

# Опыт организации коммуникационных сетей передачи данных СВИ в системах мониторинга и управления

В статье на основе практического опыта и результатов исследований специалистов Системного оператора представлены основные подходы к организации коммуникационных сетей при передаче данных СВИ в РЗА в режиме реального времени с целью решения задач мониторинга и автоматического управления в режиме реального времени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** коммуникационная система, НЧК, РЗА, УСВИ, КСВД, PSS, СВИ, СМНР

## Авторы:

Жуков А.В.,  
Дубинин Д.М.,  
Расщепляев А.И.,  
Харламов В.А.

## РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВИ ДЛЯ ЗАДАЧ РЗА

В энергосистеме России созданы условия для развития и применения технологии СВИ:

- разработана нормативная база, регламентирующая требования к аппаратным средствам (УСВИ, КСВД), их размещению и внедрению на объектах электроэнергетики;
- на объектах электроэнергетики России введено в эксплуатацию более 120 аппаратно-программных комплексов (более 900 УСВИ, 10 региональных и 90 локальных КСВД);
- в Системном операторе введена в эксплуатацию автоматизированная система сбора данных СВИ в режимах онлайн и оффлайн (рис. 1).

Изменение свойств и характеристик энергосистем, определяемых трендами их современного развития, вызывает необходимость адаптации РЗА к новым условиям функционирования. Кроме того, при создании современных РЗА необходимо учитывать достигнутые результаты в области разработки цифровой техники и информационных технологий.

Одним из важнейших условий решения указанной задачи является необходимость применения в РЗА информации нового качества о протекающих в энергосистеме переходных процессах. Такую информативность сегодня могут предоставить только данные СВИ. Этим можно объяснить широкий интерес специалистов по управлению энергосистемами и специалистов в области создания средств управления к применению данных СВИ.

В настоящее время в России разработаны и находятся в стадии тестирования в распределительных

сетях и аттестации интеллектуальных электронных устройств РЗА нового поколения. Основной вклад по обеспечению качества измерений в данных устройствах вносят цифровые синтезированные фильтры, сочетающие преимущества применения технологий СВИ и технологий цифровой подстанции [1]. Новый метод синтеза фильтров позволил обеспечить заданные требования по качеству измерений синхrofазов тока и напряжения в условиях интенсивных электромагнитных переходных процессов в энергосистеме. Также в России разработаны многофункциональные устройства, обеспечивающие функции измерения синхrofазов напряжения и тока как от измерительной, так и от релейной обмоток измерительного трансформатора тока с повышенной дискретизацией измерений (до 20 точек на период промышленной частоты) и соответствующей Стандарту IEEE C37.118.1 точностью.

На базе созданной информационной платформы данных СВИ в Системном операторе разрабатываются и внедряются технологические задачи (приложения) реального времени:

- для систем оперативно-диспетчерского управления:
  - мониторинга качаний активной мощности в контролируемых сечениях электрической сети, включая мониторинг низкочастотных колебаний (НЧК) параметров электрического режима,
  - визуализации динамических процессов в энергосистеме (контроль выхода параметров электрического режима из области допустимых значений, оценка работы систем регулирования генерирующего оборудования при небалансах активной мощности и по демпфированию НЧК);

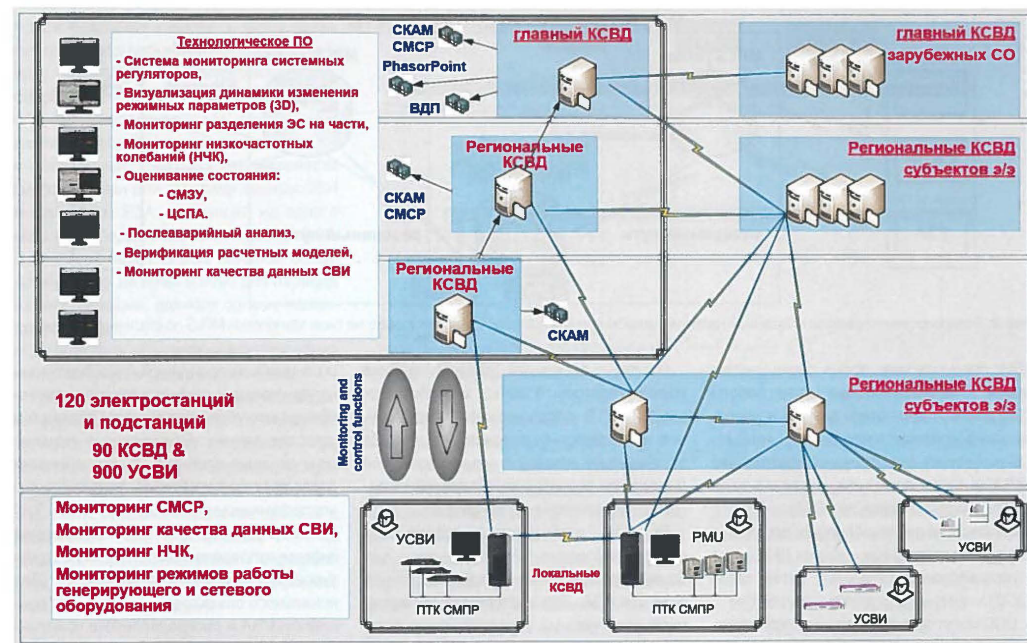


Рис. 1. Система сбора данных СВИ в России

- для централизованных систем режимной и противоаварийной автоматики:
  - мониторинга некорректной работы АРВ/СВ генерирующего оборудования,
  - демпфирования низкочастотных колебаний (НЧК) параметров электрического режима,
  - оценивания состояния параметров электрического режима моделей энергосистемы для режимной и противоаварийной автоматики,
  - технологические алгоритмы автоматической ликвидации асинхронного режима,
  - технологические алгоритмы автоматического предотвращения перегрузки электропередачи по мощности (управление «по углу»);
- для локальных устройств РЗА:
  - устройств автоматики ликвидации асинхронного режима,
  - устройств автоматики предотвращения перегрузки электропередачи по мощности (управление «по углу»),
  - устройств демпфирования низкочастотных колебаний,
  - резервных защит на электростанциях и подстанциях.

Приведенные выше системы мониторинга после подтверждения эффективности работы их технологических алгоритмов, оценки совершенства архитектурных и иных технических решений, включая организацию сетей коммуникации, планируются преобразовать в системы автоматического управления в составе РЗА.

## ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РЗА

Цикличность сбора информации о состоянии и параметрах работы электрической сети в информационных комплексах ДЦ Системного оператора, на базе которых функционируют системы диспетчерского управления и централизованные системы противоаварийной и режимной автоматики, составляет 1 сек. Эта длительность цикла сбора информации сложилась исторически, учитывает значительные объемы сбора информации, технические возможности систем телемеханики и средств коммуникации, и во многом определяет

сегодня функциональность систем мониторинга и систем РЗА, реализованных в ДЦ Системного оператора. Достижима цикличность сбора данных в локальных устройствах РЗА, установленных на объектах электроэнергетики, составляет единицы миллисекунд.

Это означает, что для применения данных СВИ в локальных устройствах РЗА, работающих на объектах электроэнергетики в режиме «жесткого реального времени», необходимо применение усовершенствованных УСВИ класса Р с темпом передачи данных от 4 до 20 точек на период промышленной частоты.

Одной из основных проблем организации коммуникационных систем для РЗА на основе данных СВИ с точки зрения производительности и надежного выполнения функций защиты и управления является обеспечение допустимого уровня задержки при доставке данных СВИ.

Вопросы быстрой и надежной доставки данных непосредственно зависят от эффективности работы всей коммуникационной системы. Задержка пакетов данных

Жуков А.В., Дубинин Д.М., Расщепляев А.И., АО «СО ЕЭС»  
Харламов В.А., ООО «Юнител Инжиниринг»

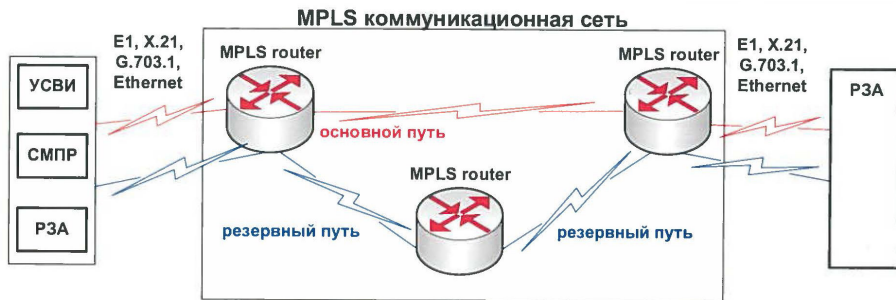


Рис. 2. Резервирование каналов с заданной гарантированной пропускной способностью в сетях на базе технологии MPLS по статическим путям

СВИ, превышающее время сбора информации в технологическом цикле работы РЗА, равносильно потере данных, а, следовательно, приводит к потере функции РЗА.

Существует два варианта построения цифровых каналов связи между объектами электроэнергетики для РЗА:

- использование выделенных волокон в волоконно-оптических кабелях (ВОК),
- использование цифровых сетей связи (ЦСС).

ЦСС могут быть построены с использованием различных технологий передачи данных, например, SDH/PDH, xWDM, IP/MPLS и т.д. Для каналов РЗА сети SDH/PDH обеспечивают гарантированную скорость передачи данных, требуемые задержки, их симметрию, ограниченный джиттер, организацию резервирования и отсутствие взаимного влияния между каналами.

С ростом объема Ethernet трафика эффективность использования потенциально доступной пропускной способности сетей SDH/PDH уменьшается и начинается постепенный процесс миграции к сетям с пакетной коммутацией. ЦСС с пакетной коммутацией на базе технологии MPLS, а именно IP/MPLS и MPLS-TP, позволяют обеспечить надежность, приближающуюся к надежности каналов в сетях SDH/PDH.

Важнейшими параметрами для работающих по ЦСС на базе технологии MPLS устройств РЗА являются:

- синхронизация (для устройств РЗА с синхронными цифровыми интерфейсами);
- задержка в канале;
- джиттер задержки канала (новый параметр по сравнению с сетями SDH/PDH);
- симметрия задержки в разных направлениях канала (крайне важный параметр для продольных дифференциальных защит линий);
- вероятность ошибок в канале;
- резервирование путей в сети.

Наряду с передачей Ethernet трафика маршрутизаторы IP/MPLS и коммутаторы MPLS-TP поддерживают традиционные интерфейсы и протоколы, позволяют организовать каналы с гарантированной пропускной способностью и резервирование по статическим путям (рис. 2).

Высокие требования к надежности функционирования РЗА определяют требования к надежности коммуникационной сети для РЗА. Это достигается организацией независимых резервируемых каналов связи с гарантированной пропускной способностью и высоким коэффициентом их готовности между объектами электроэнергетики, ДЦ Системного оператора и ЦУС, а в локальных вычислительных сетях на объектах электроэнергетики применением протоколов резервирования.

Организация коммуникационной системы РЗА предусматривает выбор ее архитектуры для конкретного комплекса РЗА, включая:

- выполнение каналов передачи данных в соответствии с предъявляемыми требованиями РЗА;
- организацию передачи данных по схеме «точка-многоточка»;
- интеграцию функции мониторинга качества данных СВИ (в том числе, мониторинга логической достоверности) для оперативного выявления проблем в коммуникационной инфраструктуре.

### Выбор архитектуры коммуникационной системы РЗА

Выбор оптимальной архитектуры системы коммуникаций является одним из основных вопросов разработки РЗА. Основные требования, предъявляемые к коммуникационной системе РЗА, сводятся к обеспечению требуемой функциональности и надежности работы РЗА, включая минимизацию сквозной задержки в условиях

ограниченной пропускной способности каналов передачи данных и обеспечение необходимого уровня надежности передачи и качества данных. Принимаемые технические решения должны быть экономически оправданы при требуемом уровне надежности функционирования РЗА.

Выбор архитектуры коммуникационной системы определяется типом РЗА и структурой его технического комплекса. Для локального объектового устройства (комплекса) РЗА и распределенного комплекса РЗА регионального уровня коммуникационные системы должны быть разными, поскольку решаемые ими задачи управления по значимости для обеспечения защиты и устойчивости энергосистемы несоизмеримы. Оптимальным подходом при выборе архитектуры коммуникационной сети является предварительное моделирование. В [2] задачу оптимизации ограничений в коммуникационной системе предлагается решить теоретически с помощью метода Лагранжевых релаксаций.

### ТРЕБОВАНИЯ К КАНАЛАМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Требования к каналам передачи данных при организации коммуникационных сетей передачи данных СВИ в РЗА, определенных российскими НТД, должны соответствовать следующим положениям:

- для передачи информации, обеспечивающей функционирование комплексов РЗА, должно предусматриваться применение наземных каналов связи. Допускается применение спутниковых систем связи на базе использования геостационарных космических аппаратов и цифровых транкинговых систем, используемых в технологических сетях связи для организации каналов для передачи информации, включая данные СВИ, с объектов электроэнергетики в устройства и комплексы РЗА;

■ использование каналов и услуг сетей связи общего пользования (сотовой связи, информационно-телекоммуникационной сети Интернет, телефонной сети общего пользования) для организации каналов связи РЗА не допускается;

■ обобщенный коэффициент готовности системы связи для передачи данных СВИ в комплексы РЗА, состоящей из одного канала связи, должен быть не ниже 0,98, а для двух независимых каналов связи, должен быть не ниже 0,9996 для периода их эксплуатации, равного одному календарному году;

- должен быть обеспечен автоматический контроль исправности каналов связи;
- суммарное время измерения и передачи информации с объектов электроэнергетики в управляющие комплексы РЗА, установленные в ДЦ Системного оператора, не должно превышать 1 секунды без учета времени обработки данных в комплексах РЗА; в локальные РЗА на объектах электроэнергетики – определяется требованиями к функционированию этих РЗА (единицы мсек).

### СИСТЕМЫ КОММУНИКАЦИИ КОМПЛЕКСОВ РЗА ОБЪЕКТОВОГО УРОВНЯ

В качестве примеров интеграции технологий СВИ и цифровой подстанции можно привести реализацию дифференциальных защит шин и продольных дифференциальных защит линий [3, 4], централизованную систему регулирования реактивной мощности и поддержания напряжения [5]. В указанных примерах измерения синхровекторов производится как в УСВИ, так и в локальных устройствах релейной защиты.

Более перспективным вариантом считаем реализацию измерений синхровекторов в аналоговых устройствах сопряжения с шиной процесса, как встраиваемых в современные цифровые датчики тока и напряжения, так и подключаемых к традиционным измерительным трансформаторам тока и напряжения [6, 7]. В этом случае синхровекторы токов и напряжений следует рассматривать как альтернативу или как дополнение к SV (sampled values) токов и напряжений. При использовании синхровекторов вместо SV резко снижается сетевой трафик, упрощается реализация продольных дифференциальных защит и дифференциальных защит шин, централизованных устройств

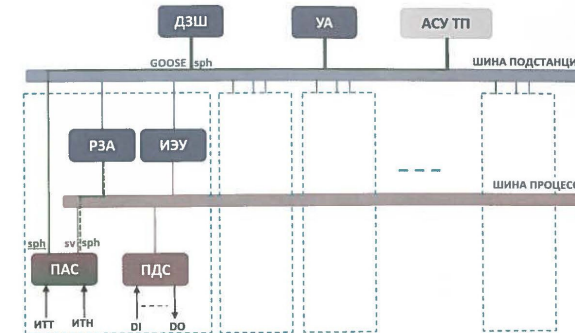


Рис. 3. Интеграция технологии СВИ и технологий цифровой подстанции

управления нормальными и аварийными режимами работы (рис. 3).

При этом обеспечивается разумное сочетание децентрализованного и централизованного принципа для решения задач управления, защиты и автоматики. Синхровекторы целесообразно использовать для реализации централизованных защит и устройств автоматики на подстанциях, которые могут выполнять функции защит шин с абсолютной селективностью, резервирования защит присоединений, противоаварийной и режимной автоматики.

Следует отметить, что при стандартной реализации шины процесса ИЗУ на основе SV выполняют однотипные операции с целью вычисления параметров режима электрической сети. Ситуация во многом подобна обычным вторичным целям, только вместо аналоговых значений вторичных токов и напряжений используются «сырые» оцифрованные значения токов и напряжений. Поэтому для многих практических приложений РЗА перспективна полная замена SV синхровекторами токов и напряжений как в пределах подстанции, так и при коммуникациях между подстанциями. При использовании синхровекторов процесс перейти на использование одной коммуникационной шины, объединяющей шину процесса и шину подстанции. Особое значение при использовании синхровекторов для реализации релейной защиты приобретает синтез фильтров, обеспечивающих требуемые показатели качества обработки сигналов.

В качестве примера аналогового устройства сопряжения с шиной процесса можно привести УСВИ, подключаемое к релейной и измерительной обмоткам электромагнитных трансформаторов тока, а также к трансформаторам на-

пряжения [7]. В данном УСВИ дополнительно производится вычисление синхровекторов тока и напряжения, в том числе синхровекторов аварийных токов (от релейной обмотки измерительного трансформатора тока), реализован регистратор аварийных режимов и КСВД.

### ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В РЕГИОНАЛЬНЫХ PACS

В PACS, объединяющих в себе передачу большого количества информации и требование к низкой задержке доставки данных, коммуникационная сеть может стать бутылочным горлышком для надежной работы системы. Основными требованиями к организации передачи данных СВИ являются:

- передача данных по схеме «точка-многоточка»;
- поддержка в УСВИ&КСВД технологии многоадресной рассылки для маршрутизации пакетов данных, управляющих сигналов и команд;
- использование в качестве среды передачи волоконно-оптических линий связи, которые отличаются нечувствительностью к помехам и способностью передавать с высокой скоростью большие объемы данных.

Стандарт IEEE C37.118.2 [8] регламентирует передачу данных СВИ по UDP/IP и TCP/IP. Отличительной особенностью UDP/IP от TCP/IP является простая модель передачи, без подтверждения, контроля упорядоченности и целостности данных. Это снижает надежность, датаграммы могут теряться, дублироваться или приходить не по порядку, но при этом отпадает необходимость ожидания задержавшихся датаграмм или запроса по-

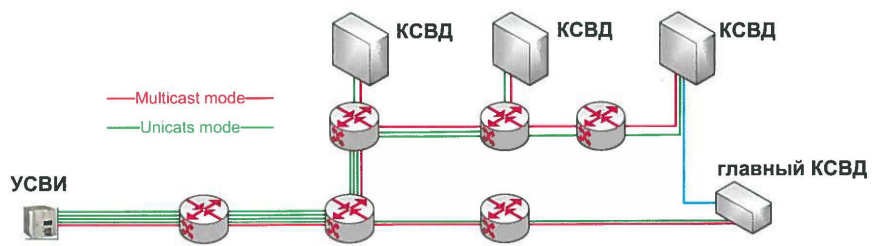


Рис. 4. Пример организации связи между УСВИ и КСВД

вторной отправки потерянных датаграмм. Такой режим передачи данных предпочтителен для задач реального времени, требующих минимизации задержки доставки данных, но допускающих потерю части данных. Мониторинг существующей ситуации показывает, что UDP/IP очень надежен и поэтому может быть рекомендован к применению.

Конечной целью является уменьшение сквозной задержки передачи данных с учетом ограничений в пропускной способности каналов. Сквозная задержка – это длительность времени для передачи пакета данных от источника до получателя в дереве многоадресной рассылки. Следует учитывать, что данные УСВИ могут запрашиваться несколькими КСВД.

Коммуникационная система должна быть гибкой и масштабируемой и обеспечивать выполнение указанных ранее требований к каналам для передачи потока данных между устройствами УСВИ и КСВД.

На рис. 4 показан пример организации связи между УСВИ и КСВД по схеме «точка-многоточка» на различных уровнях, который иллюстрирует возрастание трафика в ЦСС при увеличении числа КСВД, получающих данные с использованием одноадресной рассылки. Безусловно, при небольшом количестве УСВИ не стоит ожидать каких-либо значительных проблем, но при возрастании количества УСВИ и КСВД становится критически важным переход на использование многоадресной рассылки. Стандарты Системного оператора требуют поддержки в УСВИ и КСВД протокола UDP/IP, обеспечивающего передачу данных «точка-многоточка» с многоадресной рассылкой [9, 10].

Данная функциональность проверяется на сертификационных испытаниях этих устройств. Таким образом, для организации связи между УСВИ и КСВД

требуются Ethernet или IP каналы «точка-многоточка», позволяющие производить многоадресную рассылку из УСВИ.

**ОРГАНИЗАЦИЯ КАНАЛОВ ПО ЦСС ДЛЯ СИСТЕМ СВИ**

Сегодня большинство ЦСС в российской электроэнергетике построено на базе технологии SDH/PDH. Данные сети позволяют с использованием технологии Ethernet over SDH (EoS) организовать Ethernet каналы «точка-многоточка» для систем СВИ. При этом будет обеспечиваться гарантированная пропускная способность канала и отсутствие влияния других каналов.

При миграции к сетям с пакетной коммутацией в электроэнергетике встают следующие вопросы. Применение сетей с пакетной коммутацией для передачи данных СВИ, которые применяются для задач управления и для задач поддержки решений диспетчера в режиме реального времени приводят к жестким требованиям к производительности сети. В сети с пакетной коммутацией, по которой передаются данные для критически важных приложений, должны быть внедрены механизмы QoS для:

- обеспечения гарантированной пропускной способности;
- предотвращения потери пакетов;
- предотвращения и управления потенциальными транспортными коллизиями;
- формирования транспортного потока;
- приоритизации потоков трафика в зависимости от приложения и его чувствительности по отношению к задержке, потере пакетов или изменению пропускной способности.

Наиболее оптимальным решением для использования в центре обработки данных СВИ (для главного КСВД в центре управления) являются технологии IP/MPLS и MPLS-TP. Каждый УСВИ

на уровне объектов электроэнергетики подключен к маршрутизатору станции по двум интерфейсам Ethernet. На рис. 5 показана архитектура СМГР, которая содержит дублирующие КСВД на региональном и главном уровнях, поэтому необходимо обеспечить передачу данных от каждого УСВИ до двух КСВД в коммуникационной системе.

Технологии IP/MPLS и MPLS-TP поддерживают механизмы проектирования трафика и обеспечивают детерминированный характер трафика в коммуникационной системе, что очень важно при передаче данных СВИ. В случае отказа канала по основному интерфейсу УСВИ отправляет данные по вторичному интерфейсу.

В целях применения технологии СВИ для РЗА на базе существующих каналов передачи данных ограниченной пропускной способности в СО разработано и апробировано техническое решение, повышающее эффективность использования пропускной способности существующих каналов передачи данных при передаче данных СВИ в 3,5–4 раза. Данное решение реализовано за счет расширения протокола IEEE C37.118.2 и объединения фреймов данных [11]. Это особенно актуально при наличии ограничений в коммуникационной системе и допустимости увеличения задержки доставки данных на 0,5–1 с.

**ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ДАННЫХ**

Любая задача, основанная на данных УСВИ в реальном времени, критически зависит от качества данных УСВИ. Необходимо следить за качеством данных УСВИ в режиме реального времени.

Для обеспечения качества данных УСВИ для их применения в системах мониторинга и управления в реальном вре-

мени необходимо обеспечить непрерывный мониторинг данных УСВИ. УСВИ, коммуникационные сети и КСВД являются элементами, которые не должны снижать показатели качества, полноты и скорости передачи данных. Основной целью мониторинга является выявление «слабого звена» в коммуникационной инфраструктуре передачи данных УСВИ с уровня энергообъекта на главный диспетчерский пункт [6].

**ВЫВОДЫ**

Российский опыт организации коммуникационных сетей передачи данных СВИ в системах мониторинга и управления подтверждает возможность применения данных СВИ в РЗА.

Применение данных СВИ в РЗА требует соответствующей доработки требований нормативно-технической документации.

Требования к организации коммуникационной системы для передачи данных СВИ в РЗА предполагают применение модернизированных УСВИ и КСВД, характеристики которых выходят за рамки действующих российских и международных стандартов. В России ведутся работы по созданию УСВИ и КСВД нового поколения с улучшенными характеристиками.

Вопросы построения коммуникационных сетей в системах мониторинга и управления становятся критически важными при реализации РЗА с использованием данных СВИ и требуют применения современных технологий при их организации.

В России реализованы пилотных проекты, в которых выполнена интеграция технологии СВИ и технологий цифровой подстанции.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. A.V. Zhukov, D.M. Dubinin, A.V. Mokeev "Enhancement of wide-area protection and automation systems based

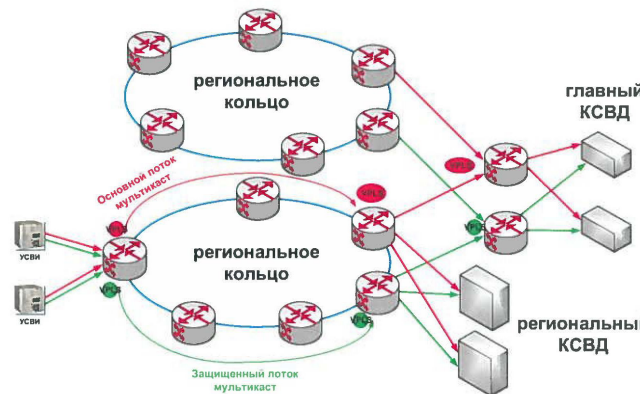


Рис. 5. Пример реализации коммуникационной системы в сетях на базе технологий MPLS

on PMU data», CIGRE, Chengdu 2019 Symposium.

2. Xiaohui Li, Yu-Chu Tian, Gerard Ledwich, Yateendra Mishra, Xiaoqing Han, Chunjie Zhou Constrained Optimization of Multicast Routing for Wide Area Control of Smart Grid. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018.

3. E.O. Schweitzer III, et al., "Synchrophasor-Based Power System Protection and Control Applications" (36th Annual Western Protective Relay Conference, 2009).

4. Working Group C-14 of the System Protection Subcommittee IEEE. "Use of synchrophasor measurements in protective relaying applications" (Report IEEE, 2013).

5. Telgaev I.A. "Creation of a Synchronized Vector Measurement System in Smart Clusters of UES East Synchrophasor systems implementation in intellectual clusters of Eastern IPS" (Actual trends in development of Power System Relay Protection and Automation, Yekaterinburg, 2015).

6. A. Mokeev, V. Bovykin, E. Khromtsov, A. Miklashevich, A. Popov, A. Rodionov,

D. Ulyanov "Application of synchrophasor measurement technology for control, protection and automation" (SC B5 Colloquium, Tromso, 2019).

7. Mokeev A. "Applications based on USVI technology for MicroGrid" (SC D2 CIGRE, Moscow, 2017).

8. IEEE Std C37.118.2-2011 – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.

9. СТО 59012820.29.020.011-2016 «Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования»

10. СТО 59012820.29.020.003-2018 «Релейная защита и автоматика. Концентраторы синхронизированных векторных данных. Нормы и требования».

11. Гайдамакин Ф., Кисловский А., Дубинин Д., Уткин Д. Результаты тестирования технического решения уплотнения данных при передаче СВИ в диспетчерские центры – Материалы Международной конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2017».

**Experience in organizing communication networks for data transmission SVI in monitoring and control systems**

ZHUKOV A.V., DUBININ D.M., RASCHEPLYAEV A.I., KHARLAMOV V.A.

The paper presents the practical experience and research results of the System operator on the organization of communication networks, providing reliability in the transmission of a large amount of data in real time with the necessary quality for their application in monitoring and control tasks in real time.

KEYWORDS: LFO, PACS, PMU, PDC, PSS, synchrophasor, WAMS, WAMPAC