

Апросин К.И., Тавлинцев А.С., Семенов С.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

В настоящее время в опытную эксплуатацию вводятся первые проекты цифровой подстанции, выполненные по стандарту МЭК61850. В таких цифровых подстанциях измерения тока и напряжения передаются внутри подстанции при помощи коммуникационной сети, называемой шиной процесса по широкополосному протоколу Sampled values, с периодом 0,25 мс, эта же сеть используется для синхронизации устройств измерения по протоколу РТР. Шина процесса в этом случае характеризуется высокой загрузкой, для ее реализации далеко не всегда хватает пропускной способности коммутаторов 100 Мбит Ethernet, поэтому в части новых проектов переходят на технологию Gigabit Ethernet, что приводит к существенному удорожанию проекта. Высокая загрузка шины процесса не позволяет использовать ее для передачи команд управления, передаваемых с помощью протокола GOOSE, потому для передачи команд управления используется отдельная сеть, называемая шиной станции, что ведет к разрастанию объема коммуникационных сетей на подстанции, что не удобно с эксплуатационной точки зрения. В данной статье рассматривается альтернативный вариант передачи замеров тока и напряжения при помощи протокола С37.118. В отличие от протокола Sampled values, этот протокол регламентирует передачу векторных измерений, посчитанных на основе измерений за один период основной частоты. В настоящее время этот протокол используется в Системе Мониторинга Переходных Режимов (СМПР), с частотой обновления векторных данных один раз в 20 мс. Однако частота обновления является настраиваемым параметром, и если организовать передачу 4-х векторов за период основной частоты, то можно обеспечить требуемое время реакции защит цифровой подстанции в 25 мс. В статье приведены основные подходы к проверке и реализации измерительной цифровой подстанции на базе уже развернутой системы СМПР.

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, функции РЗА, векторные измерения.

### ВВЕДЕНИЕ

В результате стремительного развития современных вычислительных средств и коммуникационных сетей появилась возможность создания централизованной релейной защиты и автоматики (ЦРЗА) подстанции. Такое решение обладает целым рядом преимуществ, таких как повышение уровня управляемости подстанцией, снижение капитальных затрат за счёт уменьшения количества терминалов и вторичного оборудования, сохранение надёжности защиты, возможность централизованного удалённого управления подстанцией и т.д. Одним из препятствий на пути создания ЦРЗА подстанции является отсутствие практического опыта эксплуатации таких объектов [1].

В настоящее время в России на подстанциях 220-500 кВ развернута система мониторинга переходных процессов (СМПР). В рамках этой системы на каждое присоединение высокого и среднего напряжения подстанции устанавливается устройство синхронизированных векторных измерений (СВИ), которое измеряет ток и напряжение и выдает синхронизированные векторные замеры тока и напряжения, как представлено на **рис. 1**. Эти данные передаются на общий для подстанции концентратор синхронизированных векторных данных (КСВД). Таким образом, на подстанции уже существует устройство, на котором присутствуют векторные измерения токов и напряжений со всей подстанции.

С целью накопления практического опыта эксплуатации ЦРЗА в настоящей работе предлагается концепция реализации опытно-промышленной эксплуатации на базе КСВД. Ключевыми особенностями

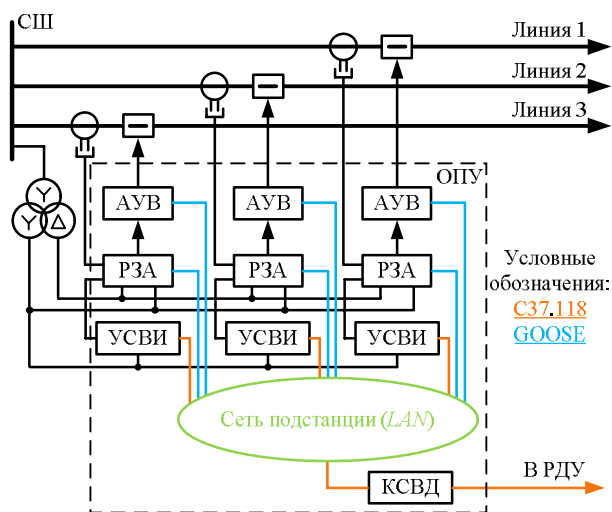
предлагаемого решения ЦРЗА является отсутствие передачи мгновенных значений через коммуникационную сеть подстанции, так как замеры тока и напряжения передаются в виде векторов. Это должно существенно снизить трафик в коммуникационной сети подстанции по сравнению с ЦПС по стандарту МЭК61850, который предусматривает передачу массивов мгновенных значений [2].

Перенос функций регистрации аварийных ситуаций на конечные измерительные устройства с возможностью передачи на КСВД (по необходимости).

Перевод всех функций РЗА на работу исключительно с векторными замерами параметров режима.

На начальном этапе накопления опыта эксплуатации и доработки алгоритмических решений возможно либо подавать выходные сигналы ЦРЗА, либо подавать только в регистраторы аварийных событий, либо ограничиться только фиксацией срабатывания непосредственно внутри КСВД. Ввиду того, что существующий КСВД не включен в схемы управления подстанцией, возможна реализация первого варианта вообще без подсистемы выдачи управляющих воздействий. Это решение позволит без значимых капиталовложений в оборудование и при отсутствии экономического ущерба для потребителей и энергосистемы накопить необходимый практический опыт, а также отладить работу алгоритмов ЦРЗА.

В статье рассмотрены основные особенности реализации ЦРЗА на базе КСВД. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить при разработке ЦРЗА без передачи мгновенных значений измерений тока и напряжения. Предложены этапы развития ЦРЗА на базе существующих устройств СВИ.



**Рис. 1. Пример решения по подключению устройств СВИ на существующих подстанциях**

В рамках задачи по реализации ЦРЗА на базе КСВД и УСВИ необходимо поэтапно решить следующие основные задачи:

- обеспечить запись параметров электрического режима в аварийных ситуациях на уровне устройств, осуществляющих вычисление векторов (УСВИ);
- исключить функции защиты, использующие мгновенные значения токов и напряжений;
- обеспечить передачу массивов мгновенных значений для средств учёта электроэнергии, использующих мгновенные значения (не в реальном времени);
- разработать практическую методику синхронизации по времени всех устройств на подстанции по протоколу PTP с учетом резервирования.

#### ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЦРЗА

Для снижения капиталовложений на начальных этапах накопления опыта промышленной эксплуатации развитие ЦРЗА можно разделить на несколько этапов:

1. ЦРЗА реализуется на существующем КСВД с минимальными изменениями оборудования на подстанции.
2. В ЦРЗА, реализованной на существующем КСВД, добавляется возможность выдачи дискретных сигналов по протоколу GOOSE [3] (или любому другому протоколу, позволяющему обмен дискретными сигналами по сети Ethernet на уровне L2). На этом этапе GOOSE сообщения о срабатывании ЦРЗА используются исключительно для осциллографирования внешним регистратором аварийных событий.
3. На каждом из УСВИ, установленном на подстанции, реализуется функция регистрации параметров аварийных режимов с возможностью передачи массивов мгновенных значений на КСВД по необходимости (не в режиме реального времени).
4. В ЦРЗА, реализованной на существующем КСВД, организуется выдача GOOSE сообщений о срабатывании, которые передаются как на УСВИ для запуска регистраторов аварийных событий, так и на терминал автоматики управления выключателем (АУВ). На этом этапе появляется возможность работы ЦРЗА на отключение.
5. УСВИ переходят на синхронизацию исключительно по коммуникационной сети и помещаются в шкафы на ОРУ в непосредственной близости от измерительных трансформаторов. Терминалы АУВ также

выносятся на ОРУ к управляемым ими выключателям.

На первом этапе в программное обеспечение КСВД добавляются собственно функции РЗА и функция регистрации момента срабатывания. Дискретный сигнал РЗА добавляется к архиву векторных измерений, который ведется на КСВД. В отличие от устройства РЗА, КСВД имеет непрерывный архив измерений как аварийных, так и нагрузочных режимов, поэтому функция регистрации аварийных событий в нем сводится просто к фиксации требуемого сигнала в архиве, сигнал пуска осциллографа не требуется. Несмотря на отсутствие в архивных данных КСВД мгновенных замеров, по имеющимся данным можно судить о правильности работы алгоритмов ЦРЗА. Появляется возможность отладки алгоритмов ЦРЗА. Однако по таким данным невозможно установить время реакции системы ЦРЗА и оценить время отключения короткого замыкания с помощью ЦРЗА.

На втором этапе сигналы срабатывания ЦРЗА выдаются на штатный регистратор аварийных событий (РАС), установленный на подстанции при помощи GOOSE-сообщений через коммуникационную сеть подстанции. При этом на регистраторе формируется осциллограмма, содержащая как синусоиды токов и напряжений, так дискретный сигнал срабатывания ЦРЗА. По такой осциллограмме можно оценить время реакции функции РЗА, реализованной на сервере КСВД. Синхронизация данных измерений выполняется с использованием сервера точного времени, размещенного на подстанции, по коммуникационной сети подстанции. Это приводит к возможности отказа от существующей системы синхронизации по коаксиальному кабелю (по протоколу IRIGb).

На третьем этапе реализуется система регистрации аварийных событий на базе УСВИ. Пуск процесса записи массива мгновенных значений токов и напряжений на УСВИ осуществляется при помощи GOOSE-сообщений о срабатывании (или о пуске) функции ЦРЗА на КСВД. Такая система уже не зависит от наличия РАС на подстанции и может самостоятельно формировать осциллограммы аварийных событий. Единственное отличие от существующей системы РАС – необходимость сводить осциллограммы разных УСВИ в единую осциллограмму. Такое сведение выполняется с использованием меток времени, которые УСВИ присваивают моменту пуска осциллограммы.

На четвертом этапе планируется реализовать возможность передачи команд на отключение выключателей на терминал автоматики управления выключателем. В этот момент ЦРЗА, реализованная на КСВД, может частично или полностью подменять существующие схемы РЗА подстанции.

На пятом этапе планируется вынести УСВИ на открытое распределительное устройство подстанции и разместить их рядом с измерительными трансформаторами. В результате этого отпадает необходимость передачи аналоговых сигналов по территории подстанции и вся информация передается в цифровом виде по коммуникационной сети.

Результатом такой поэтапной модернизации является цифровая подстанция с ЦРЗА (рис. 2). На такой подстанции отсутствуют кабели, по которым передаются аналоговые сигналы от измерительных трансформаторов до устройств измерения. Реализация всех функций РЗА на едином сервере позволяет отказаться от большого количества отдельных терминалов РЗА, что может удешевить переход на цифровую реализацию РЗА.

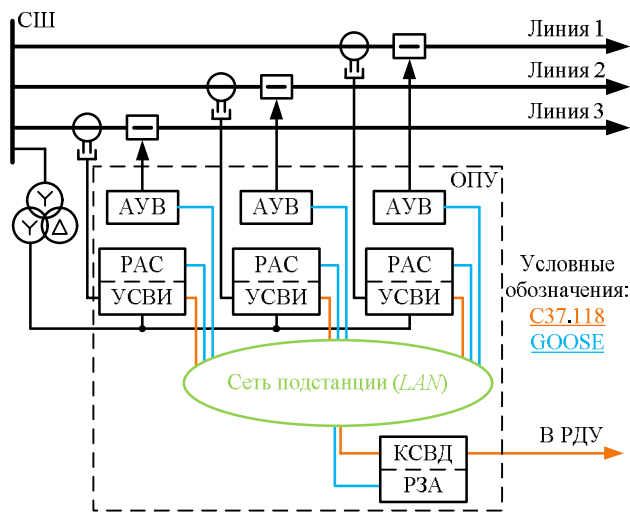


Рис. 2. Пример конечного решения по реализации ЦРЗА на базе КСВД и УСВИ

ОСНОВНЫЕ ТРУДНОСТИ

*Время реакции*

По действующему в настоящее время стандарту С37 118 УСВИ выдают замер каждый период основной частоты. Такая частота обновления данных не позволяет использовать КСВД в качестве устройства защиты, работающего без выдержки времени, так как существующая нормативно-техническая документация в области РЗА требует время реакции 25 мс. Однако существует техническая возможность настройки УСВИ на вычисление и выдачу замера каждые 5 мс. В этом случае возможно получить время реакции, соизмеримое с требуемым временем реакции традиционных терминалов РЗА.

*Насыщение ТТ*

Отдельной проблемой при использовании данных существующих УСВИ для РЗА может стать точность их работы в условиях близких коротких замыканий (КЗ). Значительная часть существующих УСВИ подключается к измерительным обмоткам ТТ, которые уходят в режим насыщения при близких КЗ. Решением может стать разделение УСВИ на классы: класс «М» (измерения) и класс «Р» (защита). Последние должны быть подключены к релейным обмоткам ТТ, точка перегиба вольт-амперной характеристики которых должна находиться выше максимально возможной величины тока КЗ. В противном случае корректная работа функций РЗА не гарантируется.

*Синхронизация по времени*

От наличия синхронизации измерений зависит работа всех направленных и дифференциальных защит подстанции. Поэтому одного источника синхронизации для устройств РЗА недостаточно. Должен быть резервный механизм синхронизации, желательно на другом физическом принципе.

В настоящее время УСВИ обычно синхронизируются по протоколу IRIG-b с использованием шины синхронизации из коаксиального кабеля. В этих условиях резервирование синхронизации может выполняться при помощи двух шин с устройством переключения между ними. Основной проблемой является сама топология шины, в которой замыкание на экран в любой точке приводит к потере всех подключенных

устройств и, как следствие, отключению функции синхронизации времени.

В настоящее время существует возможность синхронизации по протоколу РТР [4], когда данные для синхронизации передаются по той же коммуникационной сети, по которой передаются данные измерений. Основной проблемой такой технологии является требование аппаратной поддержки протокола всеми устройствами коммуникационной сети, что приведет к увеличению затрат на сетевое оборудование с поддержкой РТР.

Ещё одной проблемой является наличие общего для всей подстанции источника синхронизации, отказ которого, через некоторое время, приведет к потере всех направленных и дифференциальных защит. Поэтому источник синхронизации должен быть многократно резервирован так, чтобы удовлетворять принципу резервирования N-1 в условиях любого ремонта. Решением этой проблемы может стать поддержка программным обеспечением сервера КСВД (на котором реализованы функции ЦРЗА) режима MasterClock протокола РТР. Тогда при потере всех штатных источников синхронизации УСВИ смогут синхронизироваться непосредственно от сервера ЦРЗА.

Альтернативным вариантом может быть использование синхронизации по напряжению питания собственных нужд путем его модуляции переменным напряжением, взятым с шин трансформатора собственных нужд [5, 6].

Функции РЗА

Наиболее важным вопросом является практическая реализуемость функций защиты с использованием исключительно векторных измерений.

Существуют защиты, современные реализации которых используют векторные измерения, вычисленные непосредственно внутри защиты. К ним относятся дистанционные и токовые защиты. Дифференциальные защиты имеют реализации как по векторным, так и по мгновенным замерам.

Отличие между терминалом РЗА, вычисляющим векторы внутри себя, и сервером, получающим данные от нескольких УСВИ, является механизм синхронизации по времени данных измерений. Внутри терминала РЗА все измерения исходно синхронные, так как выполнены одним и тем же АЦП. На сервере векторных измерений необходимо отсортировать данные так, чтобы в функции РЗА попадали данные разных УСВИ, относящиеся к одному и тому же моменту времени. Сортировка может быть произведена по меткам времени, которыми снабжается каждое измерение в соответствии со стандартом С37 118.

Если используется альтернативный механизм синхронизации по питанию, то фазы замеров являются относительными, точная синхронизация не требуется. Необходимо просто обеспечить использование данных из одного электромагнитного состояния сети (с точностью порядка 20 мс). Поэтому при синхронизации по питанию можно использовать все данные, пришедшие во время интервала квази-одновременности, который можно принять равным периоду основной частоты. Исключение составляет случай начала КЗ, при котором необходимо дождаться резкого изменения всех ну-

левых замеров тока и напряжения системы шин, на которой произошло КЗ. То же можно сказать про синхронизацию по данным доаварийного режима первичной сети. При КЗ также необходимо исключить перебивание данных аварийного и доаварийного режима.

### МТЗ

Функции МТЗ использует модули измеренных векторов тока присоединения. В случае реализации направленной функции МТЗ для определения условно-положительного направления потока мощности используется угол между измеренными векторами тока и напряжения. Поэтому МТЗ требует именно векторный замер тока и напряжения.

### Дистанционная защита

Существующая реализация используемых в настоящее время в энергосистемах России функций дистанционных защит требует наличия фазных и линейных замеров сопротивления, а также замера тока нулевой последовательности (для компенсации фазного замера сопротивления). УСВИ выдают векторы фазных токов и напряжений контролируемого присоединения. Вычисление линейного замера сопротивления основывается на линейном токе и линейном напряжении. Оценки линейных значений векторов могут быть получены на основе данных измерений фазных векторов. Ток нулевой последовательности может быть вычислен путем сложения векторов тока всех фаз.

### Токовая защита нулевой последовательности

Функция токовой защиты нулевой последовательности использует замер тока, который вычисляется из фазных векторов тока. Направление определяется через расчет разности фаз вычисленного тока и напряжения нулевой последовательности.

### Дифференциальная защита

Дифференциальная защита может быть выполнена на основе нахождения вектора разностного (дифференциального) тока, который рассчитывается на основе измеренных векторов тока присоединений защищаемого элемента. Такой способ вычисления дифференциального тока снижает время реакции защиты в сравнении с дифференциальной защитой по мгновенным значениям. Это обусловлено тем, что для правильного вычисления дифференциального тока необходимо, чтобы с момента начала КЗ прошел один период основной частоты. Таким образом, защита по векторам не может сработать раньше, чем через один период основной частоты.

Время реакции защиты по мгновенным значениям может быть значительно меньше. Однако наличие времени реакции защиты менее одного периода не является необходимым с точки зрения современных требований к времени срабатывания РЗА, которое составляет 25 мс.

Дифференциальные защиты, использующие данные измерений векторов тока, будут иметь ряд ограничений в использовании. Например, при использовании генераторного выключателя при КЗ в блочном трансформаторе. В этом случае происходит снижение периодической составляющей тока КЗ и появляется медленно затухающая свободная составляющая, наличие которой приводит к отсутствию переходов через ноль тока КЗ в течение некоторого времени после начала КЗ.

Дифференциальные защиты, использующие данные измерений векторов тока, невозможно заблокировать, в том случае когда насыщение трансформатора тока происходит за время, меньшее одного периода основной частоты. Как было отмечено выше, проблема насыщения трансформатора является в первую очередь проблемой правильного выбора измерительного трансформатора и его вторичных цепей при проектировании подстанции. Работа измерительного трансформатора в режиме глубокого насыщения является недопустимым режимом, который можно выявить и исключить заранее на этапе проектирования.

### Блокировки по высшим гармоникам

Существующие требования к УСВИ не предполагают передачу замеров по высшим гармоническим составляющим. Это приводит к невозможности реализации блокировки по высшим гармоническим составляющим. В этом случае с УСВИ на КСВД потребуется организовать выдачу отдельных пакетов с данными измерений высших гармонических составляющих в том же формате С37 118.

На начальных этапах реализации ЦРЗА блокировку от броска тока намагничивания можно осуществить с использованием дополнительного пускового органа по снижению фазного напряжения на шинах подстанции. Таким образом, блокировка дифференциального пускового органа при насыщении сердечника силового трансформатора по высшим гармоническим составляющим может быть заменена алгоритмом заглупления уставки, фиксирующим одновременное снижение напряжения и отсутствие нагрузочного тока, приводящее к насыщению.

Теоретически в УСВИ можно добавить отдельный алгоритм вычисления векторов основной гармонической составляющей в условиях насыщения измерительного трансформатора и выдавать векторные измерения уже с учетом компенсации высших гармоник. Но такие алгоритмы имеют низкую точность в реальных условиях эксплуатации. По этой причине требуется не допускать насыщения измерительных трансформаторов на этапе проектирования при выборе оборудования.

В результате использования пускового органа, фиксирующего снижение напряжения, можно исключить выдачу высших гармонических составляющих на сервер РЗА при выполнении существующих в настоящее время требований по блокировке дифференциальных защит.

### Осциллографирование электромагнитных переходных процессов

С целью анализа правильности работы РЗА в условиях КЗ должна осуществляться запись измеренных мгновенных значений в течение всего времени КЗ и непосредственно перед ним. Функция записи переходных процессов по событию внутри устройства или по внешней команде присутствует во всех терминалах РЗА и в специализированных устройствах – регистраторах аварийных ситуаций. В требованиях к УСВИ такого пункта нет, однако большинство УСВИ являются продолжением линейки РАС, поэтому восстановить в них эту функцию технически возможно. При этом пуск записи может производиться по внешней команде, полученной из коммуникационной сети от сервера,

выполняющего функцию защиты, так как логика пуска записи осциллограммы выполняется только на сервере.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что потенциально возможно использовать существующие системы СВИ для реализации централизованной подстанции с минимальными доработками программного обеспечения.

Наличие существующих подстанций с уже установленными СВИ позволяет тестировать работу ЦРЗА в условиях работы реальной энергосистемы.

Предложенная концепция ЦРЗА не требует дорогого оборудования для организации вычислительной сети, так как в ней не используется передача мгновенных значений тока и напряжения.

На первом этапе алгоритмы ЦРЗА могут мало отличаться от существующих решений в области РЗА. Данная возможность апробирована при разработке терминалов РЗА компанией ООО «Прософт-Системы».

Потребуется дополнительно разработать алгоритм пуска осциллограмм в УСВИ с использованием GOOSE-сообщений.

Размещение ЦРЗА на КСВД позволит в краткосрочной перспективе отработать программно-аппаратные решения по ЦРЗА.

За счёт размещения всех функций РЗА на одном устройстве упрощаются аппаратные и алгоритмические решения по работе АВР, после УРОВ и АПВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репортаж с круглого стола: Технологию ЦПС нужно развивать сообща! 2015. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2015/11/18/kruglyj-stol-tsentralizovannye-i-detsentralizovannye-sistemy-relejnoj-zashhity-i-avtomatiki/>.
2. International standard IEC61850-9-2 Communication network sandsystems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values. Geneva: IEC, 2004.
3. International standard IEC61850-8-1 Communication network sandsystems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS. Geneva: IEC, 2004.
4. 1588-2008-IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Piscataway NJ 08854-4141. USA: IEEE, 2008.
5. Естественная локальная синхронизация измерений для защит и автоматики цифровой подстанции / К.И. Апросин, Ю.В. Иванов, А.С. Черепов, М.А. Порозков // Релейщик. 2019. No. 3. P. 52–57.
6. Issues of implementation and application of the time synchronization subsystem in complexes of relay protection and emergency control, digital substation, WAMS / K. Aprosina, Y. Ivanov, A. Cherepov, M. Porozkov // Study Committee B5 Colloquium 2019 Tromso Norway. Tromso Norway: 2019.

Поступила в редакцию 20 июля 2020 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### MAKING USE OF VISUAL INFORMATION BOARD DATA TO IMPLEMENT THE PROTECTION FUNCTION OF A DIGITAL SUBSTATION

Konstantin I. Aprosina

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Power Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Alexander S. Tavlintsev

Associate Professor, Department of Automated Electrical Power Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-845X>.

Sergey I. Semenenko

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Power Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9813-9067>.

Pilot projects of digital substations under current development are based on the application of the IEC61850 standard. Typically, such projects use a separate station and process buses. Therefore, instantaneous current and voltage measurements are transmitted in the SV protocol with the response time of 25 ms, and the same network is used for synchronization of measuring devices with PTP protocol. In this case the process bus is characterized by high load and, to implement it, the capacity of 100 megabit Ethernet commutator switch is not high enough, so in some cases, Gigabit Ethernet technology must be used, which increases the cost of the project significantly. Due to its high load, the process bus can't be used to transfer the control commands, which are transferred by means of GOOSE protocol, that is why a separate network referred to as the station is used for it. This makes the substation communication network very complicated, which is inconvenient from the point of view of operation and maintenance. The paper is concerned with an alternative variant of transmission of current and voltage measurements by means of C37.118 protocol. Unlike

Sampled values protocol, this one makes it possible to transmit vector measurements calculated on the basis of measurements for one basic frequency period. At present, this protocol is used in the wide-area measurement system (WAMS) with the update rate of vector data every 20 ms. However, the update rate is an adjustable parameter and if one can provide transmission of 4 vectors for one basic frequency period, it is possible to provide the required protection response time of the digital substation of 25 ms. The paper describes the main approaches to testing and implementation of a measuring digital substation on the basis of an operating WAMS system.

**Keywords:** digital substation, protection functions, vector measurements.

#### REFERENCES

1. Panel discussion report: DSP technology should be developed collectively! 2015. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2015/11/18/kruglyj-stol-tsentralizovannye-i-detsentralizovannye-sistemy-relejnoj->

- zashhity-i-avtomatiki/. (In Russian)
2. International standard IEC61850-9-2 Communication network sand systems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values. Geneva: IEC, 2004.
  3. International standard IEC61850-8-1 Communication network sand systems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS. Geneva: IEC, 2004.
  4. 1588-2008-IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Piscataway NJ 08854-4141. USA: IEEE, 2008.
  5. Aprosín K.I., Ivanov Yu.V., Cherepov A.S., Porozkov M.A. Natural local synchronization of measurements to provide protection and automation of a digital substation. *Releyshchik* [Protection engineer], 2019, no. 3, pp. 52–57. (In Russian)
  6. Issues of implementation and application of the time synchronization subsystem in complexes of relay protection and emergency control, digital substation, WAMS / K. Aprosín, Y. Ivanov, A. Cherepov, M. Porozkov // Study Committee B5 Colloquium 2019 Tromsø Norway. Tromsø Norway: 2019.
- 

Апросин К.И., Тавлинцев А.С., Семенов С.И. Использование данных синхронизированных векторных измерений для реализации функций защиты цифровой подстанции // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 17-22. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-17-22)

Aprosín K.I., Tavlintsev A.S., Semenenko S.I. Making Use of Visual Information Board Data to Implement the Protection Function of a Digital Substation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 17-22. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(48\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(48)-17-22)

---