При использовании материалов статьи необходимо использовать данную ссылку:
Шведенко В.В., Мозохин А.Е. Методология организации полиструктурной системы обеспечения информационного взаимодействия и мониторинга процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электрической энергии // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 2 (60). С. 71-82

УДК 004.032.2 004.42

МЕТОДОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЛИСТРУКТУРНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ, ТРАНСПОРТА, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Шведенко В.В., Мозохин А.Е.

Внедрение на объектах электроэнергетики интеллектуальных электронных устройств позволяет в режиме реального времени осуществлять контроль и управление состоянием генерирующих установок, перетоками мощности в высоковольтных электрических сетях и потреблением электроэнергии в распределительных сетях. Увеличение числа цифровых устройств на энергетических объектах приводит к необходимости организации информационного обеспечения их взаимодействия, с целью создания синергетического эффекта от их совместной работы и анализа больших данных создаваемых в процессе функционирования интеллектуальных электронных устройств. В качестве объектов исследования рассмотрены компоненты электроэнергетической системы, обеспечивающие генерацию электроэнергии, её транспортировку, распределение и потребление. Проведен сравнительный анализ применения мультиагентных и полиструктурных систем в качестве методологии организации информационного взаимодействия объектов электроснабжения. Произведена оценка достоинств и недостатков рассмотренных методологий. Электроэнергетическая система представлена как полиструктурная система. Введены понятия системы показателей полиструктуры, метрической системы полиструктуры, тела полиструктуры. Разработана структурная схема информационного взаимодействия компонентов полиструктуры электроэнергетической системы.

Ключевые слова: информационное взаимодействия энергообъектов, полиструктурная система, мультиагентная система, электроэнергетическая система, интеллектуальные электронные устройства

ВВЕДЕНИЕ

Цель цифровой трансформации в электроэнергетике состоит в изменении логики бизнес-процессов и переходу электроэнергетических компании на риск-ориентированное управление на основе внедрения цифровых технологий и анализа больших данных. Задачи цифровой трансформации в электроэнергетике направлены на внедрение следующих высокотехнологичных решений [1, 2]:

- управление технологическим циклом генерации, транспорта и распределения электрической энергии, посредствам внедрения в технологический процесс интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) и информационных систем для их управления;
- цифровое управление корпоративными бизнес-процессами;
- создание дополнительных сервисов и услуг для населения;
- кибернетическая безопасность;

Шведенко Валерия Валерьевна, кандидат экономических наук, генеральный директор ООО «Т-ИННОВАТИК»
Санкт-Петербург
Мозохин Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела автоматизированных систем технологического управления филиала ПАО «МРСК Центра» - «Костромаэнерго»
Кострома

- интеграция информационных и управленческих процессов и систем дочерних зависимых обществ на уровне главного аналитического центра.

Технологии цифровой трансформации в электроэнергетике можно разделить на две группы [3, 4]:

- классические технологии цифровой трансформации;
- технологии Индустрии 4.0.

К классическим технологиям интеллектуальной электроэнергетической системы (ЭЭС) относятся:

- цифровая подстанция, построенная на современных решениях по автоматизации с использованием открытых стандартных протоколов, эксплуатация которой происходит без оперативного персонала;
- интеллектуальные системы учета и энергомониторинга за счет внедрение на всех энергетических объектах систем автоматизированного коммерческого и технического учета электроэнергии, с целью снижения уровня электрических потерь и повышения наблюдаемости сети;
- система автоматизации процессов ликвидации аварий воздушных и кабельных сетей путем установки на аварийных линиях устройств распределенной автоматики (реклоузер, фъюзсейвер, управляемый разъединитель, индикатор короткого замыкания, бустер) с целью предотвращения повторяющихся аварийных ситуаций, снижения времени реагирования на технологические нарушения на протяженных линиях электропередачи и как следствие, увеличения полезного отпуска электрической энергии потребителям;
- беспилотные летательные аппараты (БПЛА), носимые интеллектуальные устройства для персонала, микрогрид для мониторинга состояния компонентов электрических сетей, транспорта компании, а также персонала с использованием технологии интернета вещей;
- интегрированные информационные системы управления или ADMS – системы (automated data management system) автоматизированные системы обработки данных с поддержкой функционала: SCADA, DMS, EMS, OMS, GIS, AMI, WFM[1], базирующиеся на модели сети с процессором топологий.

К технологиям Индустрии 4.0, имеющим потенциал применения в интеллектуальной ЭЭС относятся [5, 6]: digital twins (цифровые двойники), big data (большие данные), machine learning (машинное обучение), blockchain (распределенные реестры), business ontology (онтологические модели деятельности).

ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМАТИКА СТАТЬИ. Высокие темпы цифровой трансформации электроэнергетической отрасли [7], указывают на возможность применения сквозных цифровых технологий Индустрии 4.0 на объектах энергоснабжения. Однако, на текущий момент времени, не существует единой методологии организации информационного взаимодействия, мониторинга и управления компонентов интеллектуальной ЭЭС, в полной мере соответствующей современным требований к наблюдаемости, управляемости, надежности и бесперебойности электроснабжения на всех этапах производства и потребления электроэнергии.

Компоненты интеллектуальной ЭЭС

К компонентам интеллектуальной ЭЭС относятся высокотехнологическое аппаратное и программное обеспечение, средства управления компонентами системы, средства обеспечения отказоустойчивости, доступности и информационной безопасности.

Под термином интеллектуальная ЭЭС обычно понимают интеграцию в единое информационно пространство следующих компонентов [8]:

– система генерации электроэнергии, отвечает за безаварийное функционирование всех генераторных установок ЭЭС.

– система транспорта электроэнергии в высоковольтных электрических сетях, обеспечивает надежную, безаварийную транспортировку электрической энергии с соблюдением требования к низкому уровню электрических потерь, и эффективной загрузки электросети в текущей и аварийной ситуациях;

– система распределения электроэнергии от высокого до низкого напряжения, обеспечивает бесперебойное

[1] *SCADA – программный комплекс диспетчерского управления и сбора данных.*
DMS - Анализ распределительных сетей, интеллектуальное управление, оптимизация и планирование.
EMS - Анализ высоковольтных сетей, интеллектуальное управление и оптимизация.
OMS/WFM - Управление отключениями, планирование работ, персонал, колл-центр и др.
GIS – геоинформационная система.
AMI – Инфраструктура интеллектуального учета электроэнергии.

электроснабжение промышленных, социально-значимых, бытовых потребителей всех категорий надежности электроснабжения, при соблюдении требований к уровню электрических потерь, балансу нагрузок в электросети и качеству электрической энергии у конечного потребителя;

– система электроснабжения потребителей, обеспечивает безопасное, надежное и бесперебойное электроснабжение в местах проживания человека, а также объектах социальной и культурной жизни, например, медицинские учреждения, организации общественного питания, детские сады, школы;

– инфраструктурная система ЭЭС представляет собой комбинацию *подсистем управления и связи* (включает активное сетевое оборудование, транспортные сети передачи данных, локальные вычислительные сети объектов, а также блоки управления объектами ЭЭС, включая программно-логические контроллеры, исполнительные механизмы воздействия, приводы, регуляторы), *подсистем безопасности и мониторинга* (включает охранно-пожарные системы, видеонаблюдение, датчики интернета вещей, устройства и системы информационной безопасности объектов ЭЭС).

Структурная схема компонентов интеллектуальной ЭЭС участвующих в информационных взаимодействиях в рамках технологического процесса генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии представлена на рисунке 1. Взаимодействие между компонентами осуществляется через каналы проводной и беспроводной связи посредствам ИЭУ компонентов системы. В таблице 1 представлены компоненты интеллектуальной ЭЭС с указанием возможных информационных взаимодействий между ними

Рисунок 1. Структурная схема компонентов интеллектуальной ЭЭС, участвующих в информационном взаимодействии

Таблица 1.

Компоненты интеллектуальной ЭЭС с указанием информационных взаимодействий между ними

Компонент интеллектуальной ЭЭС и его назначение	**ИЭУ компонентов**	**Информационные взаимодействия компонентов**
Система генерации электроэнергии. Требуется для обеспечения выработки необходимого количества электрической энергии в соответствии с имеющимися графиками потребления	Цифровые датчики температуры активных частей турбины и окружающей среды; цифровые датчики параметров влажности воздуха; цифровые датчики электрических величин работы турбины (сопротивление изоляции ротора, витковые замыкания в обмотке ротора); контроллеры мониторинга и управления работы турбины.	Информационное взаимодействие на уровне программно-технических комплексов управления технологическими системами генерации и транспорта электроэнергии.

Компонент интеллектуальной ЭЭС и его назначение	ИЭУ компонентов	Информационные взаимодействия компонентов
Система транспорта электроэнергии Требуется для транспорта электрической энергии высокого напряжения (35 кВ и выше) по высоковольтным линиям электропередачи	Цифровые датчики гололедообразования, провиса линий электропередачи, пробоя изолятора; БПЛА мониторинга и диагностики состояния сети; цифровые системы технического зрения.	Информационное взаимодействие на уровне программно-технических комплексов управления технологическими системами генерации, транспорта и распределения электроэнергии.
Система распределения электроэнергии Требуется для распределения электроэнергии класса напряжения 6 - 10 кВ в городской или сельской местности	Устройства распределительной автоматизации сети (реклоузер, фьюзсейвер, управляемый разъединитель, ИКЗ, бустер); цифровые датчики гололедообразования, провиса линий электропередачи, пробоя изолятора.	Информационное взаимодействие на уровне программно-технических комплексов управления технологическими процессами транспорта, распределения и потребления электроэнергии
Система обеспечения потребления электроэнергии. Требуется для электроснабжения класса напряжения ниже 1 кВ в местах проживания человека, а также объектах социальной и культурной жизни, промышленных предприятиях	Цифровые датчики контроля напряжения, короткого замыкания, перегрева контактов коммутационных устройств сети; охранно-пожарная сигнализация, системы автоматического пожаротушения; датчики дыма/огня/газа, датчики вскрытия двери, датчики разбитого стекла, датчики движения; видеонаблюдение.	Информационное взаимодействие со всеми ИЭУ для консолидации информации о состоянии систем, их доступности и управляемости.
Система управления и связи. Инфраструктурная система, предназначенная для организации информационного взаимодействия компонентов ЭЭС	Оборудование связи: активное и пассивное сетевое оборудование, проводные и беспроводные каналы связи; ПТК для управления генерацией, транспортом, распределением и потреблением электроэнергии	Информационное взаимодействие со всеми ИЭУ имеющими модули проводной и беспроводной связи для консолидации информации о состоянии систем, их доступности и управляемости.
Система мониторинга и безопасности. Инфраструктурная система, предназначенная для обеспечения безопасное взаимодействие компонентов ЭЭС	Охранно-пожарная сигнализация, системы автоматического пожаротушения, датчики дыма/огня/газа, датчики вскрытия двери, датчики разбитого стекла, датчики движения, видеонаблюдение	Информационное взаимодействие со всеми ИЭУ имеющими модули проводной и беспроводной связи для консолидации информации о состоянии систем, их доступности и управляемости

Выбор методологии организации информационного взаимодействия компонентов интеллектуальной ЭЭС

Современные программно-аппаратные комплексы, входящие в состав интеллектуальной ЭЭС, позволяют осуществлять операции сбора, передачи, обработки и хранения информации с географически распределенных объектов электроснабжения. Однако, попытки интеграции данных с различных ИЭУ в единую информационную систему приводят к сложностям, связанным с несогласованной работой устройств, генерацией избыточного трафика в сеть, отсутствием единого стандарта информационного обмена между технологическими и корпоративными информационными системами ЭЭС.

Для оптимального взаимодействия ИЭУ на объектах ЭЭС требуется создание организационной структуры или

организационной среды, обеспечивающей координацию сложных составных интеллектуальных устройств через определение их ролей, каналов связи и полномочий.

Для этих целей рассмотрим ЭЭС со следующих двух позиций:

- ЭЭС как совокупность независимых сложных систем, взаимодействующих между собой на основе мультиагентных принципов (мультиагентная система);

- ЭЭС как элементов полиструктурной системы, имеющей общий центр согласования целевых ориентиров входящих в ее состав подсистем, распределения и мониторинга используемых ресурсов и оценки достигаемых синергетических эффектов (полиструктурная система).

Одним из классификационных признаков любых сложных систем является свойство их целостности с позиций открытости системы к вносимым в нее преобразованиям, дополнениям как с точки зрения расширения ее функциональных возможностей, так и подключения ее элементов к новым потокам данных, позволяющим повысить точность достижения целевых ориентиров и снизить размер ее ресурсопотребления. В случае ЭЭС целевые ориентиры направлены на снижения аварийности, величины недоотпуска электроэнергии в сеть и электрических потерь, а также увеличение показателей надежности, бесперебойности и гарантированности электроснабжения потребителей. Этот признак в полной мере присущ как мультиагентной, так и полиструктурной системе.

Проведем анализ функциональных особенностей каждого класса этих систем с позиции достижения целевых показателей ЭЭС.

На первый взгляд данные системы похожи, часто используются синонимами и позволяют достичь один и тот же результат одинаковыми методами. Однако более их подробное рассмотрение показывает, что это не так.

Мультиагентная система (МАС, англ. Multi-agent system) – система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами, в качестве которых могут выступать независимые программные комплексы, роботы, IoT, а также люди и группы людей, организационные структуры, взаимодействующие с другими организационными структурами на условиях учета взаимных интересов. Характерными признаками таких систем являются следующее:

– каждый агент системы обладает сложной структурой, которая является хотя бы частично независимой от других агентов мультиагентной системы;

– независимость агента мультиагентной системы определяется наличием у него собственного дерева цели, ориентированного на обеспечение устойчивости и развития его структуры, а также наличия у него объектов и связей между ними, которые относятся только к данному агенту и не присущи другим агентам;

– ни один из агентов не обладает полнотой всей информации о мультиагентной системе, в состав которой они входят;

– мультиагентной системе присуща децентрализация, при которой агенты системы являются участниками «рыночных» отношений, а взаимоотношения агентов друг с другом определяется наличием и соблюдением баланса интересов друг друга;

– мультиагентная система является самоорганизующейся системой, в которой достижение оптимального решения задач его участников (агентов системы) осуществляется без внешнего вмешательства, при этом критериями оптимизации являются минимизация ресурсов, времени и энергии на получение приемлемого результата;

– мультиагентная система является гибкой, она может дополняться или заменяться новыми агентами, связи между агентами могут модифицироваться, структура агентов преобразовываться;

– мультиагентная система обладает способностью к самовосстановлению и устойчивостью к сбоям;

– агенты мультиагентной системы могут формировать временные союзы внутри системы, которые позволяют им учитывать совместные интересы своей группы при взаимодействии с другими агентами мультиагентной системы;

– агенты мультиагентной системы могут быть нейтральны друг к другу, конкурировать друг с другом, взаимодействовать друг с другом в рамках достижения совпадающих целей;

– агенты мультиагентной системы могут обмениваться полученными знаниями, используя некоторый специальный язык и подчиняясь установленным правилам «общения» (протоколам) в системе;

– количество протоколов взаимодействия агентов мультиагентной системы определяется количеством союзов агентов (агент – агент; агент – группа агентов; группа агентов – группа агентов) или же по согласованию сторон всех участников мультиагентной системы устанавливается единый протокол (например, Knowledge Query Manipulation Language (KQML), FIPA’s Agent Communication Language (ACL);

– предметом конкуренции агентов мультиагентной системы является борьба за ресурсы, повышение статуса значимости целевых ориентиров агентов, создание условий доминирования целевых ориентиров одного агента мультиагентной системы над другими агентами.

Созданные как виртуальная сущность интеллектуальные агенты в соответствии с заложенными в них алгоритмами способны действовать автономно в интересах достижения целей своих владельцев или пользователей, а также формировать устойчивые во времени структуры – союзы интеллектуальных агентов и решать задачи системного характера в динамически меняющейся внешней и внутренней среде.

Полиструктурные системы, в отличие от мультиагентных систем обладают не только виртуальной, но и реальной сущностью. Они представляют собой объединение подмножеств нескольких систем, целевые ориентиры которых согласованы между собой набором определенных правил, нормативов, сроков достижения целей, распределением взаимно используемых ресурсов.

Под *полиструктурной системой* традиционно понимают «множество разнообразных компонентов, отличающихся физическими свойствами, функциональным назначением, сложностью внутренних структур, рассматриваемых с позиций системного единства и ориентированных на достижение общей цели» [9]. В отличии от мультиагентной системы, полиструктурная система имеет интегрирующий (консолидирующий) элемент, осуществляющий «синхронизацию подсистем и обладающий свойством изменения во времени» [10].

В своих работах проф. В.И. Перов [9, 11, 12, 13, 14, 15] характеризует полиструктуру как «единое целое, состоящее из неоднородных, взаимодействующих интеллектуальных коллективных агентов, находящихся в разных местах, каждый из которых сформирован по своим правилам и выполняет свои функции, обеспечивая устойчивость системы в целом».

Несмотря на имеющиеся структурные отличия любая полиструктурная система обладает следующими свойствами:

– является открытой, динамически изменяемой (в систему можно добавлять новые элементы, исключать имеющиеся или делать их латентными (не учитываемыми) на какой-то период времени;

– подчинена законам диалектической логики (закон единства и борьбы противоположностей, закон перехода количественных изменений в качественные, закон отрицания отрицания);

– формирует синергетический эффект в процессе взаимодействия элементов полиструктурной системы;

– включает в себя набор правил и язык взаимодействия элементов полиструктурной системы;

– может быть представлена как система объектов, процессов и связей между ними;

– целевые ориентиры полиструктурой системы не равны сумме целевых ориентиров входящих в него элементов полиструктурной системы и оказывают обратное влияние на изменение или корректировку целевых ориентиров элементов полиструктурной системы;

– каждый элемент полиструктурной системы имеет свою систему дерева целей и показателей, оценивающих состояние его объектов и процессов, которые могут входить в состав дерева целей и показателей полиструктурной системы, или ею не учитываться.

Как правило, показатели состояния отдельных элементов полиструктурной системы имеют общую основу, связанную с ресурсным обеспечением полиструктуры и другими параметрами состояния среды, в которой она находится.

Особенностью интеллектуальной ЭЭС является тот факт, что его инфраструктура состоит из множества независимых компонентов, которые выполняют свою функцию, однако каждая из них ориентирована на достижение общей цели – обеспечение электроэнергией конечных потребителей. Компоненты системы по-разному оказывают влияние на эффективность функционирования и достижения целевых показателей ЭЭС: надежность, бесперебойность и гарантированность электроснабжения потребителей, низкий уровень потерь электроэнергии. Каждому из них характерны свои бизнес-процессы, технологическая оснащенность, жизненный цикл используемого оборудования и приборов, квалификация персонала и т.д. Поэтому моделирование интеллектуальной ЭЭС на концептуальном уровне как единой монолитной системы является крайне сложной и неэффективной задачей.

В тоже время общая целевая функциональная направленность входящих ее подсистем не позволяет рассматривать ее как совокупность конкурирующих между собой структур, где интересы каждой из структур

важнее общей генеральной цели их взаимодействия.

В этой связи целесообразно реализовывать концепцию информационного обеспечения ЭЭС через моделирование ее в качестве полиструктурной системы, где взаимодействие компонентов полиструктуры осуществляется с учетом происходящих физических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

Рассмотрение ЭЭС как полиструктурной системы.

С точки зрения организации информационного взаимодействия между компонентами интеллектуальной ЭЭС, полиструктурная система представляет собой множество связанных и взаимодействующих между собой энергетических объектов, в том числе объединенных в группы по ряду функциональных признаков, состав которых и связи между которыми могут динамически изменяться во времени под воздействием различных внешних и внутренних факторов. Интеллектуальная ЭЭС является открытой, а значит обладает свойством взаимодействия с другими энергетическими системами. Виды взаимодействия систем и их составных элементов подчинены технологическим и организационным правилам функционирования объектов топливно-энергетического комплекса, которые в свою очередь определяются их целевыми показателями.

Объединенное множество показателей элементов полиструктурной системы будем называть *системой показателей полиструктуры.*

Идеальный или реальный физический объект, содержащий множество показателей полиструктуры образует особый ее элемент, формирующий синергетический эффект полиструктурной системы, который в дальнейшем мы будем называть *телом полиструктуры.* Обязательной функцией тела полиструктуры является обеспечение информационного взаимодействия всех элементов полиструктурной системы, согласование их целевых ориентиров для достижения целевых ориентиров полиструктурной системы в целом.

Для реализации этой функции предлагается специальным образом организовать метрическую систему сбора, обработки, хранения и передачи информационных ресурсов (далее – метрическая система) в полиструктурной системе.

Информационное взаимодействие тела с другими элементами полиструктурной системы осуществляется посредством установления между ними двунаправленных связей, которые будем называть коллинеарными. На рисунке 2 показана упрощенная схема полиструктурной системы.

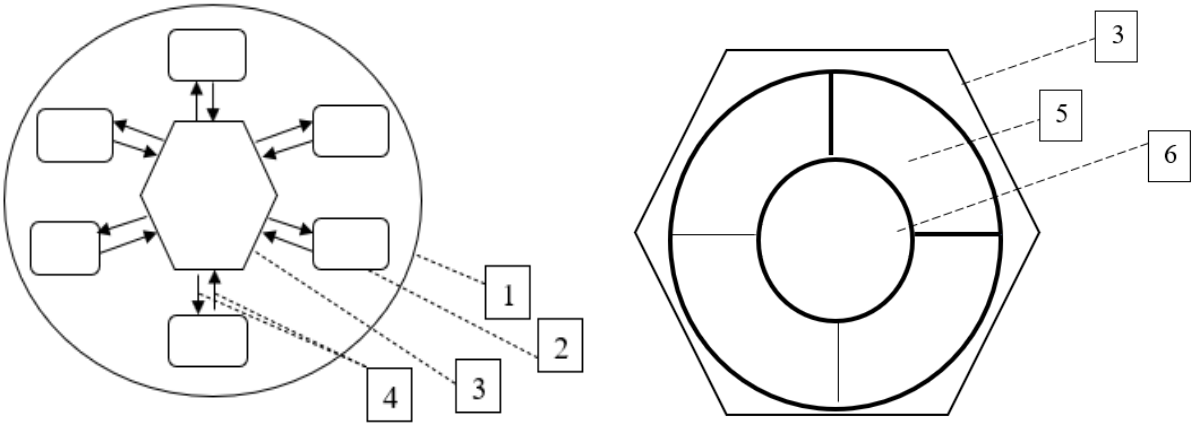

Рисунок 2. Схема полиструктурной системы, где 1 – полиструктурная система (полиструктура); 2 – элемент полиструктурной системы; 3 – тело полиструктурной системы (тело полиструктуры); 4 – двунаправленные связи между телом и элементом полиструктурной системы; 5 – сегмент внешнего слоя тела полиструктурной системы, содержащий прото- и метамодель элемента полиструктурной системы, дерево целей элемента полиструктурной системы, набор показателей элемента полиструктурной системы, набор правил и согласований показателей элемента полиструктурной системы с показателями тела полиструктуры; 6 – внутренний интегрирующий слой тела полиструктуры

Метрическая система тела полиструктуры организует перевод данных в единую систему измерений и ее обработку с последующей передачей данных по коллинеарным связям ее потребителям, которыми могут выступать объекты и процессы полиструктуры. Укрупненная схема организация информационных потоков по коллинеарным связям показана на рисунке 3.

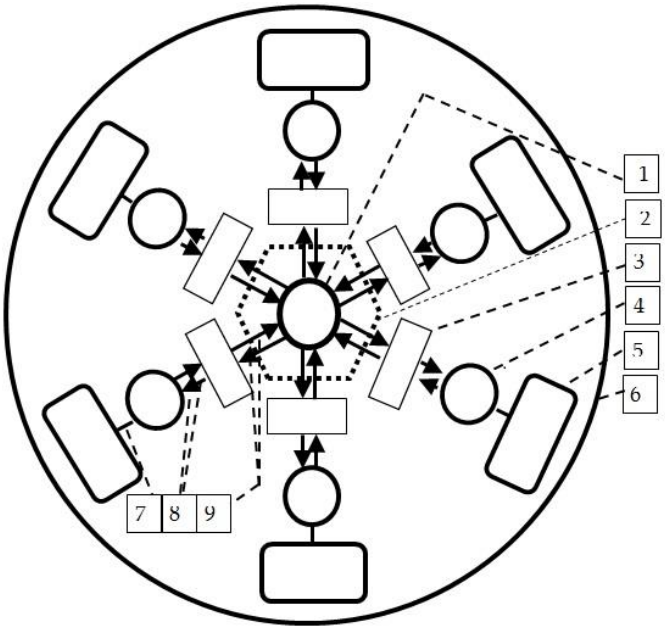

Рисунок 3. Схема информационных потоков по коллинеарным связям полиструктурной системы, где 1- метрическая система сбора, обработки, хранения и передачи данных тела полиструктурной системы; 2 – тело полиструктурной системы; 3 – валидатор фильтрации, группировки и преобразования данных, поступающих из метрической системы сбора, обработки, хранения и передачи данных элемента полиструктурной системы; 4 – метрическая система сбора, обработки, хранения и передачи данных элемента полиструктурной системы;5 – элемент полиструктурной системы; 6 – полиструктурная система; 7 – канал информационных потоков данных элемента полиструктурной системы (IoT, Internet, микропроцессоры, пр.); 8, 9 – коллинеарные двунаправленные связи

Под физической средой ЭЭС будем понимать элементы конструкции сети (опоры электропередачи, траверсы, объекты капитального строительства электрических подстанций), состояние объектов электроснабжения (аварийность, бесперебойность, микроклимат на объектах), а также человеческий фактор, оказывающий воздействие на показатели состояния физической среды.

В полиструктуре ЭЭС данные, полученные от ИЭУ объектов физической среды, оцифровываются и передаются по каналам связи в цифровую среду. Цифровая среда полиструктуры ЭЭС – это виртуальный аналог физической среды, в которой данные о состоянии реальных объектов и среды обитания человека используются для анализа, синтеза и обработки, с целью моделирования реальных процессов и развития управляющего воздействия на объекты физической среды. В цифровой среде полезные данные используются для создания цифровых моделей компонентов ЭЭС и полиструктуры в целом.

При построении цифровых моделей компонентов ЭЭС используют следующие методы декомпозиции [16]:

– декомпозицию по физическим процессам, которая осуществляется на основе выявления закономерностей в системе, представленных аналитическими или численными методами, через типовые алгоритмы;

– функциональную декомпозицию, которая заключается в выявлении структуры и функций элементов системы;

– декомпозицию по жизненному циклу компонентов ЭЭС, которая основана на анализе процессов, протекающих в материальной системе в различные периоды времени,

позволяющая осуществлять мониторинг изменения свойств объектов и связей от фактора времени.

На основе этих методов декомпозиции создаются цифровые модели компонентов полиструктуры ЭЭС. В результате чего полиструктура ЭЭС будет состоять из множества разноплановых цифровых моделей компонентов взаимосвязанных через информационные потоки от ИЭУ энергетических объектов [17-19].

В полиструктурной системе ЭЭС выделим следующие базовые компоненты:

– подсистема генерации электроэнергии, отвечающая за выработку заданного объема электрической энергии, в соответствии со спросом на оптовом рынке электрической энергии;

– подсистема транспорта электроэнергии, обеспечивающая надежную и безаварийную передачу больших объектов электрической энергии от объектов генерации до мест распределения электроэнергии;

– подсистема распределения электроэнергии, обеспечивающая бесперебойность и гарантированность электроснабжения конечным потребителям;

– подсистема электроснабжения потребителей, обеспечивающая бесперебойное питание всех подсистем объектов жизнеобеспечения;

– подсистема безопасности и мониторинга, предназначенная для создания безопасных условий эксплуатации объектов электроснабжения в режиме 24/7.

– подсистема управления и связи, предназначенная для организации связи между всеми компонентами ЭЭС с целью скоординированной работы каждой подсистемы в текущей и аварийной ситуации на объектах электроснабжения.

На рисунке 4 представлена структурная схема взаимодействия компонентов полиструктуры ЭЭС.

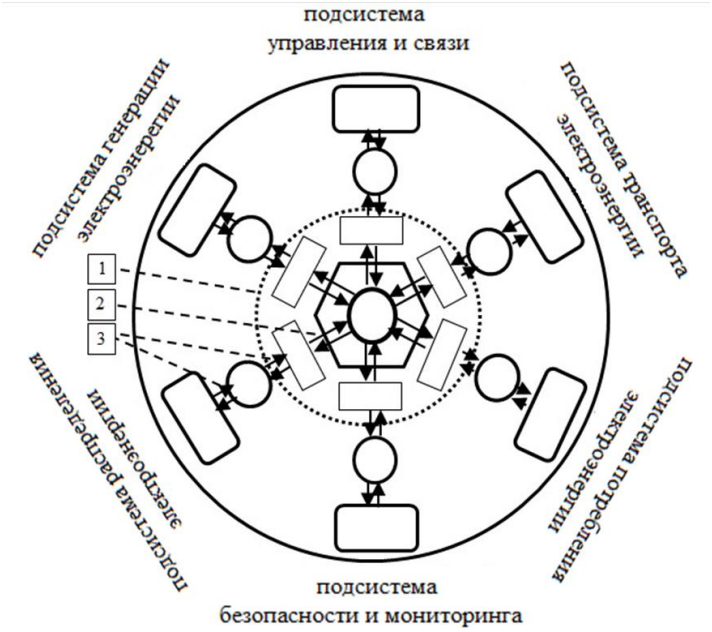

Рисунок 4. Структурная схема информационного взаимодействия компонентов полиструктуры ЭЭС, где 1 - граница разделения физической и цифровой сред полиструктуры; 2, 3 - коллинеарные двунаправленные связи информация взаимодействия компонентов ЭЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимым условием формирования и развития интеллектуальной ЭЭС в рамках цифровой трансформации топливно-энергетическом комплекса является формирование информационного взаимодействия компонентов ЭЭС. Для выбора методологии организации информационного обеспечения интеллектуальной ЭЭС проведен сравнительный анализ применения мультиагентных и полиструктурных систем. Анализ указывает на принципиальные отличия функционирования и взаимодействия ИЭУ этих систем. В основе взаимодействия ИЭУ в полиструктурной системе лежит иной способ устранения несогласованного и конфликтного поведения между её компонентами чем в МАС, что позволяет достичь более высокого уровня

наблюдаемости, надежности и управляемости генерацией, транспортом, распределением и потреблением электроэнергии. Так полиструктурная система имеет целевые ориентиры не равны сумме целевых ориентиров, входящих в него элементов полиструктурной системы, а взаимодействие между элементами организованно через единый информационный центр.

ЭЭС рассмотрена как полиструктурная система, состоящая из компонентов информационно связанных между собой и внешними системами. Даны базовые понятия полиструктуры ЭЭС, системы её показателей, метрической системы, а также тела полиструктуры. Выделены компоненты полиструктуры ЭЭС, участвующие в информационном взаимодействии в соответствии с регламентами технологических процессов: подсистема генерации электроэнергии, подсистема транспорта электроэнергии, подсистема распределения электроэнергии, подсистема потребления электроэнергии, подсистема инфраструктуры (включающая устройства, связи, управления, обеспечения безопасности и мониторинга компонентов ЭЭС). Полиструктура ЭЭС 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. Разработана структурная схема информационного взаимодействия компонентов полиструктуры ЭЭС. iea

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Цифровой переход в электроэнергетике России: Центр стратегических разработок, экспертно-аналитический доклад // Центр стратегических разработок. М., 2017. 47 с. [Электронный ресурс] URL: https://csr.ru/wp-content/uploads/2017/09/
2. Masera M., Bompard E. F., Profumo F., Hadjsaid N. Smart (Electricity) Grids for Smart Cities: Assessing Roles and Societal Impacts // Proceedings of the IEEE. 2018. V. 106. N 4. P. 613–625. doi: 10.1109/JPROC.2018.2812212
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 // Распоряжение Правительства Российской Федерации №1715-р от 13.11.2009. М., 2009. 104 с. [Электронный ресурс] URL: http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054_0
4. Yuhua Du, Hao Tu, Srdjan Lukic, David Lubkeman, Abhishek Dubey, Gabor Karsai, Development of a Controller Hardware-in-the-Loop Platform for Microgrid Distributed Control Applications // Electronic Power Grid (eGrid) 2018 IEEE. 2018. P. 1–6. doi: 10.1109/eGRID.2018.8598696
5. Chengcheng Zhao, Jiming Chen, Jianping He, Peng Cheng Privacy-Preserving Consensus-Based Energy Management in Smart Grids // Signal Processing IEEE Transactions on. 2018. V. 66. N 23. P. 6162–6176. doi: 10.1109/TSP.2018.2872817
6. Wang K., Hu X., Li H. et al. A Survey on Energy Internet Communications for Sustainability // IEEE Transactions on Sustainable Computing. 2017. V. 2. N 3. P. 231–254. doi: 10.1109/TSUSC.2017.2707122
7. Цифровая трансформация в электроэнергетике // KMDA. Команды-А. 2019. 25 с. [Электронный ресурс] URL: https://komanda-a.pro/blog/digital_electro
8. Мозохин А.Е., Дроздов В.Г., Староверов Б.А.Энергетика нового уклада (EnergyNet): проектирование интеллектуальных цифровых систем на электрических подстанциях: учеб. пособие. – Кострома: Изд-во Костром. гос. ун-та, 2018. – 70 с.
9. Перов В.И. Методы формирования полиструктурных социально-экономических систем // Экономический Вестник Ростовского государственного университета. № 1. Часть 1. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2007.
10. Тимофеев Д.Н., Шведенко В.В., Щекочихин О.В. Модель управления полиструктурной системой на основе оценки и выбора альтернатив методом попарных сравнений // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2017. №7. С.1-9.
11. Перов В.И., Парахина В.Н. Принципы симбиоза - новые современные принципы развития социально-экономических систем // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. № 3 (22). - Саратов: СГСЭУ, 2008.
12. Перов В.И. Современные тенденции развития полиструктурных организаций холдингового типа в России / В.И. Перов – М.: Проспект, 2008.
13. Перов В.И. Формирование полиструктурных социально-экономических систем и особенности управления ими / В.И. Перов, В.Н. Парахина – М.: Изд-во «НЕФТЬ и ГАЗ» РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2007.
14. Перов В.И., Парахина В.Н. Формирование полиструктурных экономических систем: организационно-функциональные аспекты // Современные проблемы развития теории и практики управления организациями –

Ставрополь: СевКавГТУ, 2007.
15. Петрова С.Ю. Общая задача управления полиструктурной системой // Вестник Новгородского государственного университета. 2009. №50. С. 35-39.
16. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 815–827. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827
17. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. V. 1. P. 1–7.
18. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. Springer, 2017. P. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
19. Xiang F., Zhi Z. Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle // Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361293

METHODOLOGY OF ORGANIZING A POLYSTRUCTURAL SYSTEM FOR PROVIDING INFORMATION INTERACTION AND MONITORING PROCESSES OF GENERATION, TRANSPORTATION, DISTRIBUTION AND CONSUMPTION OF ELECTRIC POWER

Shvedenko Valeria Valerievna., PhD., general director of T-INNOVATIK LLC, St. Petersburg
Mozohin Andrey Evgenyevich, PhD., deputy head of the department of automated systems of technological management of PAO «MRSK Centra» - «Kostromaenergo»

The introduction of intelligent electronic devices at electric power facilities allows real-time monitoring and management of the state of generating plants, power flows in high-voltage electrical networks and electricity consumption in distribution networks. An increase in the number of digital devices at energy facilities leads to the need to organize information support for their interaction, in order to create a synergistic effect from their joint work and analysis of big data created in the process of functioning of intelligent electronic devices. The objects of research are the components of the electric power system that provide the generation of electricity, its transportation, distribution and consumption. A comparative analysis of the use of multi-agent and polystructural systems as a methodology for organizing information interaction of power supply objects is carried out. The advantages and disadvantages of the considered methodologies are assessed. The electrical power system is presented as a polystructural system. The concepts of a system of indicators of a polystructure, a metric system of a polystructure, a body of a polystructure are introduced. A block diagram of the information interaction of the components of the polystructure of the electric power system has been developed.

Keywords: information interaction of power facilities, polystructural system, multi-agent system, electric power system, intelligent electronic devices

REFERENCES:

1. Cifrovoj perekhod v elektroenergetike Rossii: Centr strategicheskih razrabotok, ekspertno-analiticheskij doklad [*Digital transition in the power industry of Russia: Center for strategic research, expert and analytical report*]. Centr strategicheskih razrabotok [*Center for Strategic Research*]. M., 2017. 47 p., available at: URL: https://csr.ru/wp-content/uploads/2017/09/
2. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadjsaid N. Smart (Electricity) Grids for Smart Cities: Assessing Roles and Societal Impacts // Proceedings of the IEEE. 2018. V. 106. N 4. P. 613–625. doi: 10.1109/JPROC.2018.2812212
3. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 [En*ergy strategy of Russia for the period up to 2030*]. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii №1715-r ot 13.11.2009 [*Order of the Government of the Russian Federation No. 1715-p dated November 13, 2009*]. 2009. 104 p., available at: URL: http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054_0
4. Yuhua Du, Hao Tu, Srdjan Lukic, David Lubkeman, Abhishek Dubey, Gabor Karsai, Development of a Controller Hardware-in-the-Loop Platform for Microgrid Distributed Control Applications // Electronic Power Grid (eGrid) 2018 IEEE. 2018. P. 1–6. doi: 10.1109/eGRID.2018.8598696

5. Chengcheng Zhao, Jiming Chen, Jianping He, Peng Cheng Privacy-Preserving Consensus-Based Energy Management in Smart Grids // Signal Processing IEEE Transactions on. 2018. V. 66. N 23. P. 6162–6176. doi: 10.1109/TSP.2018.2872817
6. Wang K., Hu X., Li H. et al. A Survey on Energy Internet Communications for Sustainability // IEEE Transactions on Sustainable Computing. 2017. V. 2., N 3., pp. 231–254. doi: 10.1109/TSUSC.2017.2707122
7. Cifrovaya transformaciya v elektroenergetike [*Digital transformation in the power industry]. KMDA. Komandy-A [KMDA. Commands-A*]. 2019. 25 p. available at: URL: https://komanda-a.pro/blog/digital_electro
8. Mozokhin, A.E. Energetika novogo uklada (EnergyNet) : proektirovanie intellektual'nyh cifrovyh sistem na elektricheskih podstanciyah : ucheb. posobie [*Energy of the New Way (EnergyNet): Designing of Intelligent Digital Systems at Electric Substations: studies. manual*] / A.E. Mozokhin, V.G. Drozdov, B.A. Staroverov. - Kostroma: Kostroma publishing house. state university, 2018. - 70 p.
9. Perov, V.I. Metody formirovaniya polistrukturnyh social'no-ekonomicheskih sistem [*Methods of forming polystructural socio-economic systems*]. Ekonomicheskij Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta [*Economic Bulletin of Rostov State University*]. No. 1. Part 1. - Rostov-on-Don: SFedU, 2007.
10. Shvedenko, V.V. Model' upravleniya polistrukturnoj sistemoj na osnove ocenki i vybora al'ternativ metodom poparnyh sravnenij [*A model for managing a polystructural system based on the assessment and selection of alternatives by the method of pairwise comparisons*] / D. N. Timofeev, V. V. Shvedenko, O. V. Schekochikhin // Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Inzhenernyj vestnik Dona» [*Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don"*]. 2017. No. 7. pp. 1-9.
11. Perov, V.I. Principy simbioza - novye sovremennye principy razvitiya social'no-ekonomicheskih sistem [*Principles of symbiosis - new modern principles of development of socio-economic systems*] / V.I. Perov, V.N. Parakhina // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo social'no-ekonomicheskogo universiteta [*Bulletin of the Saratov State Social and Economic University*]. No. 3 (22). - Saratov: SGSEU, 2008.
12. Perov, V.I. Sovremennye tendencii razvitiya polistrukturnyh organizacij holdingovogo tipa v Rossii [*Modern trends in the development of polystructural holding-type organizations in Russia*] / V.I. Perov - M .: Prospect, 2008.
13. Perov, V.I. Formirovanie polistrukturnyh social'no-ekonomicheskih sistem i osobennosti upravleniya imi [*Formation of polystructural socio-economic systems and features of their management*] / V.I. Perov, V.N. Parakhina - M.: Publishing house "Oil and Gas" Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkina, 2007.
14. Perov, V.I. Formirovanie polistrukturnyh ekonomicheskih sistem: organizacionno-funkcional'nye aspekty [*Formation of polystructural economic systems: organizational and functional aspects*] / V.I. Perov, V.N. Parakhina // Sovremennye problemy razvitiya teorii i praktiki upravleniya organizaciyami [*Modern problems of development of theory and practice of management of organizations*]. Stavropol: SevKavGTU, 2007.
15. Petrova, S.Yu. Obshchaya zadacha upravleniya polistrukturnoj sistemoj [*The general problem of managing a polystructural system*] // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta [*Bulletin of the Novgorod State University*]. 2009. No. 50., pp. 35-39.
16. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Primenenie koncepcii cifrovyh dvojnikov na etapah zhiznennogo cikla proizvodstvennyh sistem [*Concept of digital twins at life cycle stages of production systems*]. Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki [*Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*], 2020, vol. 20, no. 6, pp. 815–827. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827
17. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. V. 1. pp. 1–7.
18. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. Springer, 2017. pp. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
19. Xiang F., Zhi Z. Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle // Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2018. pp. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361293