

Мозохин Андрей Евгеньевич,
ведущий инженер, канд. техн. наук, доцент

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ДАННЫХ КОМПОНЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Россия, Москва, ООО «СИГМА», mozokhin@mail.ru

Аннотация. Представлен анализ современной концепции цифровых двойников применительно к распределенным электроэнергетическим системам. Определены характеристики цифрового двойника, влияющие на эффективность его использования на этапах жизненного цикла распределенных электроэнергетических систем. Систематизированы требования к данным о состоянии компонентов электроэнергетической системы, что позволило сформировать перечень параметров информационной модели компонентов, необходимых для согласованного управления качеством электроэнергии в сети. Разработана методика формирования информационной модели данных компонентов распределенной электроэнергетической системы. Разработана структурная схема организации информационных потоков по двусторонним связям между компонентами распределенной электроэнергетической системы, обеспечивающая взаимодействие информационных моделей компонентов системы через единый центр согласования целевых ориентиров работы сети, включая качество электроэнергии.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, цифровой двойник, качество электроэнергии, информационная модель данных, согласованное управление, физическая среда, цифровая среда.

Andrey E. Mozokhin,
Leading Engineer, Candidate of Technical Sciences (PhD),
Associate Professor

**IMPROVEMENT OF THE INFORMATION MODEL OF DATA
OF DISTRIBUTED POWER SYSTEM COMPONENTS
FOR COORDINATED POWER QUALITY MANAGEMENT**

SIGMA LLC, Moscow, Russia, mozokhin@mail.ru

Abstract. The paper analyzes the modern concept of digital twins as applied to distributed power systems. The characteristics of the digital twin influencing the efficiency of its use at the stages of the life cycle of distributed power systems are defined. The requirements to the data on the state of the electric power system components have been systematized, which allowed to form a list of parameters of the information model of the components necessary for controlling the quality of electric power in the network.

The methodology of formation of the information model of data of components of the distributed electric power system is developed. A structural scheme for organizing information flows through bidirectional links between the components of a distributed electric power system has been developed, which ensures the interaction of information models of the system components through a single center for coordinating the target benchmarks of network operation, including power quality.

Keywords: electric power system, digital twin, power quality, data information model, coordinated control, physical environment, digital environment.

Введение

На сегодняшний день становится актуальной концепция распределенной электроэнергетики с децентрализованным управлением и рынками, а также широким вовлечением всех пользователей энергосистем в процесс управления ими в целях экономически эффективного, гибкого, качественного и надежного энергоснабжения. Малая генерация, системы накопления энергии, регулируемая нагрузка конечных потребителей, интегрированные между собой и с централизованной энергосистемой, представляют собой неиспользованный до сих пор ресурс для повышения эффективности энергосистем [1].

Как следует из экспертно-аналитического доклада «Цифровой переход в электроэнергетике России», подготовленного фондом «Центр стратегических разработок» при участии Национальной технологической инициативы «Энерджинет»: «Традиционная, централизованная архитектура построения электроэнергетических систем в значительной степени исчерпала свой потенциал эффективности в условиях новых вызовов, стоящих перед энергетикой» [2].

Наиболее значимыми вызовами развития электроэнергетических систем сегодня являются:

1. Изменение характера спроса потребителей, а именно рост разнообразия и высокое требование к качеству электроэнергии, переход к «цифровому» спросу.

2. Падение эффективности, связанное с низкой загрузкой имеющихся сетевых и генерирующих мощностей и рост издержек работы энергосистем.

3. «Энергетический переход» 3D (декарбонизация, децентрализация, диджитализация): быстрое распространение ВИЭ, распределенной энергетики, новых бизнес-моделей и сервисов, базирующихся на использовании цифровых технологий.

4. Потребность в эффективном энергоснабжении удаленных и изолированных территорий.

Высокий уровень качества электроэнергии, а также надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей будет зависеть от наблюдаемости и управляемости на всех этапах технологического процесса производства, транспорта и потребления электроэнергии. При этом

отсутствие системы управления качеством электроэнергии усложняет доступ потребителей в сеть, а также приводит к снижению производительности энергопринимающих устройств в сети, к неэффективному расходованию электроэнергии и снижению ее показателей качества [3, 4].

Современная система управления в электроэнергетических системах (далее — ЭЭС) должна обеспечивать согласованность работы распределенных по системе интеллектуальных электронных устройств (далее — ИЭУ) на технологических этапах производства и потребления электроэнергии, для повышения эффективности, надежности и качества электроснабжения.

1. Постановка задачи

1.1. Описание предметной области

В работах [5–7] рассмотрены основные тенденции совершенствования систем управления сетевыми структурами ЭЭС в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли. Однако попытки обеспечить согласованную работу ИЭУ путем интеграции данных с датчиков генераторов, электрических подстанций и линий электропередачи в единую информационную систему, приводят к сложностям, связанным с отсутствием единого стандарта информационного обмена между различными технологическими и корпоративными информационными системами, несогласованной работой организационных структур. Отметим, что исследованные задачи ограничиваются узкой областью моделирования и автоматизации сетевых объектов электроснабжения, и не затрагивает потребителя как активного участника технологического процесса электроснабжения. К тому же, информация о состоянии сетевых объектов и потребителей должна обрабатываться совместно для выработки рациональных режимов управления качеством энергии в сети.

Наиболее подходящие инструменты для решения проблемы управления качеством электроэнергии в многоконтурной распределенной системе энергоснабжения — цифровые двойники компонентов ЭЭС. Такие компоненты могут взаимодействовать между собой для прогнозирования, анализа и управления сетевой структурой электроснабжения [8, 9].

Цифровые двойники имеют ряд преимуществ при использовании в системах управления. Они связаны с возможностью агрегации данных с различных ИЭУ в сети и установлением скрытых взаимосвязей между ее компонентами в цифровой среде для синхронизации работы всех компонентов распределенной ЭЭС. Данные преимущества делают технологию цифровых двойников универсальным инструментом для моделирования энергетических систем любой сложности, включая распределенную генерацию, возобновляемые источники энергии и умные пространства.

1.2. Определение проблемы

Проблема обеспечения качества электроэнергии остро стоит в существующих системах электроснабжения. В связи с чем, при разработке современных систем управления в ЭЭС требуется учитывать влияние на их работу показателей качества электроэнергии. Чтобы использовать эти показатели в системе управления их нужно контролировать на всех участках распределенной ЭЭС. И если автоматизация в распределительной сети за последние пять лет достигла высоких показателей, то на стороне потребителя отсутствует систематизированный подход к формированию наблюдаемого и управляемого энергопотребления.

Ранее в работе [10] предложена концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации. В этой работе большее внимание уделялось технологическому процессу производства и транспорта электроэнергии, в то время как потребитель оставался изолированным от участия в контроле и управлении процессами ЭЭС. В развитии теории и практики создания методов управления качеством электроэнергии в распределенных электроэнергетических системах, требуется исследовать методы анализа и обработки данных сетевых устройств с применением технологии цифровых двойников для решения задачи обеспечения качественной электроэнергией потребителей в местах их длительного пребывания, при минимальном ресурсопотреблении.

2. Формирование информационной модели данных компонентов распределенной ЭЭС с применением технологии цифровых двойников

Особенностью распределенной ЭЭС является тот факт, что её инфраструктура состоит из множества независимых подсистем с ИЭУ, которые выполняют свои функции. Однако они по-разному оказывают влияние на эффективность функционирования системы в целом и достижения целевых показателей её работы. Потому распределенную ЭЭС на концептуальном уровне следует рассматривать как систему систем полиструктурного класса, реализующую модель интернета энергии:

1. Децентрализованный характер энергосистемы.
2. Наличие двунаправленных потоков мощности и возможность динамического изменения роли потребителей в энергосистеме.
3. Наличие между компонентами ЭЭС не только электрических связей и взаимодействия, но и информационных связей и взаимодействия.
4. Реализация интеллектуального управления, за счет межмашинного (M2M) взаимодействия.

Для реализации на практике базовых принципов концепции интернета энергии проанализируем технологию цифрового двойника, как метод установления двунаправленных связей между физическим объектом

и его виртуальным аналогом в цифровой среде [11–13]. В рамках анализа выделим основные понятия и их определения, относящиеся к современной концепции цифрового двойника применительно к ЭЭС, а также разработаем методику формирования информационной модели потребителя как активного участника распределенной сети электроснабжения, способного контролировать и влиять на качество электроэнергии в сети.

2.1. Анализ современной концепции цифрового двойника, базовые понятия и их определения

В таблице 1 представлены основные понятия и их определения, относящиеся к современной концепции цифрового двойника применительно к ЭЭС. Данный список получен путем анализа научных исследований зарубежных авторов за последние десять лет, касающихся практического применения цифровых двойников [14–20]. Каждое из выделенных понятий представляет собой ключевой элемент концепции, определенный в литературе как часть цифрового двойника объекта материального мира.

Таблица 1

Термины и определения современной концепции цифрового двойника

Термины	Определение
1	2
Физический объект	Реальный объект материального мира. Например: трансформаторная подстанция, линия электропередачи, энергопринимающее устройство потребителя, измерительное устройство
Виртуальный объект	Генерируемое компьютером представление физического объекта. Например: трансформаторная подстанция, линия электропередачи, энергопринимающее устройство потребителя
Физическая среда	Среда реального мира, в которой можно осуществлять изменения и получать воспроизводимость результатов
Виртуальная среда	Любое количество виртуальных пространств или симуляций, которые воспроизводят состояние физической среды и предназначены для конкретных случаев использования, например, мониторинга состояния сети, оптимизации графика производства электроэнергии
Достоверность	Количество параметров, передаваемых между физическими и виртуальными объектами, их точность и уровень абстракции
Состояние объекта	Значение контролируемых на данный момент времени параметров: физического и виртуального объектов, внешней среды
Параметры объекта	Типы данных, информации и процессов, передаваемых между объектами, например: габариты объекта, технико-экономические показатели объекта, другая нормативно справочная информация
Метрология	Процедура измер. сост. физического или виртуального объекта

1	2
Управляющее воздействие	Процедура изменения состояния физического или виртуального объекта
Физико-виртуальное соединение	Соединение от физической к виртуальной среде. Содержит физическую метрологию, которая представляет собой единую систему: методов, средств измерения физического объекта и внешней среды, этапов виртуальной реализации
Виртуально-физическое соединение	Соединение от виртуальной к физической среде. Содержит этапы виртуальной метрологии, которая представляет собой единую систему: методов, средств расчета, прогнозирования параметров физического объекта и внешней среды, этапы физической реализации
Синхронизация / скорость синхронизации	Акт синхронизации между двумя объектами и скорость, с которой происходит синхронизация
Физические процессы	Физические цели и процессы, в которых участвует физическое лицо, например: электроснабжение
Виртуальные процессы	Вычислительные методы, используемые в виртуальной среде, например: оптимизация, прогнозирование, моделирование, анализ баланса мощностей в сети
Воспринимаемые преимущества	Предполагаемые преимущества, достигнутые в реализации применения технологии цифрового двойника. Например: снижение энергоемкости, увеличения качества электроэнергии, повышение надежности электроснабжения и т. п.
Жизненный цикл цифрового двойника	Жизненный цикл цифрового двойника включает в себя такие этапы как создание цифрового профиля, сбор данных, хранение и использование до их удаления из киберфизической среды
Варианты использования	Применение цифрового двойника, например: снижение коммерческих и технических потерь электроэнергии в сети; улучшение качества обслуживания потребителей, поддержка принятия решений и другие варианты его использования
Технические реализации	Технологии поддержки жизненных циклов цифрового двойника
Уровни достоверности	Количество параметров, их точность и уровень абстракции, которые передаются между виртуальной и физической средами
Владение данными	Право собственности на данные, хранящиеся в цифровом двойнике
Интеграция между виртуальными объектами	Методы, необходимые для обеспечения связи между различными виртуальными объектами

Особенностью современной концепции проектирования, эксплуатации и утилизации компонентов сложных систем с применением цифровых двойников является присутствие физической и виртуальной сред взаимодействия объектов реального и виртуального мира [14–20]. Параметры физической среды измеряются и передаются в виртуальную среду цифрового двойника, чтобы обеспечить точное соответствие между состоянием объекта в физической и виртуальной средах, а значит, эффективно контролировать состояние объектов online. Точное соответствие данных сред необходимо для применения функций симуляции и оптимизации, для достижения предполагаемых преимуществ, применения программно-ориентированного подхода к проектированию и управлению сложными системами. Физическая среда включает все параметры, которые могут влиять на физический объект, при этом они не должны быть ограничены только теми параметрами, которые измеряются как часть цифрового двойника.

На рисунке 1 показан вариант реализации современной концепции цифрового двойника применительно в физическому объекту — электро-энергетическая система, и физическому процессу — электроснабжение.

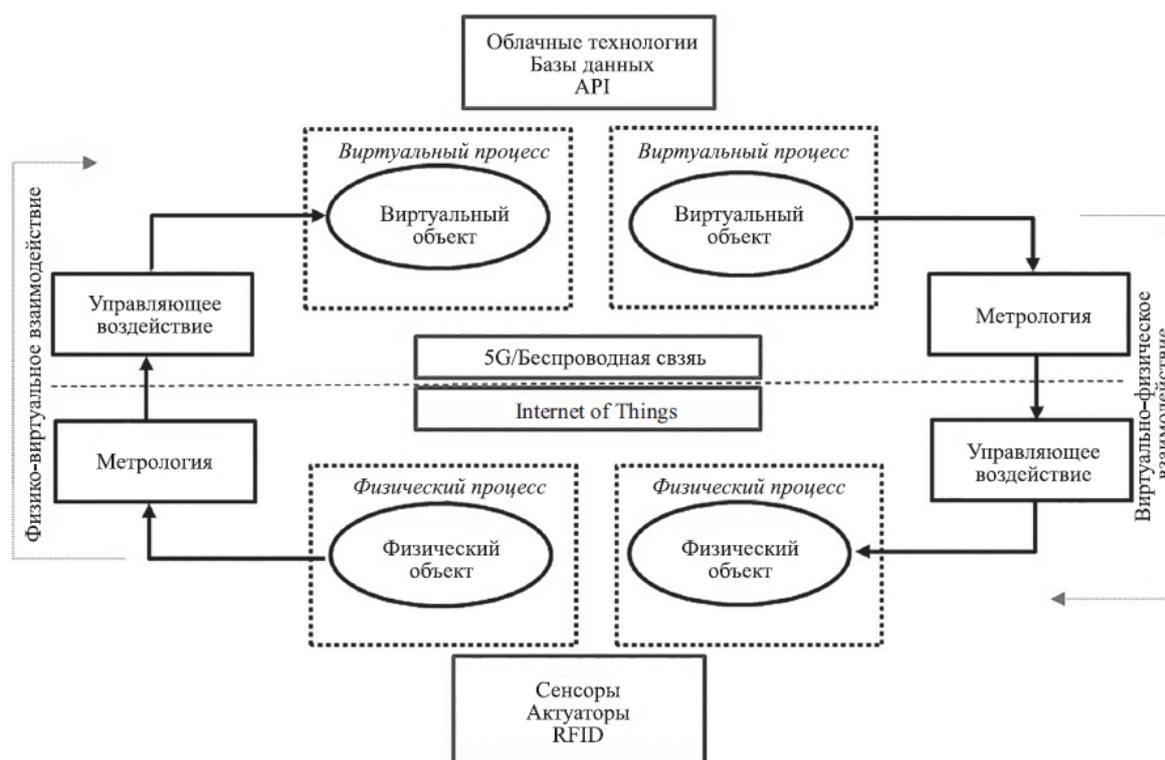


Рис. 1. Вариант технической реализации современной концепции цифрового двойника объектов электроэнергетической системы с применением интеллектуальных электронных устройств (сенсоры, актуаторы, RFID), технологии взаимодействия (Internet of Things), каналов взаимодействия (беспроводная связь) и методов обработки данных в виртуальной среде (облачные технологии)

Проведенный анализ публикаций применения технологии цифрового двойника указывает на отсутствие системного представления для цифрового двойника распределенной ЭЭС и её компонентов в едином цифровом пространстве моделирования, а также отсутствие концепции согласованного управления качеством электроэнергии в ЭЭС с применением технологии цифровых двойников.

2.2. Методика формирования информационной модели данных компонента распределительной ЭЭС

Для реализации на практике концепции согласованного управления качеством электроэнергии в сети требуется для начала сформировать цифровые модели компонентов ЭЭС. На рисунке 2 представлен порядок формирования цифровой модели компонента ЭЭС и определение двунаправленных связей между реальными объектами физической среды и их виртуальными аналогами в цифровой среде распределенной ЭЭС.

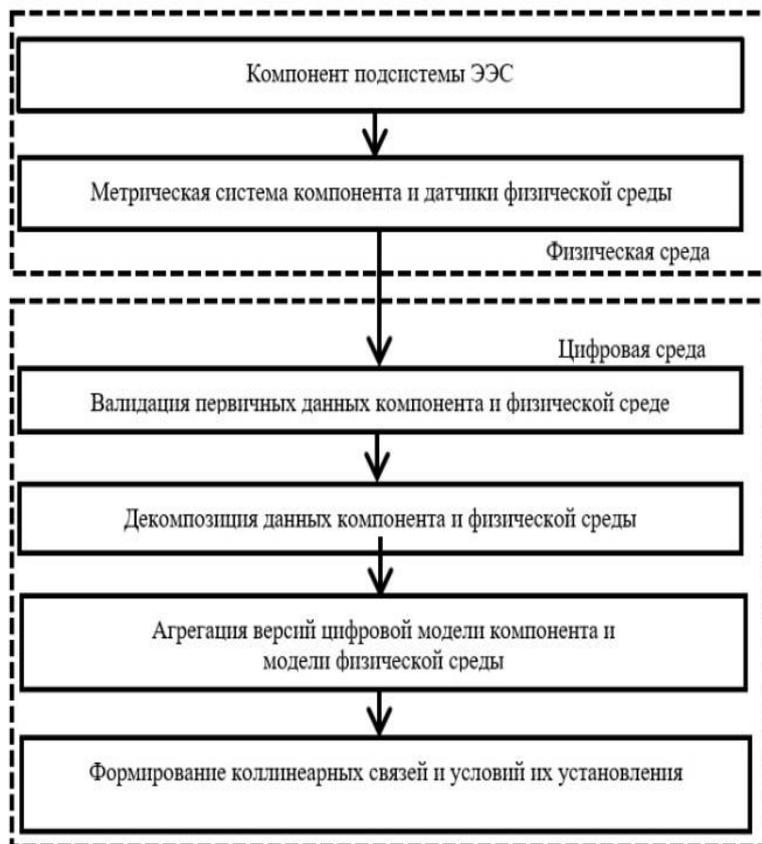


Рис. 2. Методика формирования цифровых моделей компонентов электроэнергетической системы

Данный порядок включает в себя методы валидации данных, декомпозиции моделей данных (так называемые версии цифровых моделей), агрегация версий моделей и наборов данных (цифровая тень), формирования двунаправленных связей между цифровыми моделями компонентов.

В цифровой среде полезные данные, полученные от датчиков физической среды применяются для создания цифровых моделей компонентов ЭЭС и распределенной системы в целом. В результате чего ЭЭС состоит из множества разноплановых цифровых моделей компонентов, взаимосвязанных через информационные потоки.

2.3. Основные параметры компонентов ЭЭС, влияющие на эффективность применения цифрового двойника

Параметры относятся к типам данных, информации и процессам, которые необходимы для взаимодействия между физическими и виртуальными объектами через цифровую среду. Количество параметров и их детализация влияют на уровень соответствия получаемого цифрового двойника и величину удовлетворенности результатом применения данной технологии на практике.

В таблице 2 приведены основные параметры компонентов распределенной ЭЭС, которые необходимо использовать в среде проектирования цифрового двойника для эффективного контроля и управления качеством электроэнергии в сети.

Таблица 2

Основные параметры и примеры использования

Параметры	Определение	Примеры
1	2	3
Форма объекта	Геометрическая структура объекта	Геометрия объекта, износ контактов, система координат, параметры опор линий электропередачи
Расположение объекта	Географическое положение объекта	Расположение объекта в отношении окружающей среды, близость к потребителю
Функциональность объекта	Функциональные возможности объектов и цель их функционирования	Функциональные возможности объектов сети, параметры функционирования сети (надежность, бесперебойность, гарантированность), функциональная модель, информационная модель, сетевая модель
Процессы, в которых участвует объект	Виды деятельности, в которых участвует объект	Параметры планирования (аварийность, ремонты, время простоя), моделирование, логистика, общие сведения
Время	Время, затраченное на выполнение действия, и дата/время выполнения действия	Своевременность реагирования, время простоя и время работы, время технологического процесса, время воздействия на объект и получение обратной связи

1	2	3
Текущее состояние объекта	Текущее измеренное состояние всех параметров объекта и среды	Состояние технологического процесса, эксплуатация, состояние среды функционирования, целостность технологических процессов, состояние человека, обобщенное состояние
Оценка состояния объекта	Состояние объекта по отношению к его идеальному состоянию	Анализ, контроль, управление
Производительность сети электроснабжения	Измеренная производительность работы сети по сравнению с ее оптимальным значением	Производительность компонентов системы, общая производительность системы
Окружающая среда	Физическая и виртуальная среды, в которых существует объект	Параметры физической среды, параметры виртуальной среды
Качественные показатели	Информация, которая является качественной и, как правило, не поддается измерению традиционными датчиками	Субъективные представления о качестве работы сети, требования к показателям качества электроэнергии, требования к квалификации работника

Параметры в таблице 2 получены путем анализа существующих публикаций, посвященных применению концепции цифровых двойников для энергетических систем, и сгруппированы в десять классов, которые согласно проведенной экспертной оценке наиболее часто влияют на эффективность применения программно-ориентированного подхода при управлении ЭЭС.

2.4. Информационные потоки данных между компонентами распределенной ЭЭС

На рисунке 3 представлена разработанная в рамках исследования структурная схема организации информационных потоков по двунаправленным связям между компонентами распределенной ЭЭС.

В данном случае компонентами распределенной ЭЭС выступают подсистемы: генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии, а также подсистемы связи, мониторинга и безопасности. При этом параметры состояния, функционирования и качества отдельных компонентов подсистем имеют общую основу, связанную с ресурсным обеспечением ЭЭС, а также параметрами её компонентов, которые подробно рассмотрены в таблице 2. Объединенное множество показателей

компонентов распределенной системы назовем системой показателей распределенной ЭЭС.

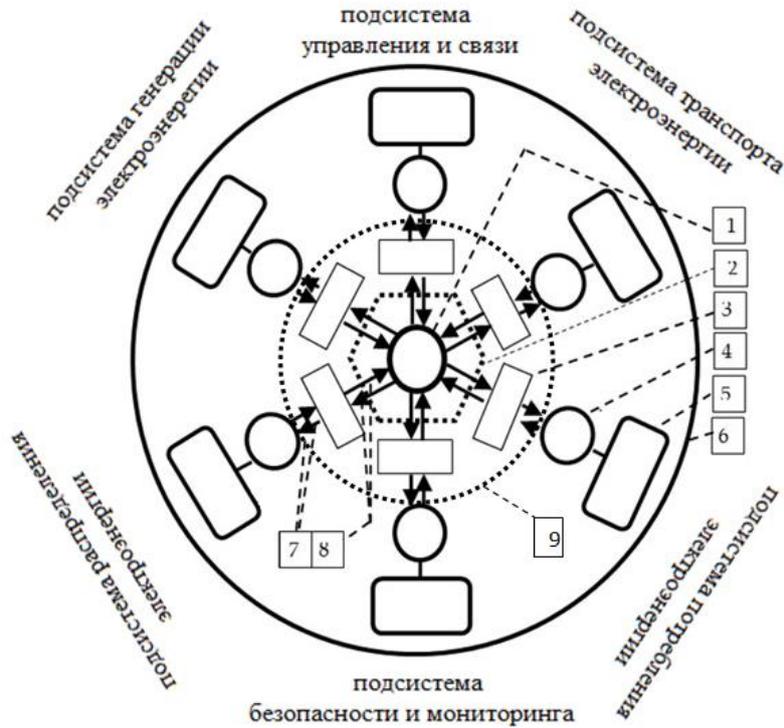


Рис. 3. Схема информационных потоков по двусторонним связям между компонентами распределенной энергосистемы включает следующие функциональные блоки: 1 – метрическая система сбора, обработки, хранения и передачи данных тела распределенной энергосистемы; 2 – тело распределенной энергосистемы; 3 – валидатор фильтрации, группировки и преобразования данных, поступающих из метрической системы сбора, обработки, хранения и передачи данных компонента распределенной энергосистемы; 4 – метрическая система сбора, обработки, хранения и передачи данных элемента распределенной энергосистемы; 5 – компонент распределенной энергосистемы; 6 – распределенная энергосистема; 7, 8 – двусторонние связи между компонентами; 9 - граница разделения физической и цифровой сред распределенной энергосистемы

В каждой подсистеме ЭЭС выделяют свои ИЭУ, для обеспечения информационного и энергетического взаимодействия между которыми выделим следующие блоки:

- компонент ЭЭС,
- метрическая система компонента ЭЭС,
- тело ЭЭС,
- метрическая система тела ЭЭС,
- двусторонние связи для взаимодействия.

Тело ЭЭС выполняет функцию единого центра согласования целевых ориентиров компонентов входящих в неё. Информационное взаимодействие тела с компонентами распределенной ЭЭС осуществляется по-

средством установления между ними двунаправленных связей, типа энергия-энергия, информация-информация, информация-энергия, энергия-информация.

Метрическая система тела ЭЭС организует перевод данных в единую систему измерений и ее обработку с последующей передачей данных по двунаправленным связям потребителям, которыми могут выступать объекты и процессы распределенной системы.

Особенность переход от иерархической системы управления (характерной для традиционной централизованной модели сети электроснабжения) к сетевой модели управления состоит в том, что управление сетевыми структурами осуществляется по средствам взаимодействующих цифровых двойников компонентов ЭЭС. Через рекурсию процедуры управления компонентами, мы можем выйти на рациональный режим работы сети с ограничениями на взаимодействия в энергоинформационном пространстве распределенных ЭЭС.

Целевыми параметрами работы распределенной ЭЭС является достижение минимальных технических и коммерческих потерь электроэнергии, повышение качества электроэнергии в сети, а также снижение информационного трафика между ИЭУ внутри каждой подсистемы ЭЭС и между подсистемами на технологических этапах генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

Заключение

Распределенная электроэнергетическая система рассмотрена как система систем полиструктурного класса, состоящая из компонентов информационно и энергетически связанных между собой и внешними системами. Даны базовые понятия современной концепции цифровых двойников применительно к электроэнергетическим системам. Определены характеристики и параметры цифрового двойника, создающие преимущества его применения при использовании программно-ориентированного подхода к проектированию, реализации, эксплуатации и управлению технологическими процессами производства и потребления электроэнергии. Представлены варианты технической реализации концепции цифровых двойников для распределенных электроэнергетических систем с применением сквозных цифровых технологий и интеллектуальных электронных устройств.

Даны понятия распределенной электроэнергетической системы, её показателей, метрической системы, а также единого центра согласования целевых ориентиров распределенных систем. Выделены компоненты распределенной электроэнергетической системы, участвующие в информационном и энергетическом взаимодействии в соответствии с регламентами технологических процессов: подсистема генерации электро-

энергии, подсистема транспорта электроэнергии, подсистема распределения электроэнергии, подсистема потребления электроэнергии, подсистема инфраструктуры (включающая устройства, связи, управления, обеспечения безопасности и мониторинга компонентов ЭЭС). Распределенная электроэнергетическая система является открытой и позволяет добавлять в нее новые элементы для обеспечения высокой надежности, бесперебойности и гарантированности электроснабжения потребителей, а также снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии, повышения качества электроэнергии.

Разработана методика формирования информационной модели данных компонента распределительной электроэнергетической системы, включающей в себя методы валидации данных, декомпозиции моделей данных, агрегация версий моделей и наборов данных, формирования двунаправленных связей между цифровыми моделями компонентов. Разработана структурная схема информационных потоков по двунаправленным связям между компонентами распределенной электроэнергетической системы.

Список литературы

1. Веселов Ф.В., Дорофеев В.В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики // Энергетическая политика. – 2018. – № 5. – С. 43–52.
2. Цифровой переход в электроэнергетике России [Электронный ресурс] // Центр стратегических разработок. Экспертно-аналитический доклад от 13.09.2017. – 2017. – 47 с. – URL: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf (дата обращения: 12.10.2023).
3. Naderi Y., Sims R., Coffele F. and Xu L. Active power quality management in smart microgrids // CIRED 2020 Berlin Workshop (CIRED 2020), 2020. – Pp. 262–265. – DOI: 10.1049/oap-cired.2021.0324.
4. Naderi Y., Hosseini S.H., Ghassem S. Zadeh et al. An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks // Renew. Sust. Energy Rev. – 2018. – Vol. 93. – Pp. 201–214.
5. Fu Y., Huang Y., Hou F., Li K. A brief review of digital twin in electric power industry // 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2022. – Pp. 2314–2318. – DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846081.
6. Aghazadeh Ardebili A., Longo A., Ficarella A. Digital twins bonds society with cyber-physical energy systems: a literature review // 2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (Green-Com) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics), 6–8 Dec. 2021, Melbourne, Australia. – 2021. – Pp. 284–289. – DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00054.
7. Steindl G., Stagl M., Kasper L., Kastner W., Hofmann R. Generic digital twin architecture for industrial energy systems // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 24. – P. 8903. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248903>.

8. Jin A.S. et al. Resilience of cyber-physical systems: role of AI, digital twins, and edge computing // *IEEE Engineering Management Review*. – Vol. 50, no. 2 (1 Secondquarter, June 2022). – Pp. 195–203. – DOI: 10.1109/EMR.2022.3172649.

9. Liu T. et al. Research and application of digital twin technology in power grid development business // *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2021. – Pp. 383–387. – DOI: 10.1109/ACPEE51499.2021.9436946.

10. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2021. – Т. 21, № 5. – С. 748–754. – DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754.

11. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // *White paper*. – 2014. – Vol. 1. – Pp. 1–7.

12. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // In: Kahlen F.J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. – Cham: Springer, 2017. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

13. Xiang F., Zhi Z., Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle // *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 27–29 March 2018, Zhuhai, China. – 2018. – Pp. 1–5. – DOI: 10.1109/ICNSC.2018.8361293.

14. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем [Concept of digital twins at life cycle stages of production systems] // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]*. – 2020. – Т. 20. – № 6. – С. 815–827. – DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827.

15. Söderberg R., Wärnefjord K., Carlson J.S., Lindkvist L. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production // *CIRP Ann.* – 2017. – Vol. 66. – Pp. 137–140. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.038.

16. Guo F., Zou F., Liu J., Wang Z. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2018. – Pp. 1–25.

17. Zhang M., Zuo Y., Tao F. Equipment energy consumption management in digital twin shop-floor: A framework and potential applications // *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. – 2018. – Pp. 1–5. – DOI: 10.1109/VTCFall.2017.8288137.

18. Ben-Miled Z., Ben, French M.O. Towards a reasoning framework for digital clones using the digital thread // *Conference: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. – 2017. – P. 873. – DOI: 10.2514/6.2017-0873.

19. Schroeder G.N., Steinmetz C., Pereira C.E., Espindola D.B. Digital twin data modeling with automation ML and a communication methodology for data exchange // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49. – Pp. 12–17. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115.

20. Talkhestani B.A., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. Consistency check to synchronize the digital twin of manufacturing automation based on anchor points // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 72. – Pp. 159–164. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.166.