

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ФУНКЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Синхронизированные векторные измерения стоит рассматривать как набор технологий современных «цифровых» электрических сетей, уже сегодня обеспечивающих измерительной информацией системы управления электрическими режимами на качественно новом уровне. От доступности данных технологий зависит количество измерительных устройств в энергосистеме, а также перечень решаемых с их использованием задач. Одной из перспективных областей внедрения синхронизированных векторных измерений является релейная защита, в которой открываются новые возможности по совершенствованию ее функций и пересмотру существующих принципов выявления и локализации повреждений. Обзор включает рассмотрение основных направлений, связанных в первую очередь с обеспечением новыми, дополнительными свойствами существующих алгоритмов защиты элементов энергосистем, с расширением области применения защит с дифференциальным принципом работы для охвата распределенных присоединений, в том числе и разветвленных участков электрических сетей, с созданием новых пусковых органов, реагирующих на изменение формы одного или нескольких режимных параметров одновременно. Ключевые преимущества связаны с приобретением свойств адаптивности, быстродействием, повышением чувствительности, возможностью создания абсолютно селективных защит без каналов связи. Вместе с обзором направлений в статье приводится их классификация по использованию в составе существующих алгоритмов защит и в составе алгоритмов, основанных на новых принципах детекции повреждений. Уровень программно-аппаратного развития современных интеллектуальных электронных устройств обеспечивает интеграцию векторных измерений с существующими способами получения измерений и сигналов, в частности с алгоритмами их обработки. Несмотря на очевидные преимущества, особенности реализации концепции технологии синхронизированных векторных измерений, основанной на распределенных датчиках и цифровых каналах связи, существенно сужают область использования векторных измерений в релейной защите и других системах управления режимами электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** синхронизированные векторные измерения, концентратор синхронизированных векторных измерений, релейная защита, короткое замыкание, цифровая подстанция, интеллектуальное электронное устройство, цифровые каналы связи, высокодискретные измерения, адаптивная защита, Wide Area Protection System, Continuous Point-On-Wave

### ВВЕДЕНИЕ

В развитии цифровых информационно-измерительных систем можно выделить три основные известные технологии, которые сегодня используются на объектах электроэнергетики. Это технология работы с усредненными на интервале времени действующими значениями режимных параметров (IEC 60870-5, ModBus и др.), векторные измерения (IEEE C37.118), а также высокодискретные мгновенные измерения токов и напряжений (в рамках стандарта IEC 61850). Первая технология предназначена в первую очередь для использования в подсистемах АСУ ТП, тогда как две другие могут использоваться в том числе и в комплексах защит, сетевой и противоаварийной автоматике в качестве альтернативы аналоговому способу передачи измерений.

Преимущества передачи высокодискретных измерений заключаются не только в возможности использования одного потока Sampled Values (SV) для решения нескольких задач, но и в меньшей погрешности расчета модулей действующих значений и углов токов и напряжений в случае ложного измерения или пропажи точек мгновенных измерений, достигаемой за счет их избыточности на расчетном окне. Однако трансляция высокодискретных измерений через локальную коммуникационную сеть цифровой подстанции (ЦПС) приводит к ее значительной загрузке и задержкам при передаче, что особенно важно при реализации диффе-

ренциальных защит шин и ошинок с множеством присоединений. Кроме того, высокодискретные осциллограммы обеспечивают передачу формы кривых токов и напряжений для возможности расчетов гармонического спектра, что используется не во всех защитах. В связи с чем разумной альтернативой использованию SV-потоков может быть передача синхронизированных векторов режимных параметров только основной гармоники, получаемых в полевых датчиках – измерительных устройствах синхронизированных векторных измерений (УСВИ) – один раз за период или даже чаще.

Перенос функций расчета амплитуд и фаз из терминалов защит на полевой уровень потребовал обеспечения УСВИ модулями синхронизации времени, повысил требования к производительности данных устройств, создал необходимость организации протяженных высокоскоростных каналов связи и концентраторов синхронизированных векторных измерений (КСВИ) для обработки измерений, предполагающих установку на разных уровнях управления [1]. Все это привело к увеличению стоимости УСВИ и долгое время ограничивало их установку крупными узловыми энергообъектами и использование в таких важных прикладных системах Филиалов АО «СО ЕЭС», как СМРП, СМЗУ, НЧК, СМСР и др., а также модулях уточнения параметров схем замещения элементов энергосистем.

Постепенное снижение стоимости УСВИ, программно-аппаратное развитие вторичных устройств вместе с тенденцией централизации функций повысили

актуальность использования синхронизированных векторных измерений (СВИ) и в области релейной защиты. Причем имеется тенденция по применению СВИ не только в высоковольтных сетях, но и в сетях средних уровней напряжения. Основные ожидаемые перспективы связаны с повышением чувствительности защит, с защитой распределенных присоединений и участков сетей, с приобретением новых свойств.

#### ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСВИ В ЗАЩИТЕ

Принимая во внимание особенности реализации технологии СВИ, важным является вопрос области ее применения в релейной защите. Современные комплексы защит являются автономными системами, обеспечивающими обнаружение и селективную ликвидацию повреждения. Автономность их функционирования достигается получением измерений и принятием решения в точке установки терминалов. К инкапсуляции основных частей комплексов релейной защиты также относятся и каналы связи, обеспечивающие передачу сигналов на большие расстояния, за счет чего достигается требуемое быстродействие. В случае повреждения каналов связи основные защиты выводятся из работы, резервные, как правило, замедляются.

При наличии протяженных каналов связи, интеграция подсистем СВИ в автономные модули релейной защиты должна осуществляться только на уровне улучшения их существующих характеристик, нежели обеспечивать замену измерительных органов защит и основных принципов их функционирования на новые. Распределенные функции, реализованные на основе возможностей УСВИ, больше подходят для автоматизации и медленно действующей противоаварийной автоматики. Однако при этом использование СВИ в функциях релейной защиты в пределах цифровых станций и подстанций (ПС) становится более оправданным. Особенно актуальным является создание защит на СВИ с охватом множества присоединений (дифференциальных) в условиях ограниченности пропускной способности коммуникационной сети связи и обладающих практически в 3-4 раза меньшим объемом передаваемых данных в сравнении с защитами, использующими SV-поток.

В направлении совершенствования функций защиты вызывает сомнение, что измерительная и логическая части на основе СВИ полностью заменят традиционную релейную защиту в части новых принципов ее функционирования, однако ожидается, что они смогут значительно улучшить ее характеристики. В случае потери связи с подсистемой СВИ защиты не должны выходить из строя и должны надежно выполнять свои функции в соответствии с назначением.

#### КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ФУНКЦИЙ ЗАЩИТ С ВЕКТОРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Согласно требованиям существующей нормативно-технической документации [2], особо производительные решения должны иметь возможность реализовывать в своих алгоритмах работу с мгновенными значениями режимных параметров. Это открывает новые возможности по использованию математических методов обработки дискретизированных сигналов, ранее недоступных для аналоговых измерительных трактов.

Возможности использования СВИ токов и напряжений могут быть реализованы в следующих направлениях:

1. Обеспечение существующих защит элементов энергосистем новыми свойствами:

- Расширение свойств традиционных дифференциальных защит линий, двигателей, генераторов, шин и ошинок.
- Повышение чувствительности дистанционных защит при качаниях за счет уточнения зоны срабатывания защиты. Совершенствование функций блокировки от качаний (БЛК).
- Селективное срабатывание максимальных токовых защит (МТЗ) за счет фиксации направления протекания мощности короткого замыкания и снижение времени срабатывания за счет контроля векторов  $U$ .
- Защиты генераторов (от потери возбуждения и др.) с отслеживанием перемещения вектора режима его работы по P-Q-диаграмме. Адаптивные свойства.

2. Адаптивные защиты, подстраивающиеся к условиям изменения режима, и схемы сети. В основном это ступенчатые защиты с относительной селективностью, уставка или характеристика которых зависит от схемно-режимных изменений в энергосистеме.

3. Защиты с широким охватом защищаемой зоны (за счет охвата каналами связи и УСВИ) – WAMPAC (Wide Area Monitoring Protection and Control).

4. Централизация функций защит и автоматики в одном устройстве принятия решения с действием на исполнительные механизмы объектов энергосистемы через цифровые каналы связи.

5. Защиты, основанные на анализе трендов изменения векторов на комплексной плоскости или формы кривых тока и напряжения (технологии Continuous Point-On-Wave, или CPONW). Математический аппарат:

- применение вейвлет-преобразования DWT;
- применение методов машинного обучения AI.

Достаточно высокий темп измерения и передачи данных СВИ в КСВД, вплоть до 4 раз за период, позволяют применять современные методы оценки изменения трендов значений токов и напряжений и выполнять защиты, имеющие новые пусковые органы. Существующие алгоритмы цифровой обработки сигналов позволяют реализовывать быстрые и надежные функции защит на аппаратной базе с небольшой производительностью. Также интересным является возможность выявления момента развития аварии до ее наступления.

Стоит упомянуть, что при реализации новых принципов выявления повреждений возникают вопросы обеспечения расчета уставок таких защит, оценки коэффициента чувствительности, вопросы, связанные с согласованием таких защит между собой и с традиционными решениями в области защиты и автоматики.

#### РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИНТЕГРАЦИИ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ТРАДИЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ЗАЩИТЫ

Согласно проанализированным отчетам IEEE и публикациям компании North American SynchroPhasor Initiative за пять лет, с 2015 года по 2020 год, доля исследований в области применения УСВИ только в релейной защите выросла с 4 до 15%. В первую очередь это защиты линий, на которые приходится 11%

публикаций, и защиты станционного оборудования, на которые приходится около 4% публикаций. Это связано с повышением числа установленных на объектах УСВИ, развитием технологий и цифровых сетей передачи данных. Из совокупности научных работ можно выделить два актуальных направления, определяющих интеграцию СВИ в функции релейной защиты:

- Использование СВИ в составе существующих, традиционных алгоритмов защит.
- Использование СВИ в составе алгоритмов, основанных на новых принципах выявления повреждений, отличных от традиционных.

В вопросах актуальности использования СВИ в составе существующих алгоритмов защит очевидной областью их применения являются защиты, основанные на дифференциальном принципе. Преимуществом СВИ в таких защитах является не столько скорость срабатывания, сколько возможности обеспечения широкого охвата присоединений и значительного расширения защищаемой зоны за счет цифровых каналов связи [3]. В перспективе это позволит обеспечить защитой не только отдельные протяженные линии электропередачи, но и разветвленные участки распределительных электрических сетей напряжением от 6 до 35 кВ [4]. Последнее отчасти становится возможным в связи с появлением относительно недорогих датчиков СВИ (микроPMU класса P) [5], стоимость которых в ближайшее время прогнозируется на уровне 250-300 \$.

Новым в **дифференциальных защитах** является контроль векторов напряжения [6], применение которых ранее было невозможно из-за используемого в дифференциальных защитах принципа суммирования векторов токов. При повреждениях в зоне работы защиты между векторами напряжения по концам реактивной кабельной линии появляется разница по модулю и углу, что позволяет дополнительно фиксировать факт повреждения и повысить чувствительность дифференциальной защиты (**рис. 1**).

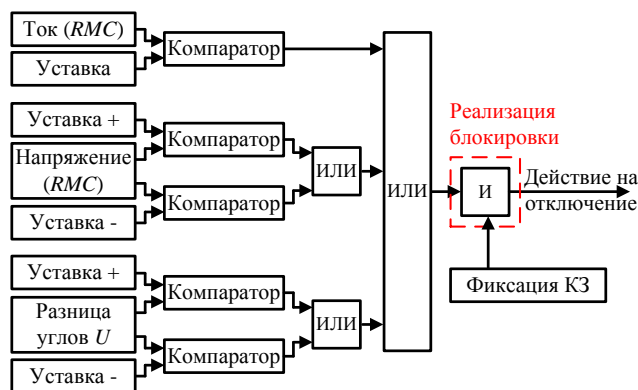
В случае реализации дифференциальной токовой защиты силового трансформатора с контролем векторов напряжения появляется возможность выполнять блокировку от бросков тока намагничивания по углу  $U$  [7].

Согласно источникам [8-10] для **резервных ступенчатых защит**, токовых и дистанционных, вычисление параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей по векторам СВИ производится за счет применения метода симметричных составляющих в традиционных алгоритмах защит. Для **максимальных токовых защит** применение СВИ, полученных в точке установки защиты, актуально прежде всего при выполнении органов фиксации направления протекания мощности, основанных на анализе углов токов и напряжений одноименных фаз. Использование СВИ в пусковых органах МТЗ увеличивает быстродействие цифровой защиты, однако при этом ухудшает отстройку от высших гармонических составляющих в токе нормального режима.

В [11] приводятся результаты, демонстрирующие эффект от контроля в МТЗ векторов напряжения шин противоположных подстанций. Помимо выдержек времени селективность обеспечивается за счет определения поврежденных и неповрежденных элементов электрической сети для выдачи разрешающих или блокирующих сигналов на выходные реле защиты (**рис. 2**).



**Рис. 1.** Качественно показанное изменение векторов напряжения при коротком замыкании на линии



**Рис. 2.** Блок-схема использования векторов напряжения для реализации функции блокировки токовой защиты

Алгоритмы **дистанционных защит** функционируют по принципу одностороннего замера и обязательно оснащаются БЛК. При этом заблокированная защита может не сработать при коротком замыкании (КЗ) с малой долей несимметрии, возникшем при качаниях. Для решения данной проблемы в [12] предлагается использование алгоритма БЛК, основанного на дифференциальном принципе и использующего СВИ для расчета дифференциального тока. Превышение дифференциального тока выше значения уставки разрешает действие защиты. Однако все это требует установленных на противоположных подстанциях комплектов УСВИ и цифровых каналов связи.

В общем смысле ускорение действия первых и вторых ступеней резервных защит может не иметь большого смысла в случаях локализации токов КЗ с большой и медленно затухающей апериодической составляющей, задерживающей переход тока через ноль на несколько периодов.

Помимо технологий, обеспечивающих улучшение характеристик существующих алгоритмов защит на основе функциональной связки УСВИ и КСВД, большое теоретическое развитие получил класс так называемых **адаптивных защит** (Adaptive Protection), особенно в областях дистанционных защит и защит генераторов. В условиях наличия управляемых элементов электрической сети существующие алгоритмы микропроцессорных защит позволяют обеспечить отстройку от регулировочного диапазона устройств гибкой компенсации, как правило, путем компромиссной настройки статичной формы характеристики срабатывания, что приводит к снижению коэффициента чувствительности защиты. Для обеспечения точной отстройки от регулировочного диапазона устройств гибкой компенсации реактивной мощности без существенного снижения чувствительности защиты требуется динамическое изменение ее уставок. Этот процесс небезопасен. Суммарное время цикла смены настроек оценивается в 2,2 секунды [13]. Этого должно оказаться достаточно в условиях работы устройств компенсации,

корректирующих параметры сети и режима ее работы, а также при возникающих схемно-режимных изменениях, вызванных работой оперативного персонала или работой сетевой автоматики. В то же время при потере сигналов от системы, обеспечивающей дополнительную информацию по данным СВИ, защита не будет выведена из работы и будет работать с традиционными статичными уставками.

Также разработка алгоритмов адаптивных защит актуальна и для активных распределительных сетей [14], содержащих возобновляемые источники энергии (ВИЭ), оснащенные устройствами компенсации.

В публикациях рассматриваются совершенствование характеристик срабатывания дистанционной защиты непосредственно по зонам, это вторая [15] и третья [16] зоны, а также коррекция по времени срабатывания ступеней, предназначенных для дальнего резервирования в сторону его уменьшения [8]. На **рис. 3** показаны характеристики срабатывания при степени продольной компенсации линии, равной 20 и 60%.

Для решения проблемы непопадания вектора сопротивления в зону работы второй ступени защиты предлагается алгоритм оценки степени компенсации по данным СВИ [8], а также использование комбинированных дистанционно-дифференциальных защит [17, 18]. Корректное действие третьих ступеней дистанционных защит при схемно-режимных изменениях в сети в [16] предлагается обеспечить за счет оценки сопротивления прямой последовательности в центре принятия решения (КСВД), вычисляемые и передаваемые по каналам связи от устройств – источников СВИ, установленных на разных шинах ПС.

Это обеспечивает сравнение характеристик срабатывания первых ступеней и ступеней дальнего резервирования для блокирования последних при срабатывании первых. Технологии СВИ в резервных защитах линий различных классов напряжения имеют высокую применимость. Даже с учетом достаточно большого времени передачи информации в КСВИ и обратного сигнала управляющего воздействия, позволяя сокращать время работы ступеней до 5 раз.

Помимо защит линий всех классов напряжения, адаптивные принципы могут быть использованы в **защитах генераторов**, например в защитах от потери поля, от потери возбуждения [19]. На их долю приходится около 60% всех срабатываний. Основная проблема традиционных защит, основанных на критерии предельного значения сопротивления, соответствующего границе статической устойчивости, заключается в сложности, а иногда и невозможности детекции повреждений в системе возбуждения во время колебаний. В [19], а также в публикациях [20, 21] измерения векторов используются в алгоритмах определения эквивалентного сопротивления системы в режиме on-line.

На **рис. 4** показано изменение формы характеристики при изменении сопротивления эквивалента системы. При увеличении эквивалентного сопротивления адаптивная характеристика пересчитывается (на **рис. 4** переход от синей к красной). При возникновении повреждения в системе возбуждения генератора, сопровождающегося полной или частичной потерей возбуждения, время реакции неадаптивной системы защиты на вхождение режима в зону срабатывания пускового органа может достигать от 140 до 150 мс.

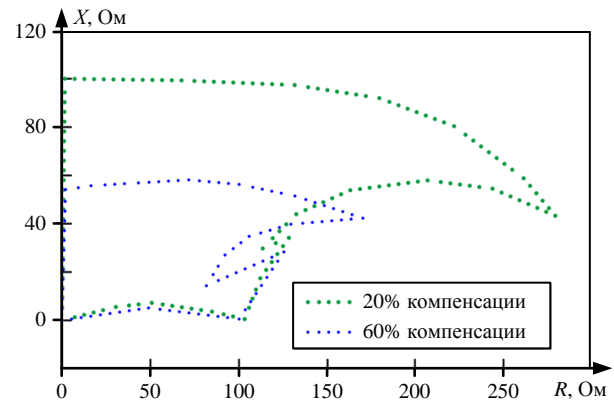


Рис. 3. Характеристика изменения сопротивления линии

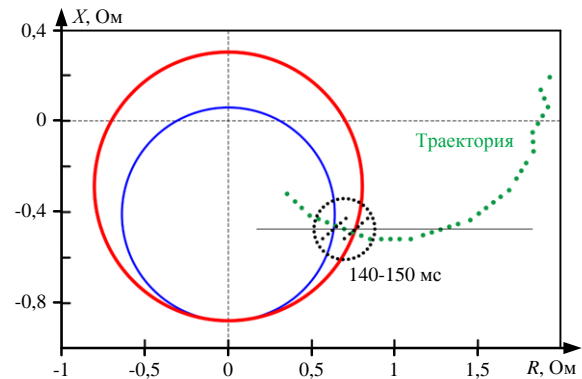


Рис. 4. Оценка времени определения повреждения

Если при этом реальная характеристика окажется меньше, использование защиты со статичными уставками может привести к ложной работе, вызванной преждевременным срабатыванием защиты.

Другим перспективным направлением использования СВИ для совершенствования защит генераторов является динамическое отслеживание перемещения вектора работы генератора по координатам P-Q-диаграммы с контролем пересечения ее границы, а также предела по статической устойчивости для реализации «мягкой» разгрузки генератора в случае потери возбуждения [20]. Предлагаемый алгоритм защиты обеспечивает не мгновенное отключение генератора, как в традиционных защитах, а предполагает оценку его возможностей по длительности работы без потери устойчивости, а также в случае необходимости его разгрузку в границах P-Q-диаграммы и предела по статической устойчивости, чем и достигается его адаптивность.

Отдельно стоит упомянуть про функции автоматики – синхронизации для генерации и выявления изолированной работы для микрогрид. Уже сегодня имеются функционирующие программно-технические комплексы автоматизации, построенные на СВИ и обеспечивающие синхронизацию микрогрид с внешней сетью общего пользования. Примером тому может служить система управления электроснабжением жил-массива «Березовое» в г. Новосибирске [22]. В распределительных электрических сетях, особенно в сетях крупных предприятий с собственной генерацией, работающей параллельно с сетью, востребованной является автоматика, обеспечивающая определение возникновения изолированного режима работы. В России это особенно актуально при подключении такого потреби-

теля к сети с наличием силовых выключателей только на стороне питающей подстанции электросетевой компании, без возможности контроля состояния линии по дискретным сигналам коммутационного аппарата. В зарубежных источниках данная автоматика входит в комплекс защит распределительных сетей и называется RAS (Remedial Action Scheme, или схема корректирующих действий), выполняющая функцию выявления изолированной работы по векторам напряжений [23]. Измерение векторов осуществляется как со стороны микрогрид, так и со стороны питающей подстанции.

Особым ключевым направлением развития СВИ в задачах управления является интеграция всех подсистем в единую централизованную программно-аппаратную платформу, обеспечивающую работу различных функций, в частности защиты и автоматики. Логика данного подхода, описанного во множестве публикаций и технических отчетах, близка к концепции создания IV архитектуры ЦПС. Она заключается в использовании возможностей общего коммуникационного и вычислительного пространства, без необходимости организации отдельных каналов связи со смежным оборудованием и для различных подсистем. Однако создание системы координации релейной защиты и автоматики на основе СВИ возможно только при достаточном числе УСВИ.

В [24] отмечается, что для распределительных сетей может быть создана система, обеспечивающая локализацию повреждений и контроль связности сети на основе алгоритмов обработки измерений и сигналов в едином центре принятия решения с использованием традиционных измерений действующих значений режимных параметров и дискретных сигналов без СВИ.

#### РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В связи с развитием устройств высокодискретных измерений и повышением вычислительных ресурсов микропроцессорных терминалов становится возможным разработка новых алгоритмов защит, основанных на иных принципах детекции повреждений.

В рамках концепции ЦПС переход на использование высокодискретных измерений (POW – Point of Wave) с дискретизацией токов и напряжений в диапазоне от 1 кГц до 10 МГц [25] дает возможность создавать новые пусковые органы, работа которых основана на анализе изменения формы кривых режимных параметров. Сегодня одними из важнейших и перспективных инструментов для работы с такими временными рядами являются искусственные нейронные сети (ИНС), а также механизмы дискретного вейвлет-преобразования (DWT). Первые, как универсальные аппроксиматоры и классификаторы, на основе обучения обеспечивают анализ формы кривых и позволяют устойчиво детектировать повреждения при различных схемно-режимных изменениях в сети без коррекции уставки. Вторые, использующие вейвлет-преобразования, обладают возможностью на разных уровнях разложения анализировать изменения кривых тока и напряжения каждой из фаз одновременно в частотной и временной областях, тем самым обеспечивая последовательное решение задач детекции повреждения, определения его вида, а также определения точного места повреждения, реализуя функцию опре-

деления места повреждения [26]. Ожидается, что алгоритмы таких защит смогу надежно выполнять свои задачи на четверти периода, что в 5 раз быстрее требований, предъявляемых к основным защитами. А создание многопараметрических защит, реагирующих на изменение форм сразу нескольких параметров, обеспечит приближение резервных защит по своим свойствам к защитами с абсолютной селективностью, без использования каналов связи.

Благодаря УСВИ с производительными аналоговыми преобразователями становится возможным превентивная детекция аварий за время не более 33 мс до наступления момента их развития [27]. В частности, обнаружения факта обрыва проводника с отключением поврежденного участка до того, как провод коснется земли. Основная идея заключается в мониторинге таких динамически изменяющихся параметров, как приращение вектора напряжения, углов и модулей напряжения обратной и нулевой последовательностей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные направления совершенствования функций защиты опираются в первую очередь на возможности современных УСВИ и устройств обработки этих измерений – КСВД. Технологии СВИ развиваются каскадным образом, при котором расширение области их применения приводит к росту числа устройств, что, в свою очередь, расширяет спектр решаемых задач.

Наиболее востребованными преимуществами использования СВИ в защите и автоматике являются возможности существенного расширения области их применения в традиционных алгоритмах, а также качественного улучшения их характеристик. В частности, комплексного введения в работу ступеней дальнего резервирования ступенчатых защит со снижением выдержек времени, возможности организации защит с широким охватом присоединений, основанных на дифференциальном принципе, что актуально прежде всего для распределительных сетей. Кроме того, инвестиционно-привлекательным направлением является разработка новых пусковых органов для защит элементов сети (особенно линий электропередачи), анализирующих форму изменения режимных параметров, что позволяет отказаться от использования каналов связи. Однако данное направление пока является концептуальным.

С другой стороны, существует ряд ограничений для применения СВИ не только в релейной защите, но и в других системах управления. Наиболее значимые из них связаны с кибербезопасностью, с разработкой стандартов в области измерений. К средней степени значимости можно отнести вопросы передачи данных по каналам связи и хранения и обработки больших объемов измерений.

*Представленные результаты являются итогом работ по теме «Разработка интеллектуальных алгоритмов управления энергосистемой на основе синхронизированных векторных измерений» в рамках комплексного проекта «Разработка систем управления энергосистемой с применением интеллектуальных алгоритмов и СМНР».*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Analysis of IEEE C37.118 and IEC 61850-90-5 synchrophasor communication frameworks / R. Khan, K. McLaughlin, D. Laverty, S. Sezer // IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). 2016. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741343
2. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Стандарт ПАО «ФСК ЕЭС». Дата введения изменений 11.12.2019. 357 с.
3. Ramesh L., Chowdhury S.P., Chowdhury S. Wide area monitoring protection and control - A comprehensive application review // 10th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP). IET, 2010. Pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2010.0325
4. Khederzadeh M. Wide-area protection in smart grids // 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP). IET, 2012. Pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2012.0078.
5. Leibovich P., Issouribehere F., Barbero J. Design and Implementation of a low-cost PMU: validation by tests and performance during 2019 Argentinean blackout // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638242
6. PMU-voltage drop based fault locator for transmission backup protection / J.J. Chavez, N.V. Kumar, S. Azizi, J.L. Guardado, J. Rueda, P. Palensky, V. Terzija, M. Popov // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 196. Pp. 1-8. doi: 10.1016/j.epr.2021.107188
7. Системы управления, мониторинга и защиты на основе синхронизированных векторных измерений / С.А. Пискунов, А.В. Мокеев, Д.Н. Ульянов, А.И. Попов, А.В. Родионов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 93-го заседания семинара. Волжский, 13-17 сентября 2021 года. В 2-х кн. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, 2021. С. 133-142.
8. Motavalian A.R., Moadabi N., Gharehpetian G.B. Reliability Assessment of Power System Backup Protection in Smart Grid Control Center Using Phasor Measurement Units (PMU) // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2013. No. 11. Pp. 404-410. doi: 10.24084/repqj11.324
9. Karthick S., Lakshmi K. Wide area backup protection scheme for power transmission lines using PMU // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 2(9). Pp. 273-281.
10. Jena M.K., Samantaray S.R., Panigrahi B.K. Supervisory control based wide area back-up protection scheme for power transmission network // National Power Systems Conference (NPSC). IEEE, 2016. Pp. 1-5. doi: 10.1109/NPSC.2016.7858869
11. Saran A. Comparison between overcurrent relay and developed PMU based protection // North American Power Symposium (NAPS). IEEE, 2013. Pp. 1-6. doi: 10.1109/NAPS.2013.6666919
12. Rao J.G., Pradhan A.K. Application of synchrophasor data for fault detection during power swing // International Conference on Energy, Automation and Signal. IEEE, 2011. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147180
13. Ariff M.A M., Pal B.C. Adaptive Protection and Control in the Power System for Wide-Area Blackout Prevention // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31(4). Pp. 1815-1825. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2518080
14. Keramat M.M., Fazaeli M.H. The New Adaptive Protection Method for the Compensated Transmission Lines with the Series Capacitor in a High Share of Wind Energy Resources by Using PMU Data // 7th Iran Wind Energy Conference (IWEC). IEEE, 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9466998
15. Sarangi S., Pradhan A.K. Apply PMU data for Zone-2 setting of series compensated line // International Conference on Energy, Automation and Signal. IEEE, 2011. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147184
16. Synchrophasor Assisted Adaptive Relaying Methodology to Prevent Zone-3 Mal-Operation During Load Encroachment / D. Pal, B. Mallikarjuna, R.J. Reddy, M.J.B. Reddy, D.K. Mohanta // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 17(23). Pp. 7713-7722. doi: 10.1109/JSEN.2017.2728862
17. Ehsan N., Behrouz V., Mehdi M. Modified Transmission Line Protection Scheme in the Presence of SCC // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2017. Vol. 12. Pp. 533-540. doi: 10.5370/JEET.2017.12.2.533.
18. Study on adaptive relay protection scheme based on phase measurement unit (PMU) / F. Chunju, L. Shengfang, Y. Weiyong, K.K. Li // Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. IET, 2004. Pp. 36-39. doi: 10.1049/cp:20040057
19. Adaptive loss of field protection based on phasor measurements / T. Bi, J. Sui, H. Yu, Q. Yang // IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011. Pp. 1-4. doi: 10.1109/PES.2011.6039170
20. Senapati S., Bhattacharya K.D., Das J.K. Application of phasor measurement unit in adaptive protection for loss of excitation in a generator // 6th IEEE Power India International Conference (PIICON). IEEE, 2014. Pp. 1-5. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117655
21. Desai J.P., Makwana V.H. Phasor Measurement Unit Incorporated Adaptive Out-of-step Protection of Synchronous Generator // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2021. Vol. 9(5). Pp. 1032-1042. doi: 10.35833/MPCE.2020.000277
22. Синхронизация Microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения / А.Г. Фишов, А.Х. Гуломзод, Е.С. Ивкин, Р.Ю. Семендяев // Релейная защита и автоматизация. 2021. №2. С. 32-42.
23. Skok S., Frlan K., Ugarkovic K. Detection and Protection of Distributed Generation From Island Operation by Using PMUs // Energy Procedia. 2017. Vol. 141. Pp. 438-442. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.057
24. A centralized protection and control scheme for microgrid / M. Xu, T. Meng, G. Zou, J. Zhang, X. Lin, J. Yang // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2015. Pp. 1-5. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380867
25. Phasor or Waveforms: Considerations for Choosing Measurements to Match Your Application / J. Follum, L. Miller, P. Etingov, H. Kirkham, A. Riepnies, X. Fan, E. Ellwein // Pacific Northwest report. 2021. 43 p.
26. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks // IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755
27. Dase K., Harmukh S. Detecting and Locating Broken Conductor Faults on High-Voltage Lines to Prevent Autoreclosing Onto Permanent Faults. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208508639> (дата обращения 23.05.2022).

Поступила в редакцию 14 июня 2022 г.

## RELAY PROTECTION IMPROVING BY MEANS OF USING PMU TECHNOLOGIES

Nikita D. Mukhlynin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, nd.mukhlynin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2065-3231>

Petr M. Erokhin

D.Sc. (Engineering), Professor, Research Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, petr\_erohin@bk.ru

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Automated Electric Systems Department, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, a.v.pazderin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4826-2387>

A PMU should be considered as a set of modern digital electrical grid technologies, which provide measuring information for control systems of electrical modes at a high new level. The number of measuring devices in the power system, as well as the list of tasks solved with their use, depends on the technology availability. One of the promising areas for PMU introduction is relay protection, which opens up new opportunities for improving its functions and revising the existing principles for detecting and tripping faults. The article includes a review of the main areas related to providing new additional properties of the existing algorithms for protecting power system elements, expanding the protection area with a differential operation principle to protect feeders and sections of electrical grids, creating new fault detectors that react to a change in the shape of one or several mode parameters at the same time. The key advantages are associated with the acquisition of adaptability properties, speed, increased sensitivity, the ability to create absolutely selective protection without communication channels. Along with the overview of trends, the article provides their classification according to their use as a part of existing protection algorithms and as part of algorithms based on new fault detection principles. The level of software and hardware development in modern intelligent electronic devices provides the PMU integration to the existing methods of obtaining measurements and signals, and, in particular, with their processing algorithms. Despite the obvious advantages, the features of the PMU implementation based on distributed sensors and digital communication channels significantly narrow the application area for modern relay protection with PMU and other control systems in electric power grids.

**Keywords:** Phasor Measurement Unit, Phasor Data Concentrator, relay protection, fault, digital substation, Intelligent Electronic Device, digital communication channel, highly discrete measurements, adaptive protection, Wide Area Protection System, Continuous Point-On-Wave

## REFERENCES

1. Khan R., McLaughlin K., Laverty D., Sezer S. Analysis of IEEE C37.118 and IEC 61850-90-5 synchrophasor communication frameworks. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM 2016). IEEE, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741343
2. Standart 56947007-29.120.70.241-2017. Technical requirements for microprocessor-based relay protection. FGC UES, PJSC standard. Date of changes introduction: 11.12.2019. 357 p. (In Russian)
3. Ramesh L., Chowdhury S.P., Chowdhury S. Wide area monitoring protection and control – A comprehensive application review. 10<sup>th</sup> International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change. IET, 2010, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2010.0325
4. Khederzadeh M. Wide-area protection in smart grids. 11<sup>th</sup> IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). IET, 2012, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2012.0078
5. Leibovich P., Issouribehere F., Barbero J. Design and Implementation of a low-cost PMU: validation by tests and performance during 2019 Argentinean blackout. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM 2021). IEEE, 2021, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638242
6. Chavez J.J., Kumar N.V., Azizi S., Guardado J.L., Rueda J., Palensky P., Terzija V., Popov M. PMU-voltage drop based fault locator for transmission backup protection. Electric Power Systems Research. 2021, pp 1-8. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107188
7. Piskunov S.A., Mokeev A.V., Ulyanov D.N., Popov A.I., Rodionov A.V. Control, monitoring and protection systems based on PMU. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki: Materialy 93-ego zasedaniya seminara* [Methodological Issues of Researching the Reliability of Large Energy Systems. Materials of the 93rd meeting of the seminar]. Irkutsk, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2021., pp. 133-142. (In Russian)
8. Motavalian A.R., Moadabi N., Gharehpetian G.B. Reliability Assessment of Power System Backup Protection in Smart Grid Control Center Using Phasor Measurement Units (PMU). *Renewable Energy and Power Quality Journal*, pp. 404-410. doi: 10.24084/repqj11.324
9. Karthick S., Lakshmi K. Wide area backup protection scheme for power transmission lines using PMU. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2015, vol. 2(9), pp. 273-281.
10. Jena M.K., Samantaray S.R., Panigrahi B.K. Supervisory control based wide area back-up protection scheme for power transmission network. *National Power Systems Conference (NPSC 2016)*. IEEE, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/NPSC.2016.7858869
11. Saran A. Comparison between overcurrent relay and developed PMU based protection. *North American Power Symposium (NAPS 2013)*. IEEE, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/NAPS.2013.6666919
12. Rao J.G., Pradhan A.K. Application of synchrophasor data for fault detection during power swing. *International Conference on Energy, Automation and Signal*. IEEE, 2011, Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147180

13. Ariff M.A.M., Pal B.C. Adaptive Protection and Control in the Power System for Wide-Area Blackout Prevention. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, vol. 31(4), pp. 1815-1825. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2518080
14. Keramat M.M., Fazaeli M.H. The New Adaptive Protection Method for the Compensated Transmission Lines with the Series Capacitor in a High Share of Wind Energy Resources by Using PMU Data. 7<sup>th</sup> Iran Wind Energy Conference (IWEC 2021). *IEEE*, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9466998
15. Sarangi S., Pradhan A.K. Apply PMU data for Zone-2 setting of series compensated line. *International Conference on Energy, Automation and Signal*. *IEEE*, 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147184
16. Pal D., Mallikarjuna B., Reddy R.J., Reddy M.J.B., Mohanta D.K. Synchrophasor Assisted Adaptive Relaying Methodology to Prevent Zone-3 Mal-Operation During Load Encroachment. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17(23), pp. 7713-7722. doi: 10.1109/JSEN.2017.2728862
17. Ehsan N., Behrouz V., Mehdi M. Modified Transmission Line Protection Scheme in the Presence of SCC. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017, vol. 12, pp. 533-540. doi: 10.5370/JEET.2017.12.2.533
18. Chunju F., Shengfang L., Weiyong Y., Li K.K. Study on adaptive relay protection scheme based on phase measurement unit (PMU). *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*. *IET*, 2004, pp. 36-39. doi: 10.1049/cp:20040057
19. Bi T., Sui J., Yu H., Yang Q. Adaptive loss of field protection based on phasor measurements. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. *IEEE*, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/PES.2011.6039170
20. Senapati S., Bhattacharya K.D., Das J.K. Application of phasor measurement unit in adaptive protection for loss of excitation in a generator. 6<sup>th</sup> IEEE Power India International Conference (PIICON 2014). *IEEE*, 2014, pp. 1-5. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117655
21. Desai J.P., Makwana V.H. Phasor Measurement Unit Incorporated Adaptive Out-of-step Protection of Synchronous Generator. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, vol. 9 (5), pp. 1032-1042. doi: 10.35833/MPCE.2020.000277
22. Fishov A.G., Gulomzode A.Kh., Ivkin E.S., Semendyaev R.Yu. Synchronization of the Microgrid with the external electrical grid and between each other in normal and post-emergency modes with different combination grid schemes. *Releyhnaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2021, no. 2, pp. 32-42. (In Russian)
23. Srdjan Skok, Kristijan Frlan, Kresimir Ugarkovic. Detection and Protection of Distributed Generation From Island Operation by Using PMUs. *Energy Procedia*, 2017, vol. 141, pp. 438-442. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.057
24. Xu M., Meng T., Zou G., Zhang J., Lin X., Yang J. A centralized protection and control scheme for microgrid. 2015 *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2015)*. *IEEE*, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380867
25. Follum J., Miller L., Etingov P., Kirkham H., Riepnicks A., Fan X., Ellwein E. Phasor or Waveforms: Considerations for Choosing Measurements to Match Your Application. *Pacific Northwest report*. 2021. 43 p.
26. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks. *IEEE Madrid PowerTech*. *IEEE*, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755
27. Kanchanrao Dase, Sajal Harmukh, Arunabha Chatterjee. Detecting and Locating Broken Conductor Faults on High-Voltage Lines to Prevent Autoreclosing Onto Permanent Faults // 2019. *Semantic Scholar*. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208508639> (accessed 23 May 2022).

Мухлынин Н.Д., Ерохин П.М., Паздерин А.В. Направления совершенствования функций релейной защиты за счет использования технологий синхронизированных векторных измерений // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 3(56). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11)

Mukhlynin N.D., Erokhin P.M., Pazderin A.V. Relay Protection Improving by Means of Using PMU Technologies. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11)