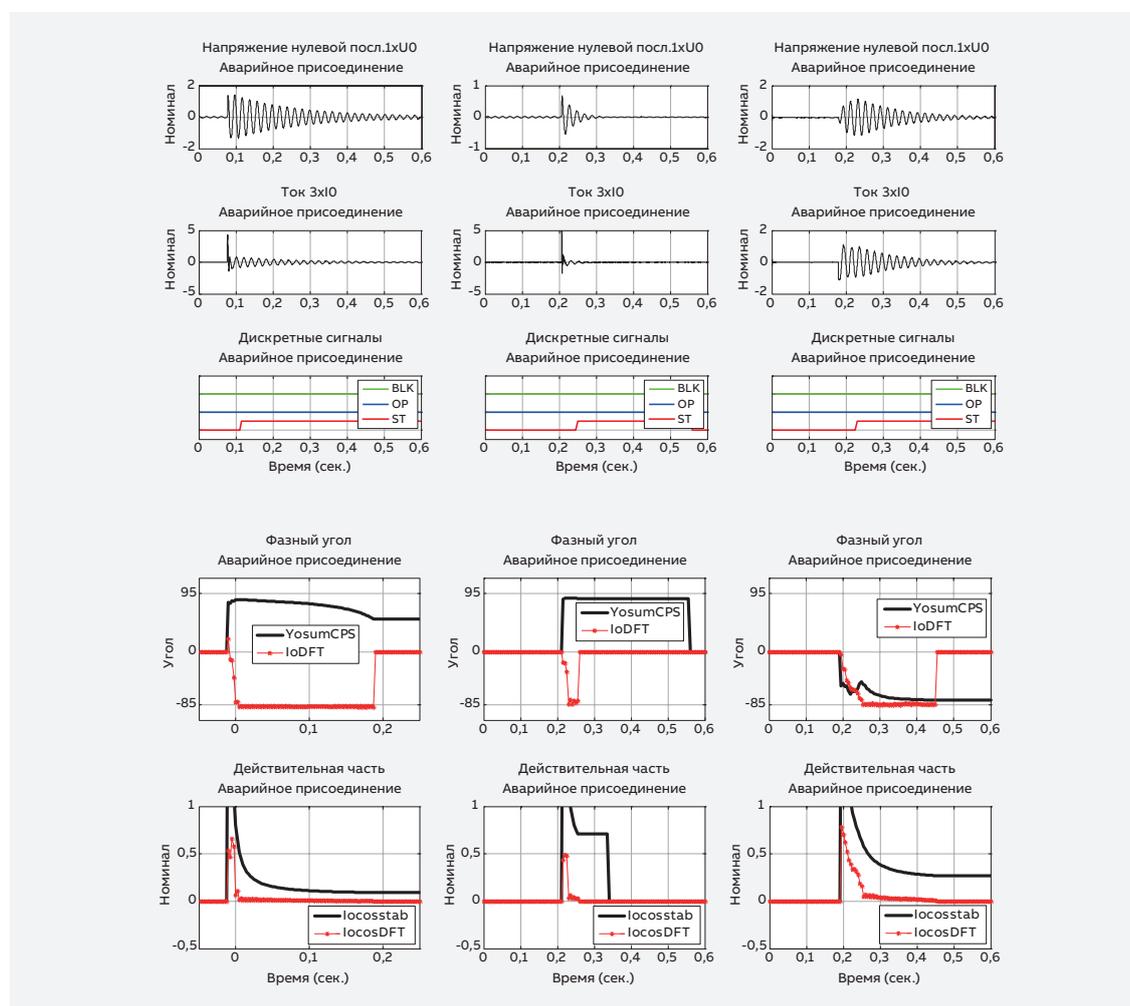
Кратковременные замыкания на землю характеризуется одной или несколькими дуговыми замыканиями, которые обладают способностью к самовосстановлению. Для временных замыканий на землю отключение выключателя на питающей подстанции не является необходимым или желательным.

Рисунок 6:
Многократные
замыкания на землю
в конце длинного
кабельного фидера.



На рисунке 7 представлены три различных типа кратковременных замыканий на землю с различными характеристиками. Два первых из них (слева направо) включают в себя начальные переходные высокочастотные сигналы, которые должны быть определены методом на основе переходных процессов. Третий тип замыканий имеет другую характеристику, в основном сигналы основной частоты. Такие типы повреждений не могут быть обнаружены с помощью методов на основе переходных процессов, а требуют использования алгоритмов на основе промышленной частоты. Несмотря на различные формы кривых и частотный спектр сигналов, корректное обнаружение замыканий может быть получено с помощью нового алгоритма. Селективное обнаружение таких повреждений может быть использовано в целях профилактического обслуживания, или, например, для сигнализации постепенного разрушения или пробоя изоляции. Это дало бы возможность эксплуатационному персоналу локализовать неисправность до того, как она перейдет в более тяжелое повреждение с необходимостью отключения потребителей.

Рисунок 7: Три примера кратковременных замыканий на землю на защищаемом фидере.

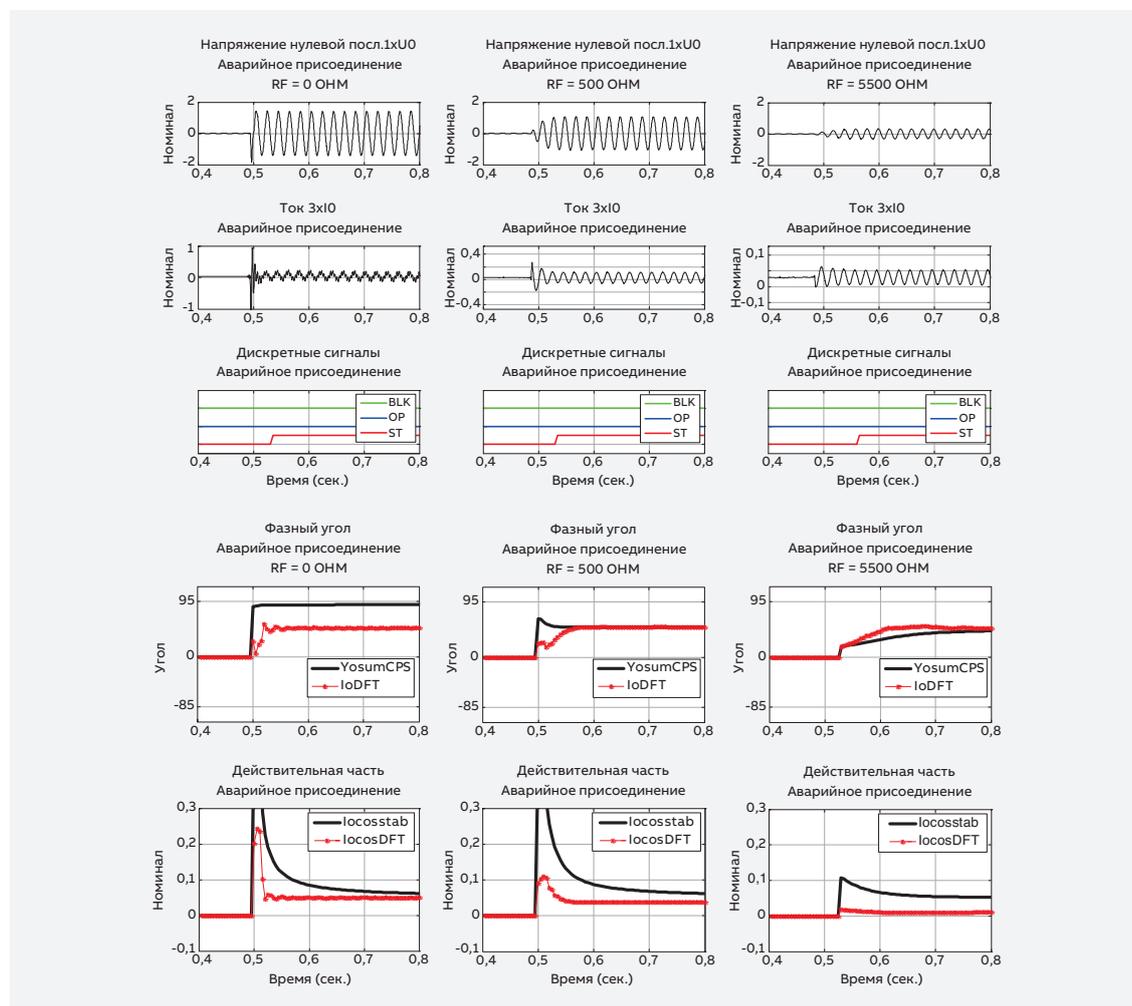


4.3 Устойчивые замыкания на землю

На рисунке 8 представлены примеры устойчивых замыканий на землю на защищаемой линии с тремя различными значениями сопротивления (0, 500 и 5500 Ом соответственно). Как видно, новый алгоритм обеспечивает очень точное определение повреждения, независимо от значения сопротивления.

В случае металлического КЗ на землю ($R_F = 0$ Ом), использование гармонических составляющих приводит к тому, что вектор направленности при новом алгоритме ведет себя также, как и в случае незаземленной нейтрали (угол $+90^\circ$ град.). При больших значениях сопротивления в месте повреждения гармоники подавляются, при этом направление вектора, полученное новым способом, соответствует результатам методов, основанных на основной частоте. Важно отметить, что так как метод основывается на полной проводимости, то резистивная часть характеристики срабатывания не зависит от величины сопротивления повреждения. В каждом случае уровень срабатывания зависит от значения сопротивления в цепи ДГР и потерь в самой сети.

Рисунок 8: Устойчивые замыкания на землю с сопротивлением 0, 500 и 5500 Ом.



Часть 5. Заключение

В данной статье описывается новый и запатентованный алгоритм для защиты от замыканий на землю в сетях среднего напряжения с компенсированной нейтралью. С помощью одной функции можно выполнить комплексное решение для защиты от замыканий на землю. Новая функция основана на запатентованном методе последовательного суммирования векторов (ПСВ) в сочетании с измерениями проводимости нулевой последовательности по гармоническому спектру. Эффективность работы новой функции была проверена с помощью сотни осциллограмм, полученных из реальных сетей с компенсированной и изолированной нейтралью. Результаты показывают, что новый алгоритм реализует универсальную функцию защиты, которая селективно обнаруживает все типы замыканий на землю, что значительно повышает общую безопасность и надежность существующих схем защиты.

Ссылки

[1] Wahlroos A., Altonen J., “Compensated networks and admittance based earth-fault protection”, seminar “Methods and techniques for earth fault detection, indication and location”, arranged by Kaunas University of Technology and Aalto University, 15th February, 2011.

[2] Wahlroos A., Altonen J. et al., “Application of novel cumulative phasor sum measurement for earth-fault protection in compensated MV-networks”, CIREN 2013 Stockholm.

[3] Wahlroos A., Altonen J., “Practical application and performance of novel admittance based earth-fault protection in compensated MV networks”, CIREN 2011 Frankfurt.

**ABB Oy, Medium Voltage Products
Distribution Automation**

P.O. Box 699
FI-65101 Vaasa, Finland
Phone: +358 10 22 11

**www.abb.com/mediumvoltage
www.abb.com/substationautomation**

