

ОТ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ К ИНТЕРНЕТУ ЭНЕРГИИ

АВТОРЫ:

В.А. НАУМОВ,
К.Т.Н.,
ООО НПП «ЭКРА»

В.А. МАТИСОН,
К.Т.Н.,
ООО НПП «ЭКРА»

В последние годы в мировой электроэнергетике произошли существенные изменения, которые привели к возникновению новых современных требований к объектам генерации, сетевой инфраструктуре и в целом к ор-

ганизации электроэнергетики и электроэнергетических рынков. В настоящее время данная сфера промышленности деятельности переживает кардинальную трансформацию, основной тенденцией которой выступают новые информационные технологии.

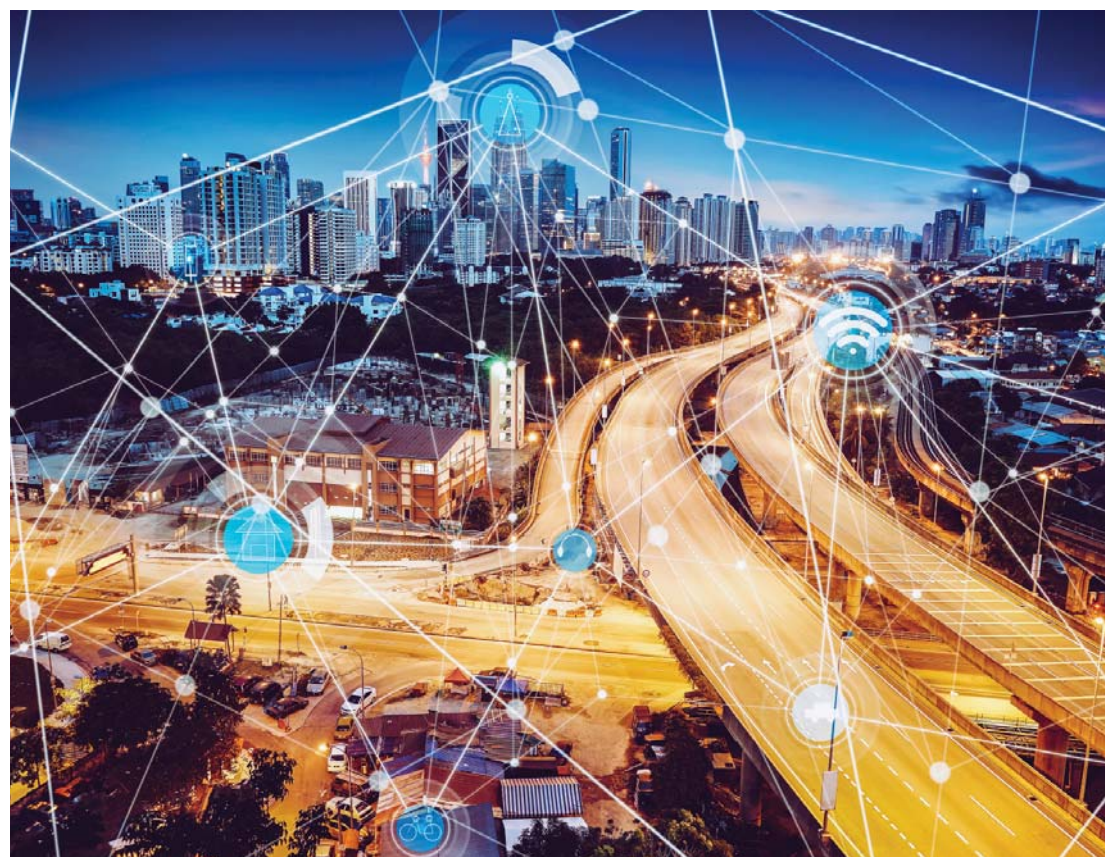
Ключевые слова: электрические сети; цифровые технологии систем управления киберфизическими системами; умные сети; оперативно-диспетчерское управление.

До недавнего времени развитие систем управления электроэнергетическими системами на базе цифровых технологий осуществлялось путем автоматизации технологических и бизнес-процессов. На базе доступных цифровых технологий процедуры, поддающиеся алгоритмизации, постепенно переводились на цифровые устройства, которые автоматизированно (с участием оператора), а там, где это возможно, и автоматически (без участия оператора) управляли оборудованием в соответствии с заданными алгоритмами и параметрами работы отдельных энергообъектов и систем в целом. Для вертикально организованной системы — от крупных генерирующих объектов до потребителей — такой подход полностью обеспечивал эффективное и надежное управление режимами, а также работу механизмов рынка электроэнергии.

Экологические и экономические вызовы современного мира стали причиной создания и внедрения новых технологических решений, прежде всего, в распределительной части электроэнергетических систем — возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ), имеющих слабо регулируемый характер генерации и широкий диапазон мощностей, накопителей электроэнергии (НЭЭ) различного назначения, устройств силовой электроники для активного управления потоками мощности в сетях переменного тока и построения сегментов распределительных сетей, работающих на постоянном токе. Эти и других устройства все шире и шире распространяются по всему полю распределительных электросетей. Более того, упомянутые решения привели к образованию на базе таких устройств нового класса участников энергосистемы и рынка электроэнергии — про-сьюмеров, которые в различные

моменты времени способны как потреблять электрическую энергию, так и генерировать ее с выдачей в сеть. В результате электрическая сеть стала все больше превращаться в мультиагентную систему, потоки энергии в которой могут быть направлены в любых направлениях — вниз, как и раньше, а также вверх и/или по горизонтали, т. е. между равноправными участниками любого уровня этой сети. Такие изменения в технологической части энергосистемы неизбежно влекут за собой изменения бизнес-процессов и механизмов рынка электроэнергии. Как следствие, сложность системы многократно возрастает, и в ней классические решения по автоматизации оказываются как минимум не эффективными.

Ответом на сложившуюся во многих странах классическую революционную ситуацию, когда технологическая часть не может работать



«Умные Сети для Умных Городов» — это ближайшее будущее электроэнергетики

ЭВОЛЮЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ОДНОЙ ИЗ ТЕХНОЛОГИЙ I_oE — ЦПС В ООО НПП «ЭКРА»



Рис. 1

ИЗ НАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНИЦИАТИВЫ «ЭНЕРДЖИНЕТ»

Электроэнергетические системы, построенные по традиционной, централизованной архитектуре, к настоящему моменту практически полностью исчерпали свой ресурс эффективности. На них оказывают существенное давление новые вызовы времени: быстрое изменение характера спроса потребителей, рост издержек и снижение собственной экономической эффективности, энергетический переход, необходимость эффективной электрификации и освоения новых территорий. Эти вызовы в различных сочетаниях стоят перед электроэнергетиками разных стран по всему миру, а проблема исчерпания ресурса эффективности централизованной энергетики является всеобщей. Для ответа на эти вызовы требуется новая архитектура электроэнергетических систем — архитектура Интернета энергии.

Интернет энергии — архитектура распределенной энергетики, отвечающая этим требованиям. Это такая децентрализованная электроэнергетическая система, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее пользователями.

Энергетика для «цифрового» общества — экологически чистое энергоснабжение с высоким и дифференцированным качеством. Решающую роль на ближайшем шаге развития электроэнергетики будет играть распределенная энергетика.

по-старому, а система управления не может управлять по-новому, стало активно ведущееся во всем мире формирование на базе существующих энергосистем новых интернето-подобных, но не информационных, а киберфизических систем, интегрирующих на базе цифровых технологий технологическую, управляющую, рыночную подсистемы, а также всех участников энергосистемы — бизнес всех видов, потребителей и просьюмеров. Основные принципы формирования такой киберфизической системы в РФ изложены в Концепции ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030» [1].

Эта Концепция определяет опережающее разрешение такой революционной ситуации в процессе ее вызревания в энергетике РФ эволюционным путем, поскольку преобразование традиционной электросети в киберфизическую систему должно быть проведено с непрерывным обеспечением сохранения технологического единства, наблюдаемости и управляемости сети независимо от замены и/или модернизации существующего оборудования и интеграции новых цифровых технологий обработки информации и Industry 4.0 с первичным и вторичным оборудованием электросетевых объектов.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом ведется большой объем работ по формированию и отработке отдельных решений для новых энергетических киберфизических систем [2, 3 и др.]. Однако сборка такой энергосистемы как «системы систем» из отдельных частей — сложный процесс, результат которого может оказаться неоптимальным. Причиной этого является множество противоречащих друг другу показателей оптимальности каждой отдельной системы, одновременное достижение которых очень сложно, а чаще всего просто невозможно. Поэтому системный подход к по-

строению одной большой системы на базе компонентов, функционирующих в рамках общих критериев оптимальности системы, представляется более правильным с точки зрения достижения общесистемного, а не локального оптимума [4]. В статье рассматривается один из возможных вариантов конкретизации такого системного подхода, использующего хорошо согласующийся с эволюционным подходом к развитию и подтверждающий его эффективность опыт ООО НПП «ЭКРА» по разработке и внедрению технических решений для цифровой электроэнергетики, в частности — цифровых подстанций (ЦПС) (рис. 1 на с. 37). Рассматриваемый вариант базируется на положениях Концепции ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030» [1] и ориентирован на сохранение технологического единства энергосистемы с одновременным улучшением ее наблюдаемости и управляемости на основе:

- применения универсальных гибких масштабируемых технических решений, позволяющих реализовать самоподобность сети на всех уровнях технологического процесса — от приема электроэнергии от всех имеющихся в энергосистеме источников до распределения ее по конечным потребителям;
- использования открытых стандартов и протоколов, обеспечивающих применение решений различных поставщиков;
- учета регуляторных ограничений или формирования и согласования предложений по изменению этих ограничений.

За основу предлагается принять широко распространенную в мире трехмерную модель «умной сети» (Smart Grid Architecture Model, SGAM) [5]. Среди пяти вертикальных слоев этой модели первым является уровень физических устройств,

ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА (ОРГАНИЗАЦИЯ IоE НА ОСНОВЕ «АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕРНЕТА ЭНЕРГИИ» [3])



Рис. 2

а оставшиеся четыре охватывают информационные и функциональные решения. При этом уровень физических устройств охватывает как собственно технологические элементы энергосистемы, так и цифровую инфраструктуру, на базе которой функционируют решения других уровней.

В настоящее время в энергосистеме РФ только начинаются процессы формирования просьюмеров, распространения систем распределенной генерации (РГ), особенно в массовой зоне средних и небольших мощностей, не относящихся к зоне оперативно-диспетчерского управления (ОДУ), но способных при одновременной нескоординированной работе внести существенные возмущения в электрические режимы с негативными последствиями для эффективной и надежной работы энергосистемы. Именно

то, что внедрение таких новых решений на уровне физических устройств только началось, создает «окно возможностей» для эволюционной трансформации российской энергетики из текущего состояния в киберфизическую систему на базе промышленного интернета (IIoT), являющегося основой межмашинного автоматического взаимодействия устройств и систем (M2M), а также платформ для участия в процессах операторов или потребителей электроэнергии (H2M и H2H). С учетом специфики области применения такой IIoT называют Интернетом энергии (IoE), для функционирования которого на уровне физических устройств необходимы условиями являются:

- наличие технических решений, комплексов и устройств, которые позволяют реализовывать необходимые функции управления

сеть (цифровые подстанции, реклоузеры и другие средства автоматического восстановления работы сети, управляемые нагрузкой потребителей и т. д.);

- наличие информационно-коммуникационной инфраструктуры (ИКТ) — сетей связи, центров хранения и обработки данных и другого оборудования, доступной для всех участников энергосистемы вплоть до отдельных розничных потребителей и провайдеров новых сервисов;
- наличие у всех участников энергосистемы интерфейсов для интеграции в данную ИКТ, обеспечивающих физическую и информационную совместимость этих участников и ИКТ с учетом формирования четырех верхних уровней SGAM [5]:

1. коммуникационного, определяющего протоколы и механизмы обмена данными;

- информационного, определяющего модели данных, информацию и ее использование участниками энергосистемы;
- функционального, определяющего необходимые функции и сервисы системы независимо от ее физической реализации;
- бизнес-уровня, определяющего бизнес-цели, бизнес-модели, выбор которых является отдельным большим вопросом, выходящим за рамки настоящей статьи (см., например, [6]) и учитывающего регуляторные ограничения.

«Окно возможностей», о котором шла выше речь, как раз и позволяет опережающими темпами обеспечить эти условия и создать базу для плавного, а не скачкообразного формирования IoE (рис. 2 на с. 39). При этом будет решена одна из важнейших задач — обеспечение наблюдаемости и управляемости в объеме всей энергосистемы. Сегодня задача обеспечения наблюдаемости и управляемости в достаточно полном объеме уже решена в магистральных сетях высокого и сверхвысокого напряжения и в значительной мере — в распределительных сетях высокого напряжения. Но ее полное решение невозможно без обеспечения наблюдаемости и управляемости в сетях среднего (СН) и низкого (НН) напряжения. Поэтому модернизация сетей СН и НН — одна из важнейших составляющих первого этапа цифровой трансформации энергосистемы. Начавшийся сейчас в энергосистемах РФ процесс формирования цифровых районов распределительных электрических сетей как нельзя лучше направлен на решение данной задачи.

На этом же этапе должна быть в целом завершена необходимая для формирования бизнес-уровня SGAM и ведущаяся в настоящее время в РФ разработка нормативно-правовых актов и норматив-

но-технической документации, которые должны обеспечить надлежащее регулирование происходящих изменений в технологиях, электросетевом бизнесе и на рынке электроэнергии, но при этом не стать препятствием для внедрения новых цифровых технологий и решений на их основе. На последующих этапах наиболее желательным является сопровождение и корректирующее развитие указанных документов, если, конечно, в них не будут найдены неустраиваемые недостатки, требующие радикальной ревизии всего задаваемого ими вектора преобразований энергосистемы.

Одновременно с полной цифровизацией уровня физических устройств электроэнергетической системы, данный уровень безусловно будет наполняться новыми устройствами и технологическими решениями. Это позволит уже на стадии завершения первого этапа обсуждаемого эволюционного процесса плавно перейти ко второму этапу — непосредственному формированию инфраструктуры IoE с учетом принятых направлений формирования верхних уровней SGAM, что подразумевает:

- формирование и автономную отладку сегментов IoE — просьюмеров, мини-грид, микро-грид, т. е. автономных энергетических комплексов (АЭК) и т. п.;
- интеграцию в рамках сегментов IoE внедренных в сеть новых устройств и технологических решений;
- внедрение новых «интеллектуальных» функций в традиционные системы автоматического и автоматизированного управления и автономная отладка их работы в рамках сегментов IoE.

Предлагаемую структуру АЭК рассмотрим на примере АЭК НН (рис. 3). Внутри такого АЭК будут функционировать все системы IoE [3]:

- система режимного управления на базе виртуальной электрической шины — фидеров низкого напряжения и различных сетевых устройств (NG);
- система межмашинного взаимодействия между энергетическим оборудованием участников АЭК на базе ПТК агрегатора (IoT);
- система формирования, контроля исполнения и оплаты смарт-контрактов как между участниками АЭК, так и с внешней сетью (TE).

Экономически целесообразно в качестве источников информации о состоянии и режимах работы сети использовать интеллектуальные счетчики электроэнергии, которые в таком случае являются не только основой системы интеллектуального учета электроэнергии, но для пассивных потребителей одновременно выполняют функцию аппаратного интерфейса подключения к информационной инфраструктуре АЭК, в том числе для реализации функции нормального и противоаварийного управления нагрузкой. Также через интеллектуальные счетчики на отходящих от АЭК фидерах осуществляется контроль взаимодействия АЭК с питающими трансформаторными подстанциями (счетчики 1.1 и 1.2) и другими АЭК НН (счетчики 2.1 и 2.к). В отличие от пассивных активные потребители, имеющие в своем составе только НЭЭ, и просьюмеры, имеющие в своем составе как НЭЭ, так и средства генерации — ВИЭ, имеют встроенные интерфейсы на базе интеллектуальных счетчиков [3].

Внутри АЭК все участники энергетически и экономически взаимодействуют на основании согласованных правил, а для «внешнего мира» АЭК является единым комплексом, подчиняющимся нормам и правилам этого мира. Таким образом сочетается максимально возможная степень свободы для потребите-

АЭК НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ

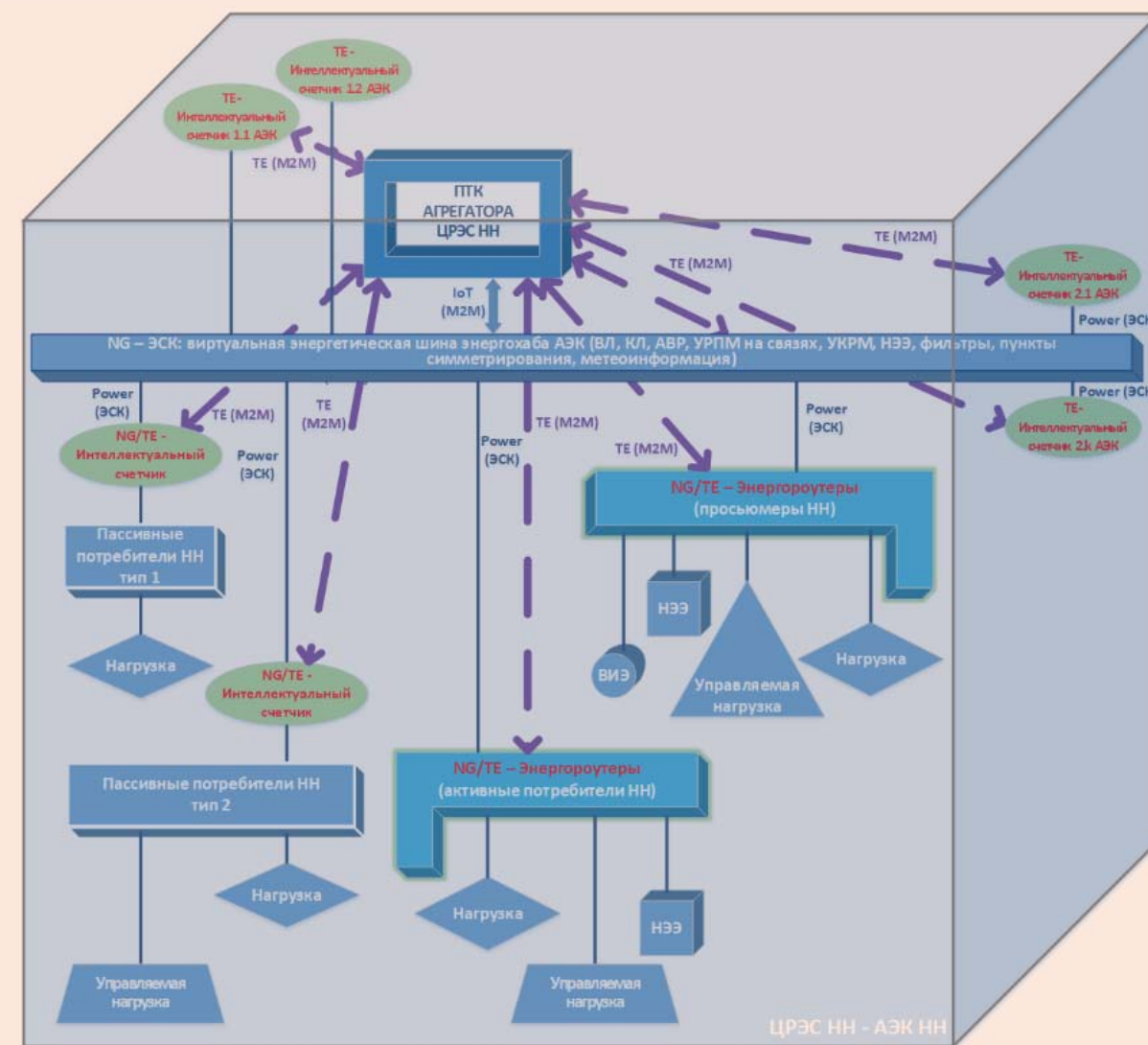


Рис. 3

лей АЭК с ограничениями, которые могут возникнуть при необходимости обеспечения надежного функционирования энергосистемы в целом.

Аналогичным образом формируются сегменты IoE на уровне СН, который начинается с распределительных устройств центров питания — цифровых подстанций высокого напряжения. Единствен-

ным отличием является то, что здесь происходит разделение функций ОДУ, традиционно выполняемых на базе диспетчерских пунктов (ДП) районов электросетей (РЭС), и функционала управления в рамках IoE (рис. 4 на с. 42). Технологическое единство сети обеспечивается здесь единственностью ДП, имеющим приоритет в управлении АЭК СН перед агрегаторами, которых может

быть несколько. Пассивные и активные потребители и просьюмеры НН, не захотевшие участвовать в одном из АЭК НН, управляются напрямую от ДП АЭК СН через соответствующие трансформаторные подстанции СН/НН. Однако целесообразно в рамках нормативно-правовой базы предусмотреть стимулы участия в АЭК НН для участников, имеющих мощность ниже заданной

границы. Это важно для того, чтобы минимальная мощность участников, не захотевших участвовать в АЭК НН, была ограничена на достаточно высоком уровне и не возникало высокой концентрации мелких участников АЭК СН.

Информация, формируемая в процессе функционирования АЭК, необходима не только в рамках АЭК. Эта информация используется корпоративными системами электросетевых предприятий, как это предусмотрено Концепцией ПАО «Россети» [1], а также системами рынка электроэнергии и сервисными приложениями IoE. Для общего хранения данных, согласно положениям этой

Концепции, наиболее целесообразным представляется использование доверенных Центров хранения и обработки данных (ЦХОД). Такие ЦХОД с учетом того, что они обслуживают объекты критической инфраструктуры, должны быть физически выделены в обособленную информационно-коммуникационную сеть (ИКС), имеющую ограниченное число строго контролируемых шлюзов для взаимодействия с внешними ИКС. Ситуационно-аналитические центры электросетевых предприятий [1], их корпоративные системы (управление активами, организация и управление работой на объектах, ведение оперативно-технологической документации и т. п.) и другие

доверенные пользователи получают доступ к хранящимся в ЦХОД данным. Обработка, использование этих данных и обмен ими выполняется в том числе с использованием технологии BigData и других ИКТ.

Такое широкое применение ИКТ в цифровой электрической сети на базе IoE выдвигает на первый план вопросы обеспечения информационной безопасности (ИБ), которым уделено значительное внимание в Концепции ПАО «Россети» [1]. При этом, несмотря на заметный прогресс в вопросах предотвращения киберинцидентов, ИБ цифровой энергетической системы имеет большую специфику

АЭК СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

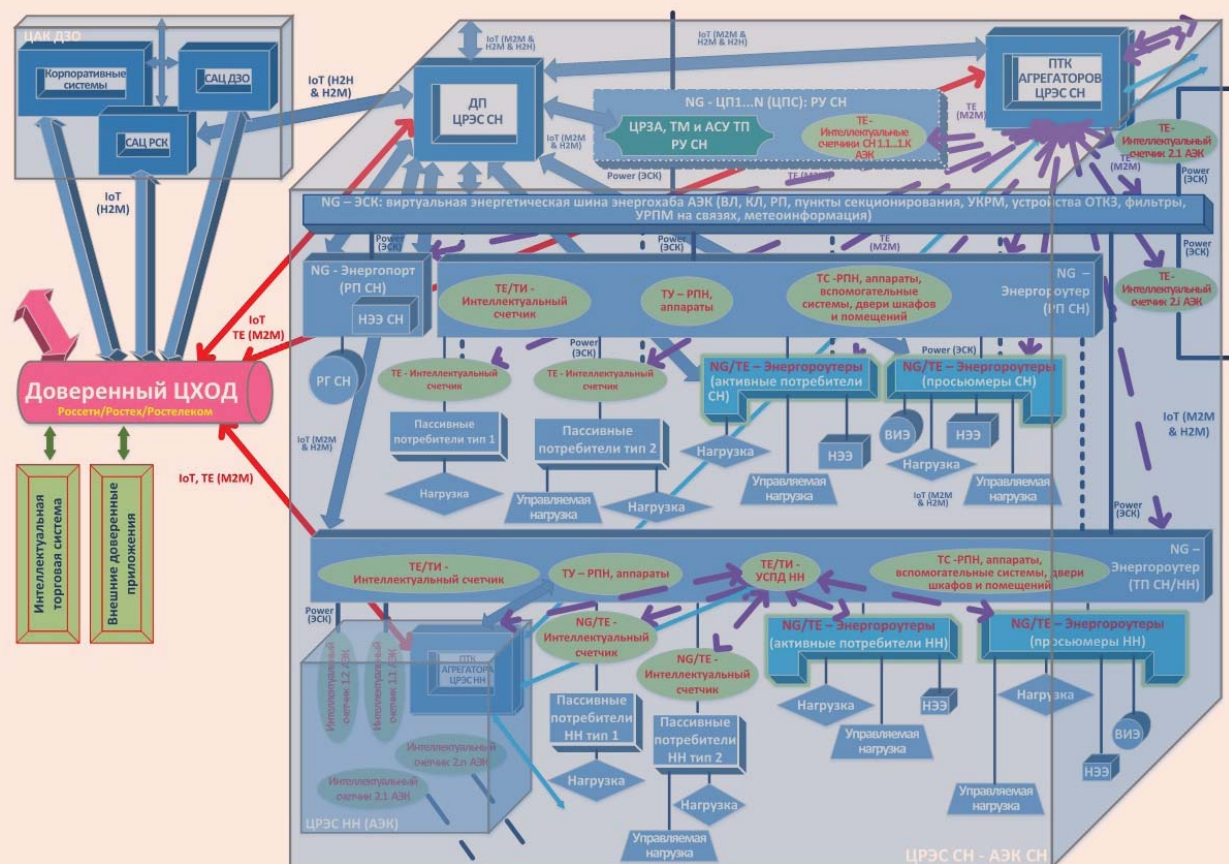


Рис. 4

по сравнению с ИБ классического IoT. Рассмотрению этой специфики посвящено большое количество работ [7, 8, 9 и др.]. Данный вопрос выходит за рамки настоящей статьи, но следует отметить, что ввиду мультиагентности системы необходимы как логические, так и физические средства обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности информации. В частности, именно поэтому целесообразно создание системы аккредитации не только аппаратных и программных средств, но и доверенных провайдеров сервисов IoE и их приложений.

На аналогичных принципах выстраивается весь уровень физических устройств цифровой электрической сети на базе IoE. При этом в магистральных сетях нет необходимости в агрегаторах, поскольку потребители, получающие питание от этих сетей, уже являются и объектами ОДУ, и участниками рынка электроэнергии. Такие потребители имеют свои диспетчерские пункты, фактически выполняющие функции агрегаторов в отношении отдельных нагрузок этих потребителей и их средств генерации. Также в сетях высокого и сверхвысокого напряжения увеличивается измерительная база, в первую очередь за счет развития систем WAMS.

В результате вдоль всего электросетевого комплекса на базе действующей электрической сети формируется самоподобная единая иерархическая инфраструктурная система, любой уровень детализации которой на уровне подсистем отличается только масштабом. Структура такой цифровой электрической сети на базе IoE приведена на рис. 5. Важной составляющей этой структуры является Системный оператор (СО) — ключевой элемент технологического единства и режимной надежности энергосистемы в целом.

Построением этой структуры и наполнением ее приложениями и сервисами завершается третий этап эволюционного процесса формирования цифровой электрической сети на базе IoE, объединяющей постоянно расширяющиеся свои интеллектуальные функции традиционные системы и новые средства IoE, в рамках которых будут функционировать цифровые платформы и технологии.

При этом выбор цифровых платформ для реализации предлагаемой структуры является критически важным вопросом, поскольку у владельцев платформ возникает возможность контроля за транзакциями в системе, наращивания влияния и получения нерыночных конкурентных преимуществ. Одним из решений здесь может быть построение национальных цифровых платформ и регулирование их деятельности в рамках специальных государственных программ с достижением баланса между интересами различных участников рынка электроэнергии, эффективным стимулированием развития и недопущением монополизации рынка технических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье вариант построения цифровой электрической сети на базе IoE, безусловно, не является единственным. При этом он предполагает использование решений достаточно универсального характера как в целом, так и в части применения конкурирующих между собой технологий и устройств различных производителей. Поэтому данные решения могут быть применены и при реализации других конфигураций цифровых электрических энергосистем. Предлагаемый вариант обеспечивает:

- иерархическое управление режими;

- интеграцию распределенной генерации;
- интеграцию потребителей;
- интеграцию и управление большими массивами данных;
- эффективное управление активами;
- мультиагентное взаимодействие на различных уровнях системы;
- организацию «умного учета» и системы расчетов за электроэнергию между всеми участниками рынка;
- интеграцию в будущем новых сервисов.

Такая универсализация структурного подхода уже используется специалистами ООО НПФ «ЭКРА» при разработке технических заданий на проектирование цифровых районов распределительных сетей по конкретным проектам наших заказчиков. Ключевой упор в этих технических заданиях делается именно на создание надежной и безопасной киберфизической системы, обеспечивающей на базе цифровых технологий надежную, безопасную и эффективно управляемую работу электрической сети. При этом предусматривается обмен необходимой информацией с решениями и сервисами, как определенными на этапе проектирования, так и появляющимися в дальнейшем и аккредитованными для работы в цифровых энергосистемах РФ. В результате наши заказчики получают решения, не ограничивающие дальнейшее развитие их электросетевых комплексов.

Обсуждение различных вариантов построения конфигураций цифровых электрических энергосистем должно быть продолжено, поскольку это способствует формированию у потенциальных участников процесса цифровой трансформации электросетевого комплекса общего понимания вектора и правил движения вперед, создает базу для обеспечения совместимости

СТРУКТУРА ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА БАЗЕ IoE

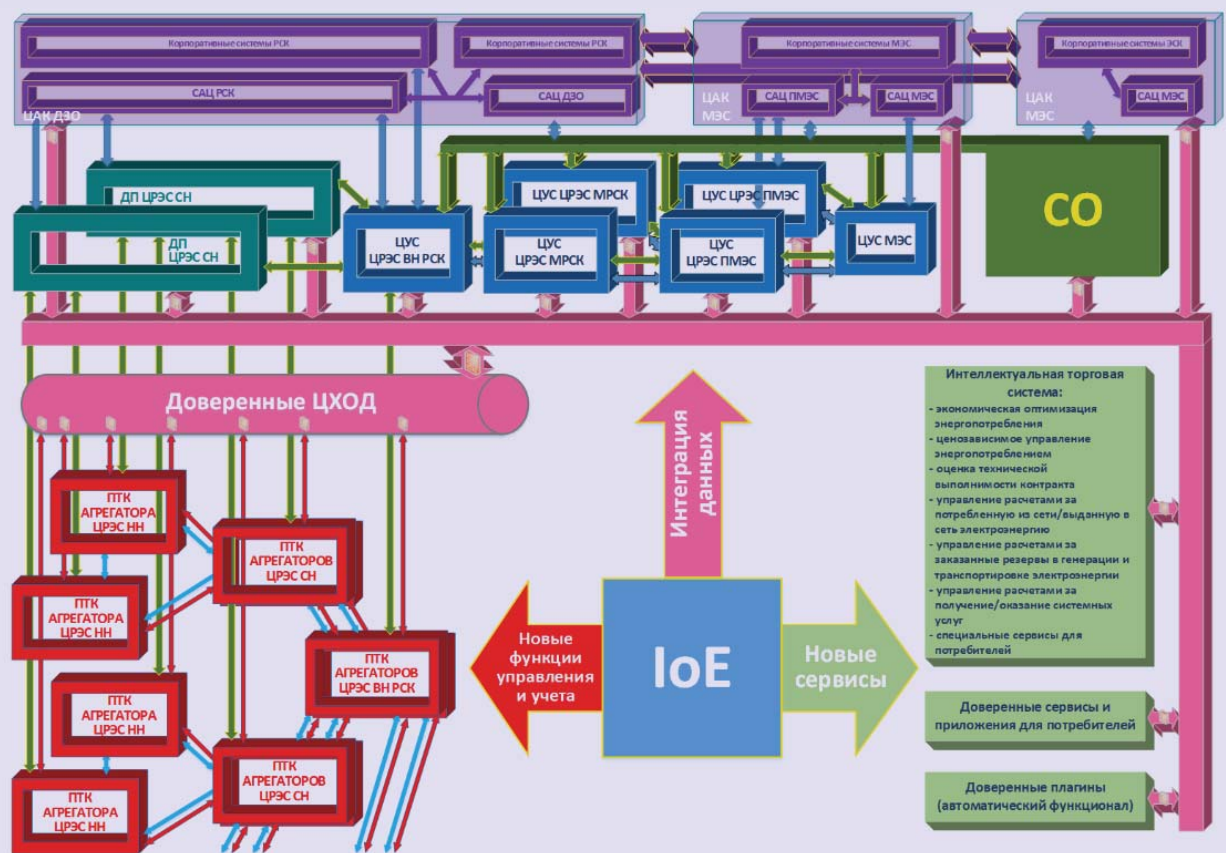


Рис. 5

их решений, максимально расширяет базу принятия решений по развитию электроэнергетического комплекса.

Интеграция технологий и данных в новой цифровой энергосистеме, повышение на этой основе интеллектуализации традиционных систем и применение базовых решений IoE позволяет обеспечить высокую эффективность и надежность работы этой системы с минимальными транзакционными издержками в интересах всех участников бизнес-процессов электросетевого комплекса. Основой развития на созданной инфраструктуре новых востребо-

ванных рынком доверенных сервисов и процессов IoE и дальнейшего совершенствования самой инфраструктуры будут принципы и правила функционирования цифровой энергосистемы и рынка электроэнергии, закрепленные в новой системе нормативно-правовых и нормативно-технических документов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция «Цифровая трансформация 2030». ПАО «Россети», 2018. 31 с.
2. Presentation of recent and ongoing R&I projects in the scope of the ETIP SNET. Part 1. Final. ETIP SNET, 2018. 103 с.

3. Архитектура Интернета энергии. Предварительная версия. Инфраструктурный центр EnergyNet, 2018. 57 с.
4. Taft J., Martini P. De. Ultra Large Scale Power System Control Architecture. A Strategic Framework for Integrating Advanced Grid Functionality. CISCO, 2012. 25 с.
5. Gottschalk M., Usler M., Delfs C. The Use Case and Smart Grid Architecture Model Approach. Springer, 2017. 93 с.
6. Understanding and Evaluating Potential Models for the Future Electric Power Utility. SEPA, 2019. 42 с.
7. GridWise Transactive Energy Framework. Version 1.0. GridWise. 2015. 56 с.
8. Fusheng L., Ruisheng L., Fengquan Z. Microgrid Technology and Engineering Application. China Electric Power Press, 2016. 184 с.
9. Borojoni K.G., Amini M.H., Iyengar S.S. Smart Grids: Security and Privacy Issues. Springer, 2017. 113 с.

ЭКРА

СОХРАНЯЯ ЭНЕРГИЮ

ООО НПП «ЭКРА». 428020, г. Чебоксары, пр. И.Я. Яковлева, 3.
Тел./факс: (8352) 22-01-10, 22-01-30. www.ekra.ru, e-mail: ekra@ekra.ru

