

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАНИЧНОЙ АНАЛИТИКИ (EDGE ANALYTICS) ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБЪЕКТОВ ЕЭС РОССИИ

Колосок Ирина Николаевна

д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории

«Управление функционированием электроэнергетических систем»,

e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Коркина Елена Сергеевна

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории

«Управление функционированием электроэнергетических систем»,

e-mail: korkina@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Аннотация. Технология цифровых двойников является одной из базовых технологий в процессе «цифровизации» энергетики. Важным компонентом цифрового двойника является сбор данных с физического объекта для мониторинга и управления этим объектом. Современные средства информационного обеспечения задач управления режимами ЕЭС России – SCADA и СМПП – предоставляют в центры диспетчерского управления огромные объемы информации, которая может быть использована для создания цифрового двойника отдельного объекта энергетики или всей энергосистемы в целом. В статье для снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников объектов энергетики предлагается использовать технологию «Edge Analytics» – граничной аналитики, которая позволяет осуществлять сбор, обработку и анализ данных на периферийных устройствах сети рядом с источником информации. В качестве объекта для создания цифрового двойника рассматривается современная цифровая подстанция.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, цифровой двойник, SCADA, СМПП, технология «Edge Analytics», цифровая подстанция.

Цитирование: Колосок И. Н., Коркина Е.С. Применение технологии граничной аналитики (Edge Analytics) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 28-39. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.003

Введение. Технологии цифровых двойников (ЦД) сегодня активно применяются в различных технических областях, в том числе и в электроэнергетике, как в России, так и за рубежом [1, 2, 3, 4]. Целью создания цифровых двойников объектов энергетики является повышение надежности и эффективности эксплуатации на всех стадиях жизненного цикла оборудования объектов. Важными компонентами цифрового двойника являются сбор данных с физического объекта для мониторинга и управления этим объектом и хранилища собираемых данных. Создание и функционирование цифрового двойника большого распределенного объекта, каким является ЕЭС России, связано с необходимостью сбора, передачи, хранения и обработки больших объемов измерительной информации, поступающей от географически распределенных источников.

Одним из путей снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников является применение технологии «Edge Analytics» – граничной аналитики [5]. Концепция «Edge Analytics» основана на сборе, обработке и анализе данных на периферийных устройствах сети, рядом с датчиками, сетевым коммутаторами или другими подключенным устройствами, т. е. рядом с источником информации.

В настоящее время на наиболее ответственных объектах ЭЭС – межсистемных связях, крупных подстанциях электростанций устанавливаются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ), являющиеся основным измерительным оборудованием СМНР (системы мониторинга переходных режимов). УСВИ регистрируют измерения параметров режима с высокой точностью и частотой 50 измерений в сек. В онлайн и офлайн режимах с каждого УСВИ снимаются в среднем по 20 измерений, то есть, почти 18000 синхронизированных векторных измерений (СВИ) в срезе [6]. Дальнейший рост количества УСВИ на объектах энергетики приведет к неоправданным затратам на передачу больших объемов «сырых» данных в центры диспетчерского управления.

В статье будут рассмотрены вопросы применения технологии Edge Analytics при создании цифровых двойников объектов ЭЭС России. В качестве такого объекта рассматривается современная цифровая подстанция. Интеллектуальные устройства и системы такой подстанции (терминалы РЗА (релейной защиты и автоматики), РАС (регистрации аварийных событий), УСВИ, измерительные центры, контроллеры присоединений) дают возможность обрабатывать данные измерений непосредственно на месте их получения, а установленные рабочие станции могут использоваться в качестве локального концентратора информации и выполнять функции архивирования [7].

1. Цифровой двойник в энергетике. Цифровой двойник в энергетике рассматривается в качестве основного инструмента интеллектуального управления объектами современной ЭЭС. Согласно мнению главного инженера подразделения «Интеллектуальные сети» компании Siemens Е. Никитиной, «наиболее подходящее определение цифрового двойника – это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними, то есть цифровой двойник создает виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом» [8].

В [4] были рассмотрены основные понятия цифровых двойников и их типы. К ним относятся:

- Двойник-прототип (*Digital Twin Prototype*). Это виртуальный аналог реально существующего элемента. Он содержит информацию, которая описывает определенный элемент на всех стадиях, начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента.
- Двойник-экземпляр (*Digital Twin Instance*). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.
- Агрегированный двойник (*Digital Twin Aggregate*). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании или системе.

Для электроэнергетических компаний наиболее актуален двойник-экземпляр. Он основывается на математической модели сети и содержит информацию о технических параметрах оборудования ЭЭС (ЛЭП, трансформаторы, выключатели и т.д.), дате его ввода в эксплуатацию, географические координаты, данные с измерительных устройств. Эта информация используется для проведения расчетов по подключению новых потребителей, а также различных расчетов электрических сетей.

Таким образом, для ЭЭС и ее объектов цифровой двойник включает базу данных с информацией о сети, которая интегрирована с другими ИТ-системами энергокомпании (системами сбора и обработки информации о параметрах режима, геоинформационной системой, системой управления активами и пр.).

Функционирование цифрового двойника можно разделить на три этапа [5]: видеть, думать и делать. На стадии «видения» речь идет о получении эксплуатационных данных о состоянии объекта. На этапе «думать» цифровой двойник анализирует полученную информацию и принимает решение о соответствии состояния объекта заданным технико-экономическим параметрам и условиям безопасной эксплуатации. На третьем шаге – «делать» ЦД в случае получения информации о нарушениях технологического процесса с помощью искусственного интеллекта (ИИ) в рамках цифрового двойника формирует решение о самостоятельных действиях по ликвидации этих нарушений в автоматическом режиме, либо информирует оператора сети о том, что необходимо сделать.

2. СМПР ЕЭС России. С 2005 г. в России создается Система мониторинга переходных режимов (СМПР) – российский аналог WAMS. СМПР представляет собой комплекс УСВИ или PMU (Phasor Measurement Units), распределенных по объектам энергосистемы (подстанции, крупные узлы) и связанных каналами передачи данных с пунктами сбора информации – PDC (концентратор векторных измерений) – (уровень «СО-РДУ¹» или «СО-ОДУ²»), в свою очередь передающих ее в центр управления данными (ГВЦ). Структура СМПР ЕЭС России показана на рис. 1 [6].

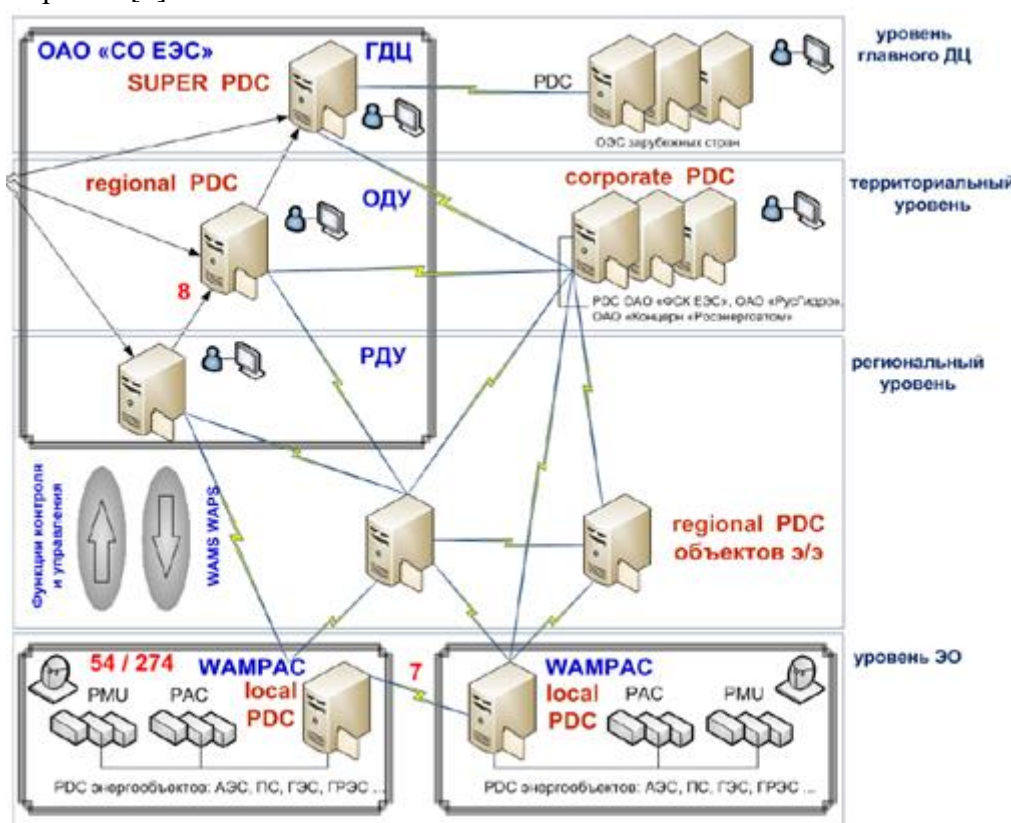


Рис. 1. Структура СМПР ЕЭС России

Данные синхронизированных векторных измерений с метками времени передаются в PDC различного уровня, на которых устанавливается специализированное программное обеспечение для сбора данных от УСВИ, их обработки, вычисления, хранения, а также, отображения в режиме реального времени текущих параметров состояния энергосистемы и выдачу сообщений и сигналов.

Развитие СМПР в России идет стремительными темпами, если в 2005-2009 гг. на 25 объектах электроэнергетики было установлено менее 100 PMU, то в настоящее время на 135 объектах электроэнергетики уже введено более 900 УСВИ преимущественно отечественного

¹ СО РДУ – Региональное диспетчерское управление Системного Оператора ЕЭС России

² СО ОДУ – Объединенное диспетчерское управление Системного Оператора ЕЭС России

производства [6]. В настоящее время УСВИ устанавливаются в обязательном порядке на наиболее ответственных объектах ЭЭС – межсистемных связях, крупных подстанциях напряжением 330 кВ и выше, электростанциях с установленной мощностью 500 МВт и более.

УСВИ регистрируют измерения параметров режима с высокой точностью и частотой (50 измерений в сек), среднее время доставки данных синхронизированных векторных измерений в центры диспетчерского управления составляет 150 мс, что обеспечивает возможность их применения в задачах автоматического и противоаварийного управления.

Важная роль при создании цифровых двойников отводится виртуальным датчикам, представляющим расчётные значения физических характеристик для тех мест моделируемого объекта, где установка реального датчика невозможна или нецелесообразна. УСВИ (PMU), установленное в узле ЭЭС, позволяет получить расчётные значения комплексов узловых напряжений в смежных узлах, они получили название «расчетных» PMU. Исследования показали, что точность «расчетных» PMU практически не уступает точности физических PMU. «Расчетные» PMU позволяют существенно улучшить наблюдаемость ЭЭС и повысить избыточность измерений, что очень важно при расчете и анализе текущих режимов ЭЭС.

Объем данных СВИ, поступающих в ДЦ (Дата Центр – центр данных) в онлайн и офлайн режимах – порядка 20 измерений с каждого УСВИ. Это означает, что в ДЦ приходит в онлайн режиме около 5 000 СВИ каждые 20 мс, т.е. 250 000 СВИ каждую секунду [6]. Дальнейший рост количества УСВИ на объектах энергетики приведет к неоправданным затратам на передачу больших объемов «сырых» данных в центры диспетчерского управления. Решить или смягчить эту проблему позволяет иерархическая структура СМПР, в которой концентраторы векторных измерений (PDC) установлены на всех уровнях иерархии от объектов энергосистемы до главного диспетчерского центра в «СО-ЦДУ». Это дает возможность выполнять локальную обработку данных непосредственно в PDC различного уровня. Результаты локальных вычислений периодически или по запросу передаются в PDC более высокого уровня, что позволяет существенно сократить объем передачи информации в центры диспетчерского управления. Еще больший эффект в плане снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников объектов энергетики обеспечивает применение технологии «Edge Analytics» или граничной аналитики [5].

3. Технология Edge Analytics (граничной аналитики) при создании цифровых двойников. Цифровой двойник (ЦД) сам по себе не является технологией. Это слияние многих новейших цифровых технологий, таких как, облачные хранилища и вычисления, Интернет вещей (IoT – Internet of Things), искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение и др. [5, 9]. С технологией IoT, обеспечивающей коммуникации между различными компонентами ЦД, тесно связана технология «Edge Computing», базирующаяся на концепции граничной аналитики «Edge Analytics».

Концепция граничной аналитики «Edge Analytics» [5] основана на сборе, обработке и анализе данных на периферийных устройствах сети, рядом с датчиками, сетевыми коммутаторами или другими подключенными устройствами, т.е. рядом с источником информации и исполняемыми элементами, например, на производстве. Граничные вычисления стимулируют рост четвертой промышленной революции благодаря развитию технологий в облачных системах, программном обеспечении, вычислениях, коммуникациях, современных системах хранения и памяти. Сам термин «Edge Computing» означает, что часть обработки данных происходит на конечных элементах сети, в том месте, где в системах IoT физические объекты связываются с Интернетом. Граничные вычисления дают возможность анализировать ключевые данные в режиме реального времени «на месте», не отправляя их на центральный

сервер. Однако граничные вычисления Edge Computing — это гораздо больше, чем просто расчет и обработка данных на местах. Предполагается, что эта технология обеспечит плавную интеграцию периферийных устройств и облачных вычислений, а также двусторонний обмен информацией.

Облачные вычисления – стабильно развивающаяся, в том числе и на российском рынке, технология. «Cloud Computing наиболее динамично развивается последнее десятилетие, уровень проникновения технологии в развитых странах превышает 90%» – Олег Любимов, генеральный директор Selectel. Граничные технологии только приходят в нашу страну, в [10] рассмотрены их основные отличия, преимущества и недостатки, а также области применения.

Облачные вычисления – это технология, которая позволяет хранить и обрабатывать данные удаленно в «облаке». Для этого используются центры обработки данных (ЦОД). Компании, применяющей облачные технологии, не обязательно создавать свою ИТ-инфраструктуру — все необходимое ей может предоставить провайдер. Нужен только доступ в Интернет, чтобы открыть сайт или приложение.

Преимущества:

- Надежное оборудование. У провайдеров облаков есть ресурсы для передачи, хранения и обработки данных: хранилища, серверы, сети, программное обеспечение и многое другое.
- Безопасность. Оператор облачных сервисов отвечает за сохранность данных. Например, организует шифрование, защиту от атак и аварийное восстановление.
- Развитость технологии. На мировом и российском рынках существует множество компаний, которые занимаются облачными технологиями. Список услуг разнообразный: посекундная тарификация, частные, публичные и гибридные облака, круглосуточная техническая поддержка, несколько ЦОД в разных местах.

Недостатки:

- Задержка в передаче данных между клиентом и ЦОД. Данные передаются от клиента в ЦОД и обратно, проходя многие километры сетей. Это может создать задержки.
- Сложная и дорогая инфраструктура. Если компания не хочет использовать публичное облако, то выбирает частное или гибридное. Облачные технологии применяются повсеместно: в госсекторе, производстве, ритейле, ИТ-компаниях, финансовой сфере и телекоммуникациях.

В энергетике Облачные технологии пока не нашли достаточно широкого применения, хотя время от времени в литературе появляются предложения и даже результаты их использования. В основном это касается таких задач, как расчет экономических показателей, документооборот, проектирование, телефония [11]. В [12] было предложено использовать технологии информационного облака для формирования единого конкурентного рынка услуг при создании интеллектуальной энергосистемы (ИЭС) России. С помощью такой технологии в ИЭС может выполняться, например, одновременно несколько функций:

- управление спросом;
- привлечение распределенной генерации;
- мониторинг и диагностика состояния оборудования;
- информационный обмен в рамках хозяйственной деятельности организаций отрасли и др.

Вместе с тем, в работе отмечено, что применение данной технологии требует решения вопросов информационной безопасности, и в современной практике этому уделяется значи-

тельное внимание³. Это одна из причин, почему Облачные технологии не нашли пока широкого применения в электроэнергетических компаниях.

Граничные вычисления – это технология обработки и хранения данных на конечном устройстве.

Преимущества:

- Практически нулевая задержка в передаче данных. Вычисления производятся на конечных устройствах, поэтому информации не нужно преодолевать километры сетей, чтобы добраться до ЦОД.
- Надежность вычислений. Данные обрабатываются даже в отсутствие подключения к Интернету.
- Безопасность и конфиденциальность. Информация предварительно обрабатывается на месте, и только данные, соответствующие политике конфиденциальности, передаются в облако для дальнейшего анализа.

Недостатки:

- Затраты на оборудование и сотрудников. Пользователю технологии придется купить и настроить оборудование, привлечь специалистов. Это сложнее, чем подключить публичное облако.

Главное преимущество граничных технологий – скорость передачи и анализа данных, поэтому эти технологии используются там, где важна обработка информации в реальном времени, – например, в сферах IoT. IoT и граничные вычисления будут применяться в отраслях промышленности, где генерируются большие объёмы оперативной информации, к которым, несомненно относится современная электроэнергетика. В [13] выполнен обзор современного состояния и перспективных областей применения граничных вычислений при создании интеллектуальных энергосистем (Smart Grid), в том числе рассмотрены вопросы применения граничных вычислений при создании цифровых двойников передающих и распределительных сетей ЭЭС.

Как показано в [13], предприятия электроэнергетики обладают наиболее благоприятной почвой для применения технологии граничных вычислений из-за развитой инфраструктуры и автоматизации. Большое количество стационарных датчиков и микропроцессорных систем управления позволяют собирать данные на объектах энергетики, проводить их обработку и вырабатывать управляющие воздействия непосредственно на местах. Одним из таких объектов является современная цифровая подстанция (ЦПС).

4. Цифровая подстанция – современный объект энергетики. ЦПС – это подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, в которой информация, необходимая для выполнения технологических задач различными устройствами и электрооборудованием, передается в цифровом виде на основе международного стандарта IEC 61850 (в России – МЭК 61850) по оптоволоконным каналам связи [14]. ЦПС – важное звено технологического управления ЭЭС, в сфере её функционирования находится управление противоаварийной автоматикой (ПА), микропроцессорными устройствами (МП) релейной защиты (РЗ), АСУ ТП, АИИСКУЭ, коммуникационная сеть.

В настоящее время вопросам разработки и применения интеллектуальных электронных устройств различного функционального назначения для цифровых подстанций уделяется много внимания [15, 16]. Так, специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработан ряд многофункциональных интеллектуальных устройств с поддержкой технологии векторных измерений, в том числе устройство синхронизированных векторных измерений ЭНИП-2-УСВИ с функциями концентратора векторных данных,

³ NERC Reliability standards – Critical Infrastructure Protection (CIP).

устройство сопряжения с шиной процесса ENMU, многофункциональное измерительное устройство ESM, устройство релейной защиты и автоматики ENBC с функциями контроллера присоединения. Применение интеллектуальных электронных устройств с одновременной поддержкой технологий цифровой подстанции и синхронизированных векторных измерений позволяют создавать более эффективные системы автоматизации подстанций.

В качестве примера рассмотрим систему сбора и передачи данных, реализованную на одной из подстанций 330 кВ (рис. 2) [17].

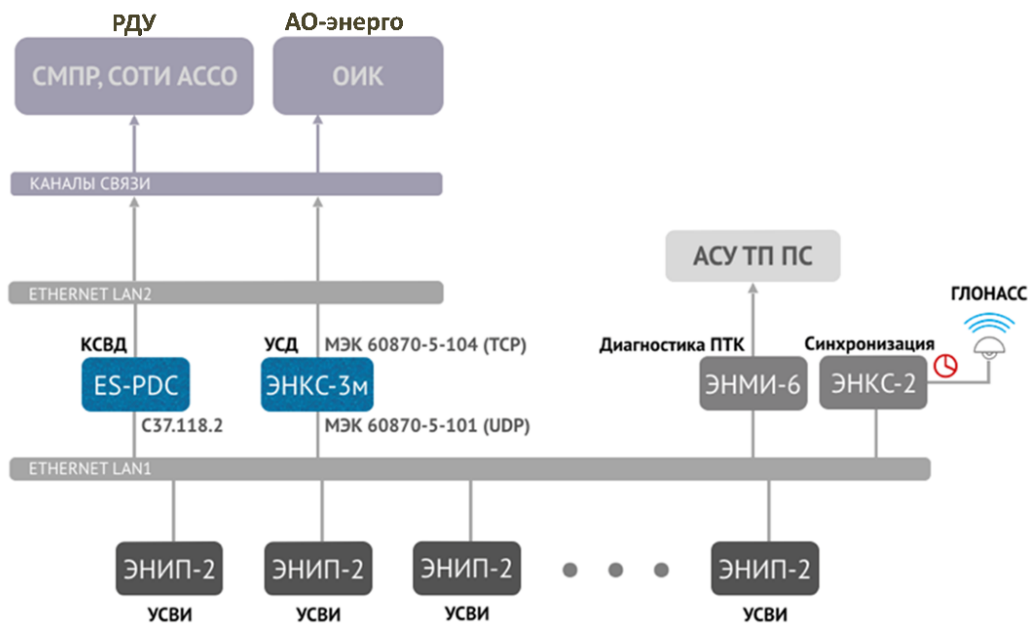


Рис. 2. Применение УСВИ для СМПР и АСТУ

В составе системы задействованы 15 устройств специальной модификации «ЭНИП-2-УСВИ» с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2, разработанные отечественными производителями для применения в составе цифровой подстанции [17].

Для сбора и передачи данных для СМПР и АСТУ (автоматизированных систем технологического управления) используются концентратор векторных данных ES-PDC и устройство сбора данных «ЭНКС-3м» соответственно. Синхронизация времени для всех компонентов системы осуществляется с помощью блока синхронизации времени «ЭНКС-2». Для диагностики и мониторинга компонентов системы сбора и передачи данных используется модуль «ЭНМИ-6».

Концентратор ES-PDC выполняет следующие функции:

- сбор данных от УСВИ или других КСВД (концентраторов синхронных векторных данных) по протоколу IEEE C37.118.2;
- агрегации векторных измерений от нескольких УСВИ по метке времени UTC;
- расчет параметров режима электрической сети;
- передачу клиентским устройствам данных по протоколу IEEE C37.118.2;
- архивирование данных: циклические и аварийные архивы (CSV-файлы);
- организацию доступа к архивным данным по протоколам FTP, HTTPS/SOAP.

Концентратор ES-PDC может осуществлять расчет мощности, средних значений измеренных величин, пересчет величин с учетом коэффициентов трансформации, расчет симметричных составляющих токов, напряжений, мощностей и т.д.

ES-PDC обеспечивает регистрацию и хранение в архивах всех принятых пакетов данных от УСВИ для предотвращения потери данных в результате сбоя каналов передачи данных. Принятые от УСВИ данные хранятся в циклических архивах внутренней базы

данных с настраиваемой глубиной хранения. В аварийных режимах дополнительно ES-PDC обеспечивает запись архивов аварийных событий.

Рассмотренная структура системы сбора и передачи данных современной цифровой подстанции позволяет реализовать ряд важных функций сбора и обработки данных локально, на уровне энергообъекта, например, провести достоверизацию СВИ и локальное линейное оценивание состояния по реальным и расчетным СВИ [18], т.е. выполнить первый этап работы цифрового двойника, и затем на базе полученной модели текущего режима провести мониторинг состояния подстанции и реализацию функций управления ее оборудованием.

Полученные в результате такой локальной обработки данных значения параметров режима могут передаваться в PDC более высокого уровня и в центр управления данными для координации и формирования математической модели полной схемы ЭЭС. Важно подчеркнуть, что при таком подходе в центр управления передаются не «сырые» СВИ, а их оценки, строго синхронизированные по времени.

Заключение. Целью создания цифровых двойников объектов энергетики является повышение их надежности и эффективности эксплуатации. Создание и функционирование цифрового двойника большого распределенного объекта, каким является ЭЭС России, связано с необходимостью сбора, передачи, хранения и обработки больших объемов измерительной информации, поступающей от географически распределенных источников. СМПР предоставляет в центры диспетчерского управления ЭЭС огромные объемы информации, необходимой для создания цифрового двойника отдельного объекта или всей энергосистемы в целом. Дальнейший рост количества УСВИ на объектах энергетики приведет к неоправданным затратам на передачу больших объемов «сырых» данных в центры диспетчерского управления. Одним из путей снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников в энергетике может стать применение технологии граничных вычислений в рамках концепции граничной аналитики – «Edge Analytics». В качестве объекта для создания цифрового двойника и применения технологии граничных вычислений рассмотрена современная цифровая подстанция. Системы сбора и передачи данных современных подстанций дают возможность обрабатывать данные измерений непосредственно в локальном концентраторе данных, что позволяет получить математическую модель объекта, необходимую для создания его ЦД. Установленные рабочие станции могут использоваться в качестве локального концентратора информации и выполнять функции архивирования.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-07-00351 А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy & Utilities, Oil & Gas) and Geography – Global Forecast to 2025. Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (дата обращения: 28.05.2021).
2. Ерошенко С.А., Хальясмаа А.И. Технологии цифровых двойников в энергетике. Электроэнергетика глазами молодежи. Т. 1. Иркутск. 2019. С. 37-40.
3. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // Цифровая подстанция. 2019. № 12. С. 38–43.
4. Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г. ИТ-инфраструктура для

- построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // Известия РАН. Энергетика. №1. 2021. С. 3-13.
5. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 Т. 7. № 5. 2019. С. 105-115.
 6. Дубинин Д.М. Актуальные задачи развития и применения технологии синхронизированных векторных измерений для задач управления в электроэнергетике // Доклад 06.12.19 на заседании НТС СО ЕЭС.
 7. Холкин Д. Цифровая энергетика: что это такое? // Цифровая подстанция. 2018. №10. С. 52-55.
 8. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике. Режим доступа: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения: 24.11.2019).
 9. Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 5-19. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01.
 10. Хрисанфова Е. Облачные, туманные и граничные вычисления: отличия и перспективы развития технологий. Режим доступа: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (дата обращения: 24.06.2021).
 11. Шайхутдинов А.М. Возможности использования облачных технологий в энергетике // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2. Ч. 3. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> (дата обращения: 18.06.2021).
 12. Бердников Р.Н, Бушуев В.В., Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Колосок И.Н., Курбацкий В.Г. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО "НТЦ ФСК ЕЭС. 2012. 235с.
 13. ChengFeng, YiWang, QixinChen, YiDing GoranStrbac, ChongqingKang. Smart grid encounters edge computing: opportunities and applications //Advances in Applied Energy. Volume 1, 23 February 2021, 100006. DOI:10.1016/j.adapen.2020.100006.
 14. Цифровая подстанция. Эффективные решения // Журнал «ИСУП». Режим доступа: <http://isup.ru/articles/6/13855/> (дата обращения: 14.05.19)
 15. Мокеев А. В., Бовыкин В. Н., Драницын И. В., Миклашевич А. В., Орлов Ф. Ю., Хромцов Е. И. Многофункциональные интеллектуальные устройства для цифровых подстанций // Цифровая подстанция, использующая стандарт IEC 61850. Москва. 2017 г. С. 42-43.
 16. Мокеев А. В. Применение технологии СВИ для выполнения функций управления, защиты и автоматики // Цифровая подстанция. Режим доступа: <https://digitalsubstation.com/blog/2018/03/05/primenenie-tehnologii-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-svi-dlya-vypolneniya-funksij-upravleniya-zashhity-i-nbsp-avtomatiki/> (дата обращения: 10.06.2021).
 17. Бовыкин В.Н., Драницын И.В., Орлов Ф.Ю., Хромцов Е.И. Вопросы интеграции технологий векторных измерений и цифровых подстанций // «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017» 25-28 апреля 2017 г. Санкт-Петербург.
 18. Kolosok I., Korkina E., Buchinsky E. Monitoring of EPS Facilities Using PMU-Based Linear State Estimation. // Proc.of the 5th International Conference «Liberalization and Moderni-

zation of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grid». Irkutsk: ESI. August 6-10. 2012. Pp. 245-253.

UDK 004.89: 620.9

APPLICATION OF EDGE ANALYTICS TECHNOLOGY TO DEVELOP DIGITAL TWINS OF RUSSIA'S UNITED ELECTRIC POWER SYSTEM FACILITIES

Irina N. Kolosok

Professor, Leading Researcher of Laboratory
of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Elena S. Korkina

Doctor, Senior Researcher of Laboratory
of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: korkina@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 130.

Abstract. The technology of digital twins is a basic one in the process of energy "digitalization." An essential component of the digital twin development is data collection from a physical facility to monitor and control this facility. Advanced information support systems designed to control the UES of Russia (SCADA and WAMS) provide control centers with considerable amounts of information, which can be used to create a digital twin of an individual energy facility or entire power system.

This paper proposes the use of edge analytics technology that enables the collection, processing, and analysis of data on network peripheral units near the information source, to reduce the amount and cost of transmission and storage of a whole host of data when creating digital twins of energy facilities. A modern digital substation is considered as a facility to be digitally twinned.

Keywords: power systems, digital twin, SCADA, WAMS, Edge analytics technology, digital substation.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research. (project No. 19-07-00351 A).

REFERENCES

1. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy & Utilities, Oil & Gas), and Geography – Global Forecast to 2025. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (accessed 28.05.2021).
2. Eroshenko S.A., Hal'yasmaa A.I. Tekhnologii cifrovyyh dvoynikov v energetike [Digital twin technologies in energy industry]// Electric power industry through the eyes of young people. Vol. 1. Irkutsk. 2019. Pp. 37-40 (in Russian)
3. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E. Podhody k razrabotke i primeneniyu cifrovyyh dvoynikov energeticheskikh sistem [Approaches to the development and application of digital twins of energy systems] // Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation. 2019. № 12. Pp. 38-43 (in Russian)
4. Voropaj N.I., Massel' L.V., Kolosok I.N., Massel' A.G. IT-infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nyh sistem upravleniya razvitiem i funkcionirovaniem sistem energetiki na os-

- nove cifrovyyh dvoynikov i cifrovyyh obrazov [IT infrastructure for building intelligent control systems for the development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images] // Izvestiya RAN. Energetika = Izvestia RAN. Energy. №1. 2021. Pp. 3-13 (in Russian)
5. Kurganova N.V., Filin M.A., Chernyaev D.S., Shaklein A.G., Namiot D.E. Vnedrenie cifrovyyh dvoynikov kak odno iz klyuchevyyh napravlenij cifrovizacii proizvodstva [Implementation of digital twins as one of the key areas of digitalization of production] // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 . Vol.7. № 5. 2019. Pp.105-115.
 6. Dubinin D.M. Aktual'nye zadachi razvitiya i primeneniya tekhnologii sinhronizirovannykh vektornykh izmerenij dlya zadach upravleniya v elektroenergetike [Actual problems of the development and application of the technology of synchronized phasor measurements for control problems in the electric power industry] // Report 06.12.19 at the meeting of the Scientific and Technical Council of SO UES (in Russian)
 7. Holkin D. Cifrovaya energetika: chto eto takoe? [Digital energy: what is it?] // Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation. 2018. №10. Pp. 52-55. (in Russian)
 8. Nikitina E. Popali v seti: kak rabotajut cifrovyje dvoyniki v elektroenergetike [Caught in the network: how digital twins work in the electric power industry]. Available at: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (accessed 24.11.2019) (in Russian)
 9. Massel' L.V., Massel' A.G., Kopajgorodskij A.N. Evolyuciya tekhnologij issledovaniy energetiki i primeneniya ih rezul'tatov: ot matematicheskikh modelej i komp'yuternyyh programm k cifrovym dvoynikam i cifrovym obrazam [Evolution of energy research technologies and the application of their results: from mathematical models and computer programs to digital twins and digital images] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. Irkutsk: ISEM SB RAS. 2019. № 4. Pp. 5-9 (in Russian). DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01 (in Russian)
 10. Hrisanfova E. Oblachnye, tumannyye i granichnyye vychisleniya: otlichiya i perspektivy razvitiya tekhnologij [Cloud, Fog and Edge Computing: Differences and Technological Prospects]. Available at: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (accessed 06.24.2021) (in Russian)
 11. Shajhutdinov A.M. Vozmozhnosti ispol'zovaniya oblachnykh tekhnologij v energetike [Possibilities of using cloud technologies in the energy sector] // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii = Modern scientific research and innovations. 2015. №. 2. Part 3 Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> (accessed 18.06.2021)
 12. Berdnikov R.N, Bushuev V.V., Voropaj N.I., Efimov D.N., Kolosok I.N., Kurbackij V.G. i dr. Konceptsiya intellektual'noj elektroenergeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'yu [The concept of an intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network]. Moscow: JSC "STC FGC UES". 2012. 235 p. (in Russian)
 13. ChengFeng, YiWang, QixinChen, YiDing GoranStrbac, ChongqingKang. Smart grid encounters edge computing: opportunities and applications //Advances in Applied Energy. Volume 1, 23 February 2021, 100006. DOI:10.1016/j.adapen.2020.100006.
 14. Cifrovaya podstantsiya. Effektivnyje resheniya [Digital substation. Effective solutions] // ISUP magazine. Available at: <http://isup.ru/articles/6/13855/> (accessed 14.05.19).
 15. Mokeev A.V., Bovykin V.N., Dranicyn I.V., Miklashevich A.V., Orlov F.Yu., Hromcov E.I. Mnogofunkcional'nye intellektual'nye ustrojstva dlya cifrovyyh podstancij [Multifunctional intelligent devices for digital substations] // Tsifrovaya podstantsiya, ispol'zuyushchaya standart IEC 61850 = Digital substation using the IEC 61850 standard. Moscow. 2017. Pp. 42-43 (in Russian)
 16. Mokeev A.V. Primenenie tekhnologii SVI dlya vypolneniya funkciy upravleniya, zashchity i

- avtomatiki [Application of PMU technology to perform control, protection and automation functions] // Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation. Available at: <https://digitalsubstation.com/blog/2018/03/05/primenenie-tehnologii-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-svi-dlya-vypolneniya-funksij-upravleniya-zashhity-i-nbsp-avtomatiki/> (accessed 10.06.2021) (in Russian)
17. Bovykin V.N., Dranicyn I.V., Orlov F.Yu., Hromcov E.I. Voprosy integracii tekhnologij vektornyh izmerenij i cifrovyyh podstancij [Integration issues of phasor measurement technologies and digital substations] // «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem 2017» 25 – 28 aprelya 2017 g = "Relay protection and automation of power systems 2017" April 25 – 28. 2017. St. Petersburg (in Russian)
18. Kolosok I., Korkina E., Buchinsky E. Monitoring of EPS Facilities Using PMU-Based Linear State Estimation. // Proc.of the 5th International Conference «Liberalization and Modernization of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grid». Irkutsk: ESI. August 6-10. 2012. Pp.245-253.

Статья поступила в редакцию 22.07.2021; одобрена после рецензирования 10.09.2021; принята к публикации 15.10.2021.

The article was submitted 22.07.2021; approved after reviewing 10.09.2021; accepted for publication 15.10.2021.