

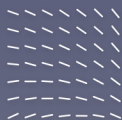
Архитектура Интернета энергии IDEA

Версия 2.0

Transactive
energy

Internet
of things

Neural
grid



Энерджинет

Национальная
технологическая
инициатива

I Δ E A
БИБЛИОТЕКА

Инфраструктурный центр «Энерджинет»

АРХИТЕКТУРА ИНТЕРНЕТА ЭНЕРГИИ (IDEA)

Версия 2.0

Москва – 2021

Под редакцией

Дмитрия Холкина

Директора Инфраструктурного центра «Энерджинет»

Авторский коллектив

Дмитрий Холкин

Директор Инфраструктурного центра «Энерджинет»

Игорь Чаусов

Руководитель аналитического направления Инфраструктурного центра «Энерджинет»

Илья Бурдин

Ведущий эксперт Инфраструктурного центра «Энерджинет»

Алена Рыбушкина

Заместитель директора Инфраструктурного центра «Энерджинет»

В разработке архитектуры Интернета энергии и демонстрационного комплекса Интернета энергии принимали участие Центр компетенций НТИ «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» (Центр НТИ МЭИ), компании АО «РТСофт», ООО «Элиот» (стартап ØNDER) и ООО «Интеллектуальные электроэнергетические системы», а также специалисты Института арктических технологий МФТИ, Сколковского института науки и техники, НГТУ.

Оглавление

Основные положения Архитектуры IDEA	5
Введение	8
Потребность в новой архитектуре энергосистем	10
Новая архитектура для распределенной энергетики	10
Драйверы перехода к новой архитектуре.....	12
Проблема интеграции распределенной энергетики.....	16
Концептуальная модель	18
Сценарии использования	25
Основные сценарии использования.....	25
Вспомогательные сценарии использования	29
Необходимые свойства Интернета энергии.....	29
Архитектурный фреймворк	31
Границы применимости архитектуры.....	33
Энергетическая ячейка.....	33
Программный агент энергетической ячейки.....	36
Система Transactive Energy (TE)	37
Система Internet of Things (IoT)	39
Система Neural Grid (NG).....	41
Присоединение энергетических ячеек	44
Топология электрических сетей в Интернете энергии	45
Информационная безопасность	48
Демонстрационный комплекс — реализация Интернета энергии	49
Приложения сервисов.....	51
Модульная реализация цифровых агентов энергетических ячеек.....	52
Модули системы TE	52
Модули системы IoT.....	53
Модули системы NG	55
Топология электрической сети.....	56
Реализация энергетических транзакций	56
Пилотирование, верификация, стандартизация	59

Пилотные проекты.....	59
Верификация и стандартизация.....	64
Варианты реализации архитектуры IDEA.....	66
Промышленный микрогрид.....	66
Автоматическое управление спросом (Advanced Demand Response).....	68
Заключение	71
Список источников.....	72
Список рисунков	73
Список таблиц.....	74

Основные положения Архитектуры IDEA

1. Интернет энергии (Internet of Distributed Energy – IDEA) – кибер-физическая инфраструктура децентрализованного интеллектуального управления энергосистемами и бесшовной (plug & play) интеграции в них распределенных активных потребителей, источников энергии и гибкости.

2. Архитектура Интернета энергии нацелена на снятие следующих типов издержек, возникающих при интеграции объектов распределенной энергетики в энергосистемы:

- Транзакционные издержки;
- Издержки информационной интеграции;
- Издержки интеграции силового оборудования в сети.

3. Децентрализованное интеллектуальное управление энергосистемами в Интернете энергии осуществляется посредством энергетических транзакций. Энергетическая транзакция – это взаимодействие между двумя пользователями Интернета энергии и их активами, при котором происходит передача мощности через сеть как результат контракта в транзакционной системе и межмашинного взаимодействия оборудования пользователей.

4. В Интернете энергии предусмотрены два типа энергетических транзакций, являющихся основными use case архитектуры Интернета энергии:

- Одноранговая, или peer-to-peer (P2P) энергетическая транзакция между двумя энергетическими ячейками;
- Смешанная, или peer-to-operator (P2O) энергетическая транзакция между энергетической ячейкой и оператором некоторого сервиса Интернета энергии.

5. Одним из участников (сторон) энергетических транзакций и структурной единицей энергосистемы, управляемой посредством Интернета энергии, является энергетическая ячейка. Энергетическая ячейка – это такая совокупность энергетического оборудования (генераторов, накопителей, электроприемников), которая присоединена к распределительным электрическим сетям, имеет единый интерфейс подключения к Интернету энергии и выступает единым актором в рамках энергетических транзакций с другими энергетическими ячейками и сервисами Интернета энергии. Другим типом участника энергетической транзакции является оператор сервиса Интернета энергии.

6. Каждая энергетическая ячейка снабжается программным агентом, посредством которого осуществляется представление энергетической ячейки в Интернете энергии, согласованное управление взаимодействием энергетической ячейки со всеми системами Интернета энергии, ее участие в сервисах Интернета энергии, диспетчеризация этого участия в целях исключения конфликта сервисов за ресурсы энергетической ячейки, взаимодействие энергетической ячейки с другими энергетическими ячейками через их программных агентов, обмен данными с локальной автоматикой оборудования энергетической ячейки или ее локальной системой управления, выдача управляющих сигналов и команд на эту локальную автоматику оборудования энергетической ячейки или ее локальную систему управления.

7. Для обеспечения интероперабельности во взаимодействии между энергетическими ячейками, их программными агентами и для осуществления энергетических транзакций в составе Интернета энергии работают три системы:

— **Transactive Energy (TE)** – система осуществления коммерческой составляющей энергетических транзакций, в которой происходит полностью автоматическое формирование и защищенное хранение смарт-контрактов, фиксирующих параметры энергетических транзакций, верификация их исполнения, финансовый расчет по исполненным обязательствам, фиксация расхождений и споров, использование данных для их разрешения и исполнение клиринговых функций. Система, в частности, реализует функцию meter-to-cash – полностью роботизированного электроэнергетического биллинга и процессинга.

— **Internet of Things (IoT)** – система осуществления информационной составляющей энергетических транзакций, в которой происходит межмашинное (M2M) взаимодействие и обмен всеми необходимыми для энергетических транзакций информационно-управляющими сигналами между энергетическими ячейками и их программными агентами, доступ программных агентов к локальной автоматике оборудования и/или локальным системам управления энергетических ячеек, а также формирование, хранение и предоставление цифровых двойников и цифровых теней энергетических ячеек и их оборудования, работы вспомогательного программного обеспечения для межмашинного взаимодействия.

— **Neural Grid (NG)** – система осуществления физической (электроэнергетической) составляющей энергетических транзакций,

которая при необходимости обеспечивает децентрализованное регулирование частоты и баланса мощности, управление перетоками мощности в энергосистеме в целях формирования необходимого для реализации энергетических трансакций режима электропередачи и поддержания его статической и динамической устойчивости в условиях одновременной реализации множества энергетических трансакций. Система обеспечивает функции адаптивной релейной защиты и автоматики – технологических защит энергетических ячеек и электрической сети в условиях двунаправленных перетоков мощности, обусловленных энергетическими трансакциями, а также интеграцию некоторых видов энергетических ячеек с электрическими сетями (присоединение к электрическим сетям).

Введение

Архитектура Интернета энергии (IDEA) была разработана, чтобы удовлетворить потребность стремительно развивающейся распределенной энергетики и новых бизнес-практик, связанных с этой энергетикой, в новом подходе к построению энергосистем и управлению ими.

Разработка архитектуры Интернета энергии (IDEA) велась в рамках одноименного проекта Энерджинет Национальной технологической инициативы. Первая, предварительная версия архитектурного описания была опубликована в декабре 2018 года [1]. За прошедшие с тех пор два года командой проекта был проделан немалый путь. Инфраструктурным центром «Энерджинет» был проведен большой объем теоретической работы и консультаций с российскими и зарубежными энергетиками (в том числе из IEEE и CIGRE), вместе с партнерами создан демонстрационный комплекс (натурная модель) реализации архитектуры, располагающийся в Московском физико-техническом институте (МФТИ), и запущен модельный комплекс реального времени (testbed) в Московском энергетическом институте (МЭИ) для проверки соответствия технологических решений требованиям архитектуры Интернета энергии. Помимо этого, в рамках проекта и силами его партнеров были созданы прототипы ряда новых технологических продуктов, используемых в Интернете энергии: энергетического роутера (ООО «Интеллектуальные электроэнергетические системы») и энергетического хаба (ООО «Инженерный центр Энергоразвитие»), транзакционной платформы ØNDER (ООО «Элиот»), ведется разработка инструментальной А-платформы для распределенной энергетики (АО «РТСофт»). Консорциумом в составе команды проекта, Института арктических технологий МФТИ, ООО «Элиот» (стартап ØNDER) и АО «РТСофт» было подписано соглашение с Наньянским технологическим университетом, в рамках которого запущен пилотный проект реализации элементов архитектуры IDEA в Сингапуре на полигоне REIDS (о. Семакау). Кроме того, совместно с Институтом арктических технологий МФТИ был запущен проект ANHEAD по созданию международной арктической станции «Снежинка», реализующий многие положения архитектуры IDEA.

Вся эта работа позволила детально развить предварительную версию архитектурного описания, переосмыслить и уточнить многие ее положения, дополнить их новыми идеями. По сравнению с предварительной версией архитектурный фреймворк пополнился представлением о цифровых, или программных агентах энергетических ячеек, вариантами построения системы регулирования перетоков мощности и поддержания надежности Neural

Grid, уточнилось понимание взаимосвязей между компонентами Интернета энергии, а в самом архитектурном описании появилось детальное представление о варианте модульной реализации архитектуры IDEA на примере демонстрационного комплекса.

Следующий шаг в развитии архитектуры IDEA должен быть сделан за счет ее полноценной реализации в пилотных проектах новых энергетических сообществ, микрогридов, энергетических сервисов, например, по управлению спросом, энергоузлов и энергосистем.

Мы приглашаем все заинтересованные организации энергетической отрасли к совместной реализации архитектуры IDEA на ваших объектах и в рамках ваших проектов.

Кроме того, необходимы передовые исследования и разработки новых технологий, позволяющие реализовать архитектуру IDEA, и воплощающие на практике ее ключевые компоненты. Мы приглашаем научные организации и технологические компании к партнерству в развитии архитектуры IDEA и разработке продуктов на ее основе.

На сайте проекта idea-go.tech, а также на сайте Энерджинет НТИ energynet.ru вы можете ознакомиться с положениями архитектуры Интернета энергии, статусом проекта и партнерскими проектами, реализуемыми в экосистеме Энерджинет НТИ.

Потребность в новой архитектуре энергосистем

Новая архитектура для распределенной энергетики

Необходимость разработки новой архитектуры энергосистем определяется тем, что эффективное развитие энергетики в рамках главенствующей парадигмы централизованных энергосистем оказывается более невозможным. Централизованная архитектура энергетики исчерпала свои возможности по удовлетворению требований и запросов потребителей и обеспечению роста эффективности энергосистем.

Быстрое развитие и массовое внедрение решений распределенной энергетики строится на альтернативной парадигме, предлагающей близость генерации к потребителю, локализацию энергетических балансов, изменение ролей потребителей и появление в энергосистемах новых типов субъектов, сочетающих свойства генераторов и потребителей, – просьюмеров. С точки зрения удовлетворения желаний потребителей и обеспечения экономической эффективности энергоснабжения распределенная энергетика, особенно при верном сочетании с традиционной, часто оказывается более эффективной, чем централизованное электроснабжение. Так, в докладе «Активные энергетические комплексы – первый шаг к промышленным микрогридам в России» показано, что такое решение распределенной энергетики, как промышленные микрогриды, снижает расходы потребителей в них на величину от 5% до 25% по сравнению с потреблением энергии исключительно из централизованной сети [2].

На Рисунке 1 представлено сравнение принципов построения централизованных и децентрализованных энергосистем (в подходе Интернета энергии). Централизованная энергосистема предполагает, что электроэнергия вырабатывается на крупных генерирующих мощностях – электростанциях единичной мощности в сотни и тысячи мегаватт – и далее однонаправленно передается через магистральные и затем распределительные электрические сети до потребителей как крупных, так и распределенных мелких. Информация – в данном случае о потреблении – при этом движется в обратную сторону от потребителей через сети и сбытовые компании к централизованной диспетчерской системе управления и крупным генераторам.

Распределенная энергетика в своем предельном варианте представляет собой энергосистему, в которой реализован двунаправленный переток электроэнергии между электрическими сетями и их абонентами. Эти абоненты в общем случае могут быть просьюмерами, то есть в зависимости от обстоятельств как производить и выдавать в сеть, так и принимать из сети и потреблять электроэнергию. Кроме того, в децентрализованной энергосистеме присутствуют распределенная генерация и потребители, в том числе обладающие возможностью управлять своим потреблением. Между всеми этими субъектами поддерживается свободный энергообмен, обеспечиваемый энергетической инфраструктурой, и двусторонний обмен информацией, необходимый для энергообмена и взаимной торговли, осуществляемой на тех или иных рыночных площадках.

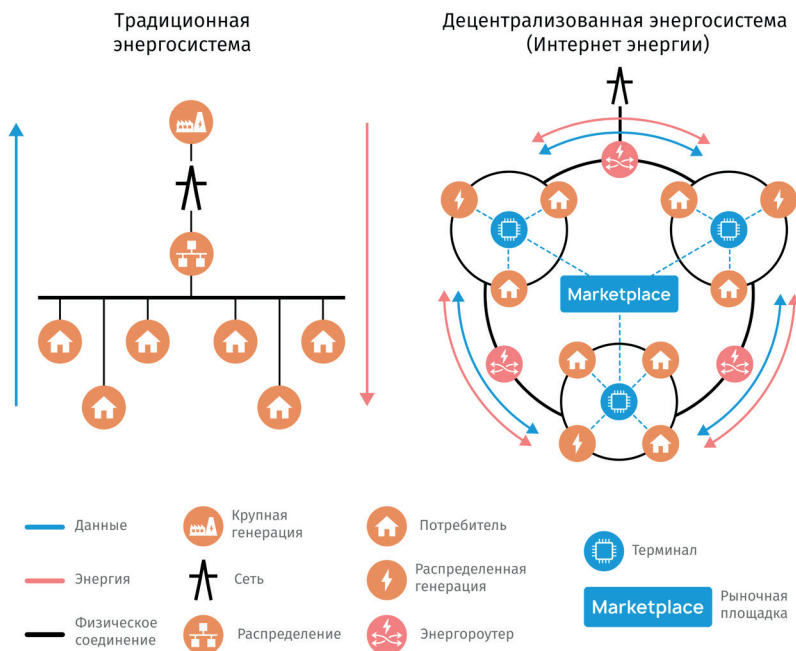


Рисунок 1. Сравнение принципов построения централизованной и децентрализованной энергосистем

Но реализация распределенной энергетики с использованием централизованной архитектуры энергосистем оказывается неэффективной: возникают существенные проблемы и издержки при интеграции распреде-

ленной энергетики в централизованные энергосистемы, зачастую при этом снижается системная надежность энергосистемы, а потенциал распределенной энергетики не удается раскрыть в полной мере. В итоге это приводит к появлению различных административных и технологических барьеров во взаимодействии распределенной и централизованной энергетик. Распределенная энергетика и централизованная архитектура больших энергосистем конфликтуют друг с другом.

С другой стороны, электроэнергетику неверно развивать по принципу полной автономизации и автаркии, когда каждый потребитель владеет своей собственной генерацией, обеспечивающей только его нужды в энергоснабжении. Простой анализ показывает, что в этом случае имеющиеся мощности используются с более низкими КИУМ, а расходы на электроснабжение при том же уровне надежности, которые обеспечивает сетевая электроэнергетика, возрастают в 3 раза и более. Автономизация имеет смысл исключительно на удаленных от сетей централизованной энергетике, изолированных и труднодоступных территориях, но и там целесообразным является создание локальных энергосистем, а не самообеспечение каждого потребителя по отдельности.

В итоге, распределенную энергетику, имеющую огромный экономический потенциал, оказывается невозможным эффективно развивать без новой, подходящей для нее архитектуры, которая предложила бы децентрализованной подход к построению энергосистем и управлению ими.

Драйверы перехода к новой архитектуре

Изменение характера спроса потребителей электроэнергии

Характер спроса на электрическую энергию и запросы ее потребителей в мире за последние 10 – 15 лет существенным образом изменились. Во-первых, эти запросы дифференцировались. Рост значимости климатической повестки и глобальная борьба с изменением климата, приведшая к принятию Парижского соглашения и различных национальных и региональных программ и планов по его реализации, сделали важнейшей характеристикой электроэнергии величину ее углеродного следа. Для массы потребителей в Европе, США, Канаде, Японии, Австралии и многих других странах оказывается важным то, насколько «зеленую» электроэнергию они получают, и эта

характеристика становится важнее цены на энергию, что подтверждается как введением соответствующего национального регулирования, так и ростом популярности «зеленых» тарифов. Для других потребителей, напротив, наиболее существенное значение имеют расходы на электроснабжение. Это ощутимо как в индустриальных, так в аграрных развивающихся экономиках, особенно – в тех, где процесс электрификации еще не завершен в полной мере. Наконец, появился новый тип потребителей, получивший условное название «цифрового спроса», для которых определяющим является качество электроэнергии (в основном, постоянство уровня напряжения) и надежность электроснабжения (величины CAIDI и CAIFI). Как правило, такие потребители связаны с вычислительной техникой (дата-центры), прецизионными промышленными процессами и аддитивными технологиями. Рост требований к качеству и надежности электроснабжения со стороны «цифрового» спроса предсказывался RAND Corporation еще 20 лет назад [3] и сегодня подтверждается исследователями из Ланкастерского университета, которые предсказывают темпы роста электропотребления цифровыми устройствами и ICT-инфраструктурой на уровне 7% в год и показывают, что в Великобритании и Нидерландах пиковое потребление по часам совпадает с пиками использования цифровой техники и ресурсов Интернета [4].

Таким образом, появление перечисленных групп спроса на электроэнергию с качественно разными требованиями к ней должно приводить к кастомизации предложения на энергетическом рынке. Но традиционная электроэнергетика и составляющие ее основу централизованные энергосистемы не предполагают возможности такой кастомизации, они обеспечивают поставку стандартизированной и одинаковой для всех потребителей электроэнергии и практически не позволяют потребителям влиять на такие ее характеристики, как качество или происхождение.

Во-вторых, за счет роста энергоэффективности как в развитых, так и во многих индустриальных развивающихся экономиках практически прекратился рост электропотребления, но растет удельное число потребляющих электроустановок в расчете на одного потребителя. Например, в Великобритании с 1972 по 2017 годы темпы роста ВВП увеличились с 1% до более, чем 3%, тогда как прирост электропотребления весь этот период находился на уровне 1% в год, а с 2008 года планомерно падает до значений, меньших 0,8% [5] Появление таких новых типов энергопринимающих устройств, как электромобили и мобильные роботы, изменило сам характер спроса в электроэнергетике: при незначительном росте спроса на электроэнергию резко растет спрос на мощность, в частности, необходимую для зарядных станций. Так, по оценкам

McKinsey & Company, суточная неравномерность потребления электроэнергии домохозяйствами (пиковое потребление) при массовом распространении электромобилей вырастет на 30% по сравнению с сегодняшним уровнем [6]. Это означает, что рыночная ценность мощности, подведенной к потребителю, будет расти намного быстрее ценности электроэнергии. При традиционной, централизованной архитектуре энергосистем это приводит к росту издержек на строительство и содержание соответствующих генерирующих и сетевых мощностей при снижении эффективности из использования, в частности, снижении КИУМ и загрузки инфраструктуры. Рост этих издержек неизбежно влечет рост стоимости электроснабжения для конечных потребителей.

Более того, централизованная электроэнергетика к настоящему моменту достигла предела своей эффективности. Это справедливо как в плане технологического совершенствования, выражающегося в росте КПД генерации, снижении удельного расхода топлива, снижении потерь при передаче электроэнергии и улучшении других технических параметров, так и в плане улучшения экономики энергетики, выражающейся в таких показателях, как приведенная стоимость электроэнергии на жизненном цикле (LCOE) крупной генерации и совокупные затраты потребителей на электроснабжение. Эффект масштаба, при котором рост единичной мощности электростанции приводил к снижению удельных затрат на выработку электроэнергии, перестал быть значимым фактором еще в начале 1990 годов [7]. Сами эти удельные затраты у традиционных типов генерации практически не снижаются уже более десятилетия. Возможность снижения технологических потерь в сетях также практически исчерпана. При этом издержки конечных потребителей электроэнергии на энергоснабжение в централизованных энергосистемах растут несмотря на то, что стоимость топлива может снижаться, причем иногда – во время резких падений цен на нефть – снижаться существенно. Например, согласно анализу Ассоциации «НП Сообщество потребителей электроэнергии», в России в 2019 году средняя цена на электроэнергию для промышленных предприятий выросла на 2,7% в долларовом выражении при том, что курс рубля к доллару за это время снизился, а без учета курсовой разницы рост цены составил 6% и в 2 раза превысил среднегодовую инфляцию [8].

Одновременно меняются возможности самих потребителей по отношению к энергосистеме. Появление цифровых технологий позволяет потребителям эффективно управлять своими нагрузками и передавать удаленное управление этими нагрузками другим субъектам. Это означает появление «активных потребителей», влияющих на балансы в энергосистемах за счет регулирования своего потребления. Другим значимым фактором измене-

ния роли потребителей в энергосистемах в последнее время становится распространение систем накопления электроэнергии, технологии которых дешевеют, а сами накопители оказываются доступными для потребителей. Накопители обеспечивают потребителям гибкость в отношении к потреблению из сети вплоть до возможности временно не потреблять и даже выдавать электроэнергию обратно в сеть. Наконец, удешевление малой распределенной генерации, как газовой, так и основанной на использовании ВИЭ, в том числе микрогенерации, делает потребителей одновременно генераторами, которые могут за счет этого также и снижать потребление электроэнергии из сети, и выдавать излишки электроэнергии в сеть. Понятно, что потребители хотели бы реализовать эти новые возможности в своих интересах, но архитектура централизованной энергетики не позволяет этого сделать из-за того, что не предполагает ни двунаправленных перетоков энергии, ни такой роли, как просьюмер.

Таким образом, традиционная энергетика больше не может обеспечить потребителей электроэнергией с теми качественными характеристиками и по той стоимости, которые этим потребителям нужны, и дать им те возможности по участию в работе энергосистем, которые они хотели бы получить.

Энергетический переход

Важным драйвером перехода к новой архитектуре энергетики является энергетический переход. Процесс энергетического перехода (energy transaction), как известно, определяется тремя составляющими, так называемыми, 3D:

1. Декарбонизацией (переходом к углеродно-нейтральной энергетике);
2. Децентрализацией (переходом к распределенной энергетике);
3. Диджитализацией (переходом к цифровым технологиям в энергетике).

При этом декарбонизация, связанная в первую очередь с использованием ВИЭ, приводит к децентрализации энергетики, поскольку многие типы ВИЭ, такие как солнечные электростанции и в ряде случаев ветровые электростанции не требуют концентрации их мощностей в одном месте. В их случае не работает эффект масштаба: от концентрации мощностей удельная стоимость их электроэнергии не снижается, а значит при их распределенном размещении вблизи потребителей появляется возможность снизить сетевые издержки на транспорт электроэнергии до этих потребителей.

Но интеграция ВИЭ, как сосредоточенных, так и распределенных, в энергосистемы оборачивается существенными проблемами. Эти проблемы

возникают в связи со сложным диспетчерским управлением энергосистемами с большой долей ВИЭ, при которой в силу стохастического характера выработки электроэнергии на базе ВИЭ возрастают требования к регулированию частоты и баланса мощности и требования к соответствующим мощностям. Кроме того, интеграция распределенных ВИЭ усложняет вопросы реализации релейной защиты и автоматики в распределительных сетях. Рост доли так называемой «электронной» генерации, то есть генерации, присоединенной к электрическим сетям через инверторы, также приводит к нежелательным последствиям для управляемости энергосистем и устойчивости режимов электропередачи в них.

Без новой архитектуры построения энергосистем дальнейший существенный рост доли ВИЭ в них оказывается практически невозможен. Более того, рост этой доли приводит к снижению системной надежности централизованных энергосистем. Например, одной из причин известного блэкаута в Великобритании, произошедшего 9 августа 2019 года, был недоучет распределенной генерации, присоединенной к сетям низкого напряжения, и влияния ее отключения от системы при отключении соответствующих фидеров на баланс мощности в системе [9]. По утверждению директора Центра интеграции энергетических систем Университета Ньюкасла профессора Фила Тейлора, сделанного им на Сингапурской энергетической неделе в ноябре 2019 года, аварийное отключение ряда линий низкого и среднего напряжения вместо того, чтобы разгрузить систему, привело к выпадению мощности, обеспечиваемой муниципальными ВИЭ, из системы и дальнейшему развитию аварийной ситуации.

Цифровизация энергетики, напротив, открывает технологические возможности для реализации распределенной энергетики в рамках нового архитектурного подхода, поскольку обеспечивает возможность необходимых для этого информационных потоков и определяет необходимую для этого плотность цифровых управляемых устройств, в том числе на стороне потребителей, в частности, цифровой учет электроэнергии и удаленный доступ к электроустановкам потребителей.

Проблема интеграции распределенной энергетики

Как видно из приведенного анализа, реализация распределенной энергетики в парадигме централизованных энергосистем и ее интеграция в эти энергосистемы приводит к очевидным проблемам и неустранимым колли-

зиями и конфликтам новых энергетических практик и старой, традиционной архитектуры энергетики. Эти проблемы можно обобщить в виде трех типов издержек, к росту которых приводят попытки интеграции распределенной энергетики в современные энергосистемы:

- 1. Транзакционные издержки**, растущие по мере роста числа активных участников работы энергосистемы, в частности, числа участников энергообмена;
- 2. Издержки информационной интеграции**, связанные с необходимостью включения большого числа участников работы распределенной энергетики в контуры управления и информационные каналы обмена данными и командами;
- 3. Издержки интеграции силового оборудования в сети**, связанные со сложностью обеспечения надежности работы сетей, а также статической и динамической устойчивости режимов передачи электроэнергии при большом числе участников энергообмена, в том числе присоединенных к сетям через инверторы.

Архитектура Интернета энергии (IDEA) призвана снять указанные издержки и решить проблему интеграции объектов распределенной энергетики в энергосистемы и построения полностью распределенных энергосистем.

Концептуальная модель

Интернет энергии – кибер-физическая инфраструктура для информационных систем децентрализованного интеллектуального (роботизированного) управления энергосистемами, энергоузлами, системами электроснабжения и интеграции в них распределенных активных потребителей электрической энергии, распределенных источников энергии и энергетической гибкости.

Децентрализованное интеллектуальное управление энергосистемой в Интернете энергии осуществляется посредством **энергетических транзакций**, проводимых в рамках **сервисов** Интернета энергии. На Рисунке 2 показана концептуальная модель Интернета энергии, демонстрирующая процесс осуществления энергетической транзакции.

Энергетическая транзакция – совокупность операций взаимодействия пользователей Интернета энергии и их электроустановок между собой, а также с операторами сервисами, при котором происходит управляемое оплачиваемое изменение параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности электроустановками сторон энергетической транзакции, за счет которого одна сторона энергетической транзакции получает полезное качество, экономическую ценность, связанную с работой энергосистемы, энергоузла, системы электроснабжения, другая сторона энергетической транзакции получает оплату.

Участником (стороной) энергетических транзакций и структурной единицей энергосистемы, управляемой посредством Интернета энергии, является **энергетическая ячейка**. Энергетическая ячейка – это такая совокупность энергетического оборудования (генераторов, накопителей, электроприемников), которая присоединена к распределительным электрическим сетям, имеет единый **интерфейс** подключения к Интернету энергии и выступает единым актором в рамках энергетических транзакций с другими энергетическими ячейками и сервисами Интернета энергии.

Каждая энергетическая ячейка снабжается **программным агентом**, посредством которого осуществляется представление энергетической ячейки в Интернете энергии, согласованное управление взаимодействием энергетической ячейки со всеми системами Интернета энергии, ее участие в сервисах Интернета энергии, диспетчеризация этого участия в целях исключения конфликта сервисов за ресурсы энергетической ячейки, взаимодействие энергетической ячейки с другими энергетическими ячейками через их программных агентов, обмен данными с локальной автоматикой оборудования

энергетической ячейки или ее локальной системой управления, выдача управляющих сигналов и команд на эту локальную автоматику оборудования энергетической ячейки или ее локальную систему управления. Каждой энергетической ячейке соответствует один программный агент.

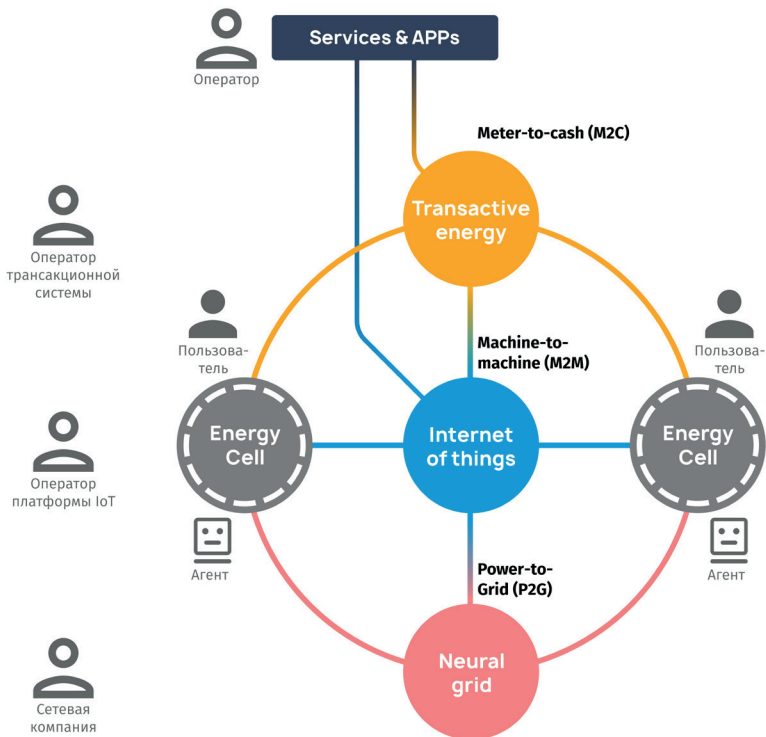


Рисунок 2. Концептуальная модель Интернета энергии

Пользователями Интернета энергии являются владельцы энергетических ячеек и поставщики (операторы) сервисов Интернета энергии. Владельцы энергетических ячеек – это любые физические и юридические лица, владеющие электроэнергетическим оборудованием (электроприемниками, генераторами или накопителями электроэнергии) и в силу этого выступающие субъектами электроэнергетической отрасли. В их число входят владельцы распределенной генерации, систем накопления электроэнергии и потребители электроэнергии, присоединенные к распределительным электриче-

ским сетям. Одному пользователю Интернета энергии может принадлежать множество энергетических ячеек, и в его интересах может, соответственно, работать множество программных агентов. Взаимодействие пользователей с программными агентами осуществляется посредством пользовательских интерфейсов этих агентов или приложений специальных сервисов.

Сервисы Интернета энергии – это энергетические практики экономического и технического взаимодействия субъектов электроэнергетической отрасли, реализуемые в Интернете энергии посредством энергетических транзакций. Энергетические транзакции выступают минимальными актами осуществления сервисов Интернета энергии, их строительными блоками, а сервисы Интернета энергии – наборами сценариев и правил взаимодействия программных агентов при осуществлении энергетических транзакций. Сервисы Интернета энергии обеспечивают воспроизводимую возможность формирования полезных экономических эффектов от новых энергетических практик. Программное обеспечение, технически реализующее сервисы в Интернете энергии, и взаимодействующие с программными агентами и пользователями Интернета энергии, называется **приложениями сервисов**.

Энергетические транзакции между энергетическими ячейками осуществляются посредством взаимодействия программных агентов этих энергетических ячеек с приложениями сервисов Интернета энергии и между собой. Программные агенты реализуют сценарии и правила, заложенные в приложения сервисов, и в соответствии с ними формируют и исполняют договоренности с другими агентами и/или операторами сервисов. Одновременно одна энергетическая ячейка может участвовать в нескольких различных энергетических сервисах. При этом программный агент осуществляет диспетчеризацию участия энергетической ячейки в сервисах, направленную на исключение конфликтов сервисов за ресурсы (возможности оборудования) ячейки с учетом ее окружения и места в топологии сети, а также приоритизацию участия ячейки в сервисах в соответствии с настройками пользователя – владельца ячейки. Программные агенты не осуществляют оптимизацию и/или диспетчеризацию работы оборудования энергетической ячейки, только передавая на локальную автоматику и/или систему управления этим оборудованием сигналы и команды, исполнение которых обеспечит выполнение обязательств в рамках актуальных энергетических транзакций. Задача оптимизации и/или диспетчеризации работы совокупности оборудования энергетической ячейки возложена на соответствующие приложения сервисов.

Основными предметами энергетических транзакций – рыночными

ценностями (полезными свойствами) в Интернете энергии, которые можно рассматривать в качестве первичных базовых активов транзакционной энергетики в Интернете энергии, – выступают:

1. **Электроэнергия** – электрическая энергия как товар, производимая энергетическими ячейками и поставляемая потребителям с измеримыми объемами поставки и характеристиками качества;
2. **Мощность** – готовность энергетических ячеек обеспечить заданный уровень активной и/или реактивной мощности своего энергетического оборудования при заданных условиях;
3. **Гибкость** – динамическое влияние энергетических ячеек на баланс электроэнергии и активной и/или реактивной мощности в энергосистеме, а также на параметры режима электропередачи, осуществляемое по запросу или при заданных условиях, обеспечиваемое маневренностью и регулируемыми воздействиями энергетического оборудования энергетических ячеек и поставляемое как услуга или товар.

В Интернете энергии предусмотрены два типа энергетических транзакций, отличающихся их участниками, и являющихся основными use case архитектуры Интернета энергии:

1. **Peer-to-peer (P2P) энергетическая транзакция** осуществляется между двумя энергетическими ячейками, предполагает согласованное и синхронизированное во времени изменение параметров генерации и потребления мощности этими ячейками. Приложение соответствующего сервиса выступает в peer-to-peer транзакции электронной площадкой и набором правил и алгоритмов взаимодействия программных агентов энергетических ячеек.
2. **Peer-to-operator (P2O) энергетическая транзакция** осуществляется между энергетической ячейкой и оператором сервиса Интернета энергии, выступающим в этом случае поставщиком услуги этой энергетической ячейке или агрегатором услуг, которые энергетические ячейки оказывают в интересах субъектов энергосистемы, не входящих в Интернет энергии (крупная генерация, сетевые компании, системный оператор, другие субъекты централизованной энергосистемы). Оператор сервиса выступает в случае peer-to-operator энергетической транзакции посредником между централизованной энергосистемой и Интернетом энергии. Приложение сервиса взаимодействует с программным агентом энергетической

ячейки в целях формирования и осуществления энергетической трансакции.

Энергетические ячейки и их программные агенты формируют mesh-сеть с высокой интероперабельностью узлов, в которой принципиально разрешенными являются энергетические трансакции между любыми энергетическими ячейками, в том числе существенно разных по масштабу мощности, а также с любыми операторами сервисов. Интернет энергии обеспечивает учет и реализацию необходимых условий исполнения этих трансакций, в том числе формирует необходимые физические перетоки мощности, которые приводят к исполнению всего сформированного пула трансакций.

Для обеспечения интероперабельности во взаимодействии между энергетическими ячейками, их программными агентами и приложениями сервисов, а также для осуществления энергетических трансакций как основной формы этих интероперабельных взаимодействий в составе Интернета энергии работают три системы:

- 1. Transactive Energy (TE)** – система осуществления коммерческой составляющей энергетических трансакций, в которой происходит полностью автоматическое формирование и защищенное хранение смарт-контрактов, фиксирующих параметры энергетических трансакций, верификация их исполнения, финансовый расчет по исполненным обязательствам, фиксация расхождений и споров, использование данных для их разрешения и исполнение клиринговых функций. Система реализует функцию meter-to-cash – полностью роботизированный электроэнергетический биллинг и процессинг.
- 2. Internet of Things (IoT)** – система осуществления информационной составляющей энергетических трансакций, в которой происходит межмашинное (M2M) взаимодействие и обмен всеми необходимыми для энергетических трансакций информационно-управляющими сигналами между энергетическими ячейками и их программными агентами, доступ программных агентов к локальной автоматике оборудования и/или локальным системам управления энергетических ячеек, а также формирование, хранение и предоставление цифровых двойников и цифровых теней энергетических ячеек и их оборудования, работа вспомогательного программного обеспечения для межмашинного взаимодействия.
- 3. Neural Grid (NG)** – система осуществления физической (электроэнергетической) составляющей энергетических трансакций, которая при необходимости обеспечивает децентрализованное регулирование

частоты и баланса мощности, управление перетоками мощности в энергосистеме в целях формирования необходимого для реализации энергетических транзакций режима электропередачи и поддержания его статической и динамической устойчивости в условиях одновременной реализации множества энергетических транзакций. Система обеспечивает функции адаптивной релейной защиты и автоматики – технологических защит энергетических ячеек и электрической сети в условиях двунаправленных перетоков мощности, обусловленных энергетическими транзакциями, а также интеграцию некоторых видов энергетических ячеек с электрическими сетями (присоединение к электрическим сетям). В пределе реализации архитектуры Интернета энергии инфраструктура распределительных электрических сетей должна стать частью этой системы.

Наличие указанных трех систем обеспечивает возможность **бесшовного** подключения новых пользователей Интернета энергии и новых энергетических ячеек по принципу **plug & play** и их интероперабельность во взаимодействии друг с другом и с приложениями сервисов. Это означает, что после подключения к Интернету энергии для каждой новой энергетической ячейки автоматически открывается доступ ко всем приложениям сервисов Интернета энергии и возможности осуществлять энергетические транзакции.

Программные агенты энергетических ячеек используют приложения сервисов для формирования параметров энергетических транзакций, систему **Transactive Energy** для формирования соответствующих смарт-контрактов, верификации их исполнения с использованием данных с учетно-измерительных устройств, передающих данные в системе Internet of Things, и осуществления финансовых расчетов по ним для завершения транзакций. Доступ программных агентов к локальной автоматике и/или системам управления оборудованием энергетических ячеек осуществляется при помощи системы **Internet of Things**. Активное управление перетоками мощности в соответствии с пулом одновременно осуществляемых энергетических транзакций, формирование необходимого для их осуществления режима электропередачи, поддержание статической и динамической устойчивости этого режима и обеспечение функций технологической защиты во время осуществления энергетических транзакций выполняется системой **Neural Grid**. Для этого оборудование системы Neural Grid, осуществляющее управление перетоками мощности в энергосистеме, снабжено верхнеуровневыми системами управления, взаимодействующими посредством системы Internet

of Things с программными агентами энергетических ячеек и приложениями сервисов. Это оборудование получает данные о плановых параметрах генерации и потребления мощности энергетическими ячейками согласно пулу актуальных энергетических трансакций, формирует сводные значения необходимых перетоков мощности для исполнения энергетических трансакций и обеспечивает фактическое исполнение энергетических трансакций за счет управления перетоками мощности.

Функционирование перечисленных систем может быть построено независимо друг от друга, и системы могут быть реализованы по отдельности. При этом они будут исполнять лишь часть функций Интернета энергии, и для реализации будут доступны только ограниченный набор и функционал сервисов Интернета энергии и соответствующих энергетических трансакций. Интернет энергии, таким образом, представляет собой систему систем.

Сценарии использования

Основной сценарий использования Интернета энергии сводится к осуществлению энергетических транзакций. Информационные системы, использующие Интернет энергии, реализуют децентрализованное интеллектуальное (роботизированное) управление за счет осуществления энергетических транзакций.

Энергетическая транзакция – совокупность операций взаимодействия пользователей Интернета энергии и их энергетических ячеек между собой, а также с операторами сервисов, при котором происходит управляемое оплачиваемое изменение параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности электроустановками сторон энергетической транзакции, за счет которого одна сторона энергетической транзакции получает полезное качество, экономическую ценность, связанную с работой энергосистемы, энергоузла, системы электроснабжения, другая сторона энергетической транзакции получает оплату.

Основные сценарии использования

Интернет энергии должен обеспечивать реализацию двух основных вариантов использования:

1. одноранговая энергетическая транзакция типа P2P (peer-to-peer);
2. смешанная энергетическая транзакция типа P2O (peer-to-operator).

Одноранговая энергетическая транзакция (peer-to-peer)

Одноранговая энергетическая транзакция типа «peer-to-peer» (P2P) осуществляется между двумя энергетическими ячейками при следующих условиях:

1. обе энергетические ячейки, участвующие в энергетической транзакции, подключены к Интернету энергии;
2. приложение сервиса, в рамках которого осуществляется энергетическая транзакция, размещено в Интернете энергии;
3. обе энергетические ячейки, участвующие в энергетической транзакции, подписаны на сервис, в рамках которого осуществляется энергетическая транзакция.

Одноранговая энергетическая транзакция типа «peer-to-peer» (P2P) осуществляется по следующему сценарию:

1. один из программных агентов энергетической ячейки инициирует взаимодействие с другим программным агентом энергетической ячейки и приложением сервиса, направляя сообщения с запросом на энергетическую транзакцию согласно порядку и форме, предусмотренным сервисом;
2. другой программный агент энергетической ячейки, получивший запрос на энергетическую транзакцию, отвечает на него согласно порядку и форме, предусмотренным сервисом;
3. программные агенты энергетических ячеек проводят взаимодействие, которое выражается в обмене сообщениями согласно порядку и форме, предусмотренным сервисом, и по результатам которого формируются параметры договорных отношений (смарт-контрактов);
4. программные агенты энергетических ячеек осуществляют фиксацию договорных параметров энергетической транзакции;
5. программные агенты энергетических ячеек формируют и передают системе управления энергетической ячейкой или системе управления электроустановкой энергетической ячейки команды на изменение параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности, запускающие исполнение энергетической транзакции;
6. за счет изменения параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности происходит фактическое осуществление энергетической транзакции;
7. при осуществлении энергетической транзакции должна обеспечиваться статическая и динамическая устойчивость режима передачи электроэнергии, сохранение параметров качества электрической энергии в сети;
8. программные агенты энергетических ячеек при помощи измерительного оборудования осуществляют фиксацию фактического значения перетока активной и/или реактивной мощности;
9. программные агенты энергетических ячеек на основе фактического значения перетока активной и/или реактивной мощности осуществляют мониторинг исполнения энергетической транзакции, формируют и передают системе управления энергетической ячейкой

или системе управления электроустановкой энергетической ячейки команды на изменение параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности, завершающие исполнение энергетической трансакции;

10. программные агенты энергетических ячеек согласно параметрам энергетической трансакции осуществляют оплату исполнения энергетической трансакции на основании данных о фактическом значении перетока активно и/или реактивной мощности.

Смешанная энергетическая трансакция (peer-to-operator)

Смешанная энергетическая трансакция типа «peer-to-operator» (P2O) осуществляется между энергетической ячейкой и оператором сервиса при следующих условиях:

1. энергетическая ячейка, участвующая в энергетической трансакции, подключена к Интернету энергии;
2. приложение сервиса, в рамках которого осуществляется энергетическая трансакция, размещено в Интернете энергии;
3. энергетическая ячейка, участвующая в энергетической трансакции, подписана на сервис, в рамках которого осуществляется энергетическая трансакция.

Смешанная энергетическая трансакция типа «peer-to-operator» (P2O) осуществляется по следующему сценарию:

1. программный агент энергетической ячейки или приложение сервиса инициирует взаимодействие, направляя сообщения с запросом на энергетическую трансакцию согласно порядку и форме, предусмотренным сервисом;
2. программный агент энергетической ячейки или приложение сервиса, получивший запрос на энергетическую трансакцию, отвечает на него согласно порядку и форме, предусмотренным сервисом;
3. программный агент энергетической ячейки проводит взаимодействие с приложением сервиса, которое выражается в обмене сообщениями согласно порядку и форме, предусмотренным сервисом, и по результатам которого формируются параметры договорных отношений (сма-контрактов);
4. программный агент энергетической ячейки и приложение сервиса

- осуществляют фиксацию договорных параметров энергетической трансакции;
5. программный агент энергетической ячейки формирует и передает системе управления энергетической ячейкой или системе управления электроустановкой энергетической ячейки команды на изменение параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности, запускающие исполнение энергетической трансакции;
 6. за счет изменения параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности происходит фактическое осуществление энергетической трансакции;
 7. при осуществлении энергетической трансакции должна обеспечиваться статическая и динамическая устойчивость режима передачи электроэнергии, сохранение параметров качества электрической энергии в сети;
 8. программный агент энергетической ячейки и приложение сервиса при помощи измерительного оборудования осуществляют фиксацию фактического значения перетока активной и/или реактивной мощности;
 9. программный агент энергетической ячейки на основе фактического значения перетока активной и/или реактивной мощности осуществляет мониторинг исполнения энергетической трансакции, формирует и передает системе управления энергетической ячейкой или системе управления электроустановкой энергетической ячейки команды на изменение параметров производства или потребления активной и/или реактивной мощности, завершающие исполнение энергетической трансакции;
 10. программный агент энергетической ячейки и приложение сервиса согласно параметрам энергетической трансакции осуществляют оплату исполнения энергетической трансакции на основании данных о фактическом значении перетока активной и/или реактивной мощности.

Вспомогательные сценарии использования

Интернет энергии должен обеспечивать реализацию следующих вспомогательных вариантов использования:

1. подключение энергетической ячейки;
2. размещение приложения сервиса;
3. настройка программного агента энергетической ячейки;
4. осуществление подписки на сервис;
5. изменение состава электроустановок энергетической ячейки;
6. смена пользователя энергетической ячейки;
7. обновление приложения сервиса;
8. прекращение подписки на сервис;
9. отключение энергетической ячейки.

На основе указанных основных и вспомогательных сценариев использования Интернета энергии может быть сформировано большое разнообразие вариантов взаимодействия энергетических ячеек между собой и с операторами сервисов, то есть реализовано большое разнообразие различных сервисов и соответствующих приложений со своими сценариями, для которых сценарии использования IDEA будут выступать строительными блоками.

Необходимые свойства Интернета энергии

Для того чтобы эффективно реализовывать указанные сценарии использования, Интернет энергии должен обладать следующими свойствами:

1. интероперабельность;
2. масштабируемость;
3. открытость;
4. надежность.

Интероперабельность в Интернете энергии должна быть обеспечена в двух смыслах:

— интероперабельность приложений сервисов с программными агентами энергетических ячеек и системами Интернета энергии;

— интероперабельность систем управления энергетических ячеек, систем управления электроустановками энергетических ячеек с программными агентами энергетических ячеек.

Масштабируемость Интернета энергии должна быть обеспечена за счет автоматизированного присоединения энергетических ячеек и электроустановок энергетических ячеек к Интернету энергии с реализацией принципа автоматического появления полного доступа к функциям системы после присоединения (plug & play).

Открытость Интернета энергии должна быть обеспечена в двух смыслах:

— открытость Интернета энергии для сторонних разработчиков приложений сервисов и программного обеспечения, обеспечивающая легкость разработки и размещения приложений сервисов в Интернете энергии;

— открытость Интернета энергии для пользователей энергетических ячеек, облегчающая пользователю подключение и работу с Интернетом энергии.

Свойство надежности электроснабжения в Интернете энергии должно быть обеспечено за счет сохранения статической и динамической устойчивости режима передачи электроэнергии в условиях одновременного осуществления большого числа энергетических транзакций.

Архитектурный фреймворк

Основная архитектурная схема Интернета энергии показана на Рисунке 3. Она раскрывает компонентный состав Интернета энергии и взаимосвязи компонент и систем Интернета энергии между собой и с внешним окружением, состав которого описан в разделе «Концептуальная модель».

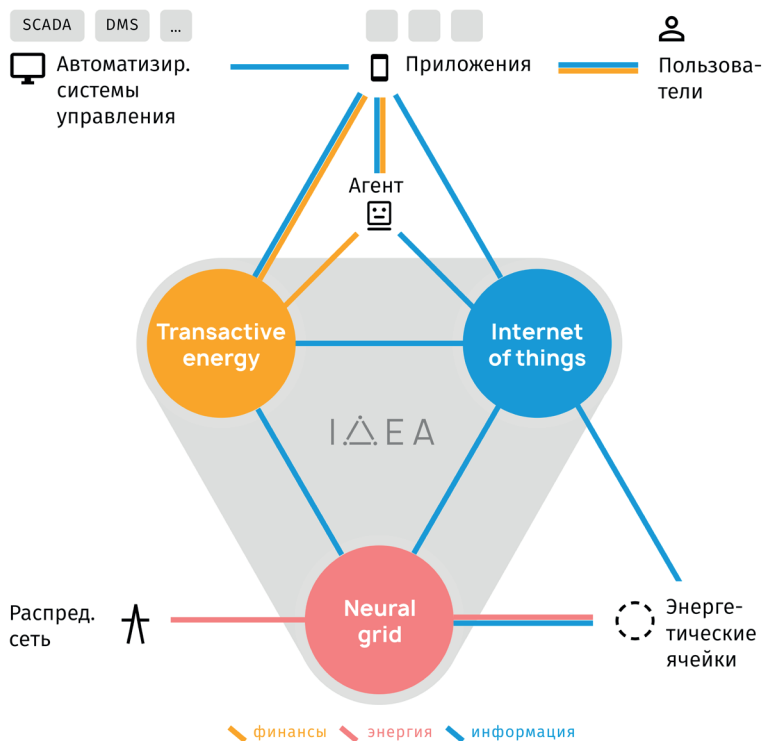


Рисунок 3. Схематическое представление архитектуры Интернета энергии (IDEA)

В состав Интернета энергии должны входить мультиагентная система программных агентов энергетических ячеек и следующие три системы Интернета энергии:

1. транзакционная система Transactive Energy (TE);
2. система межмашинного взаимодействия Internet of Things (IoT);

3. система распределенного регулирования частоты и баланса мощности Neural Grid (NG).

Программные агенты энергетических ячеек должны иметь информационные связи с системами TE и IoT. Программные агенты энергетических ячеек должны иметь информационную связь для обмена финансово-договорными данными («финансовую» связь) с системой TE. Программные агенты энергетических ячеек должны иметь информационную связь и связь для обмена финансово-договорными данными с приложениями сервисов. Приложения сервисов должны иметь информационную и «финансовую» связи с программными агентами энергетических ячеек и системой TE. Пользователи энергетических ячеек и операторы сервисов должны иметь информационную и «финансовую» связи с приложениями сервисов и программными агентами энергетических ячеек посредством приложений сервисов типа пользовательских интерфейсов. Автоматизированные системы управления и информационные системы централизованной энергетики должны иметь информационную связь с Интернетом энергии посредством приложений сервисов.

Программные агенты энергетических ячеек должны использовать систему TE для формирования цифровых контрактов, верификации их исполнения с использованием данных со счетчиков электрической энергии и мощности и осуществления финансовых расчетов по ним. Доступ программных агентов энергетических ячеек к системам управления энергетической ячейки и/или системы управления электроустановками должен осуществляться при помощи системы IoT. Управление перетоками мощности в соответствии с совокупностью одновременно осуществляемых энергетических транзакций, формирование необходимого для их осуществления режима электропередачи, поддержание статической и устойчивости этого режима, обеспечение функций технологической защиты во время осуществления энергетических транзакций должно выполняться системой NG. Для этого компоненты системы NG, осуществляющие управление перетоками мощности в энергосистеме, должны быть связанными посредством системы IoT с программными агентами энергетических ячеек и приложениями сервисов и получать от них данные о договорных параметрах производства и потребления мощности энергетическими ячейками в рамках актуальных энергетических транзакций. Компоненты NG должны формировать сводные значения необходимых перетоков мощности для исполнения этих энергетических транзакций.

Границы применимости архитектуры

Сферой применимости референтной архитектуры Интернета энергии выступает только распределенная энергетика и потребители, присоединенные к распределительным электрическим сетям. В соответствии с этим предел применимости референтной архитектуры Интернета энергии проходит по границе распределительных и магистральных сетей в энергосистемах на уровне 110 кВ.

Энергетическая ячейка

Энергетическая ячейка является минимальной структурной единицей энергосистемы, управление которой осуществляется на основе Интернета энергии.

С точки зрения Интернета энергии, энергетическая ячейка не имеет внутренней сложности. Это означает, что для программного агента энергетической ячейки, программных агентов других энергетических ячеек и сервисов Интернета энергии данная энергетическая ячейка является участвующим в энергетических транзакциях «черным ящиком», который обладает способностью выдавать и/или потреблять электрическую мощность, принимать, отправлять и обрабатывать информационные сигналы, и за счет этих возможностей обменивается с другими энергетическими ячейками и приложениями сервисов электроэнергией и/или данными, в том числе электронными платежными средствами. Внутренняя сложность энергетической ячейки для других ячеек и приложений сервисов снимается системами Интернета энергии.

Энергетические ячейки в зависимости от своих возможностей по выдаче и/или потреблению электрической мощности и способности к регулированию этих процессов могут принадлежать к одному из шести типов, перечисленных в Таблице 1. Типологическая принадлежность энергетической ячейки при этом определяется ролями, которые энергетическая ячейка может играть в Интернете энергии.

Таблица 1. Типология энергетических ячеек

Возможности по выдаче и/или потреблению электрической мощности	Возможность гибкого регулирования величины перетока (выдачи и/или потребления) электрической мощности	
	Присутствует	Отсутствует
Только выдача электрической мощности	Маневренный генератор Примеры: Мини-ТЭЦ, дизель-генератор.	Стохастический, или переменный генератор Примеры: Солнечная электростанция, ветрогенератор.
И выдача, и потребление электрической мощности	Просьюмер Примеры: Офисное здание с крышными солнечными панелями и накопителями электроэнергии, система накопления электроэнергии.	Потребитель с переменной собственной генерацией Примеры: Таунхаус, здание цеха промышленного предприятия с крышными солнечными панелями.
Только потребление электрической мощности	Активный потребитель Примеры: Офисное здание с дистанционно управляемыми кондиционерами, «умный» термостат-водонагреватель.	Пассивный, или традиционный потребитель Примеры: Домохозяйство, индукционная печь металлургического завода.

Потребность энергетических ячеек в энергетических транзакциях друг с другом в значительной степени определяется тем, что эти энергетические ячейки принадлежат к различным типам, и в силу этого различным характером потребностей, возможностей и различным характером влияния на энергосистему и за счет этого друг на друга. В Таблице 2 приведена оценка возможных ролей энергетических ячеек в энергетических транзакциях, а значит — в Интернете энергии.

Таблица 2. Роли энергетических ячеек в энергетических транзакциях

Тип энергетической ячейки	Предмет энергетической транзакции					
	Электроэнергия		Мощность		Гибкость	
	Продавец	Покупатель	Продавец	Покупатель	Продавец	Покупатель
Маневренный генератор	+	-	+	-	+	-
Стохастический генератор	+	-	+	+	-	+
Просьюмер	+	+	+	+	+	-
Потребитель с переменной собственной генерацией	+	+	-	+	-	+
Активный потребитель	-	+	+	+	+	-
Пассивный потребитель	-	+	-	+	-	+

Разнообразие ролей, которые могут играть энергетические ячейки различных типов в энергетических транзакциях, и их динамически меняющихся потребности и возможности формируют большое число возможных комбинаций энергетических ячеек, вступающих в энергетические транзакции для взаимовыгодного взаимодействия. Это, в свою очередь, порождает базу для разворачивания большого числа сервисов, ориентированных на обеспечение эффективной работы микрогридов, peer-to-peer торговлю и оказание услуг и другие новые энергетические практики для распределенной энергетики.

Энергетические ячейки присоединены к электрическим сетям, топология которых вместе с размещением точек присоединения энергетических ячеек формирует взаимное топологическое положение энергетических ячеек. В силу этого взаимного положения оказываются возможны случаи «вложенности» энергетических ячеек друг в друга относительно центра питания распределительной электрической сети. В этом случае одна энергетическая ячейка присоединена к фидеру внутри другой энергетической ячейки. Участие «внутренней» энергетической ячейки в энергетических транзакциях в такой ситуации будет оказывать влияние на участие «внешней» энергетической ячейки в энергетических транзакциях, и наоборот. Возникает возможность

коллизии с одновременным неисполнением параметров энергетических транзакций двух энергетических ячеек, влияющих друг на друга. При этом с точки зрения Интернета энергии обе энергетические ячейки по-прежнему представляются «черными ящиками» без внутренней структуры. Архитектура Интернета энергии определяет следующие пути предотвращения такого рода коллизий:

1. обращение приложения сервиса, в рамках которого формируется энергетическая транзакция, к приложению-арбитру, размещаемому в системе IoT, с целью получения разрешения на проведение энергетической транзакции или данных для корректировки ее параметров в целях недопущения коллизий;
2. обращение программных агентов энергетических ячеек к приложению-арбитру, размещаемому в системе IoT, с целью получения разрешения на заключение энергетической транзакции или данных для корректировки ее параметров в целях недопущения коллизий;
3. обращение программных агентов энергетических ячеек к распределенной модели участка сети, размещаемой в системе IoT, перед инициацией формирования энергетической транзакции в целях уточнения ресурсов и ограничений энергетической ячейки;
4. формирование программными агентами энергетических ячеек собственной модели участка сети на основе опроса друг друга перед инициацией формирования энергетической транзакции в целях уточнения ресурсов и ограничений энергетической ячейки.

Архитектура Интернета энергии не устанавливает предпочтительности выбора одного из этих путей и оставляет осуществление этого выбора разработчикам реализаций архитектуры Интернета энергии.

Тем не менее, наличие в Интернете энергии эффектов взаимного влияния энергетических ячеек и энергетических транзакций делает важной реализацию технологий, позволяющих формировать и актуализировать модель электрической сети, топологических и режимных ограничений.

Программный агент энергетической ячейки

Функциями программного агента энергетической ячейки являются:

1. представление пользователя и его энергетической ячейки в Ин-

- тернете энергии;
2. обеспечение участие энергетической ячейки в сервисах;
 3. взаимодействие с другими программными агентами энергетических ячеек и приложениями сервисов;
 4. диспетчеризация участия энергетической ячейки в сервисах в целях исключения коллизий в условиях ограниченности ресурсов энергетической ячейки;
 5. передача параметров энергетических транзакций в систему TE;
 6. передача команд системам управления энергетическими ячейками и электроустановками энергетических ячеек посредством системы IoT;
 7. передача данных о параметрах энергетических транзакций в систему NG посредством системы IoT.

Программный агент энергетической ячейки должен включать в себя следующие компоненты:

1. программное ядро агента;
2. пользовательский интерфейс;
3. программный интерфейс с системой TE;
4. программный интерфейс с системой IoT.

При реализации мультиагентной системы программных агентов энергетических ячеек следует использовать протоколы FIPA-ANL или KQML. При разработке архитектуры программных агентов энергетических ячеек в ней следует предусмотреть прикладной программный интерфейс (API) для обеспечения быстрого оснащения программных агентов энергетических ячеек новыми типами поведения за счет дополнительных программных модулей.

Система Transactive Energy (TE)

Transactive Energy (TE) — система осуществления коммерческой составляющей энергетических транзакций, в которой происходит полностью автоматическое формирование и защищенное хранение смарт-контрактов, фиксирующих параметры энергетических транзакций, верификация их исполнения, финансовый расчет по исполненным обязательствам, фиксация расхождений и споров, использование данных для их разрешения и исполнение клиринговых функций.

Функциями системы Transactive Energy (TE) являются:

1. формирование, запись, устойчивое и защищенное хранение записей о параметрах энергетических транзакций;
2. обеспечение функционирования цифровых кошельков пользователей, устойчивое и защищенное хранение их персональных данных и финансовой информации;
3. верификация исполнения обязательств по энергетическим транзакциям на основе данных, получаемых от системы IoT;
4. обеспечение биллинга и процессинга по энергетическим транзакциям, включая обеспечение моментального перечисления денежных средств по факту исполнения условий энергетической транзакции.

На Рисунке 4 приведена компонентная диаграмма системы Transactive Energy (TE). В систему Transactive Energy (TE) входят следующие компоненты:

1. транзакционная платформа;
2. аватары программных агентов энергетических ячеек и пользователей;
3. цифровые кошельки программных агентов энергетических ячеек и пользователей;
4. пользовательский интерфейс;
5. программные конвертеры величин и данных;
6. программный интерфейс с программным агентом энергетической ячейки;
7. программный интерфейс с системой IoT;
8. программный интерфейс с приложениями сервисов;
9. модуль информационной безопасности.

Транзакционная платформа должна обеспечивать одновременное быстрое осуществление энергетических транзакций между пользователями. Транзакционная платформа должна быть полностью автоматически масштабируемая как по числу пользователей, так и по числу транзакций в единицу времени. Рекомендуется применение технологии распределенных реестров. Должна обеспечиваться возможность совершения пула транзакций между энергетическими ячейками с периодом не более 15 минут.

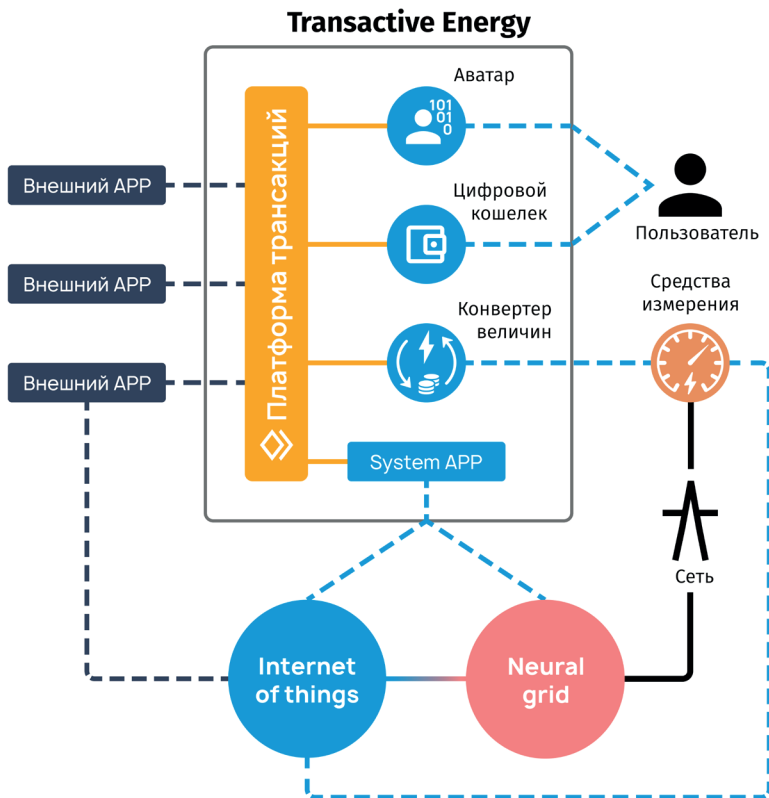


Рисунок 4. Компонентная архитектура системы Transactive Energy (TE)

Система Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) — система осуществления информационных составляющей энергетических транзакций, в которой происходит межмашинное (M2M) взаимодействие и обмен всеми необходимыми для энергетических транзакций информационно-управляющими сигналами между энергетическими ячейками и их программными агентами, доступ программных агентов к локальной автоматике оборудования и/или локальным системам управления энергетических ячеек, а также формирование, хранение и предоставление цифровых двойников и цифровых теней энергетических ячеек и их оборудования, работа вспомогательного программного обеспечения

для межмашинного взаимодействия.

На Рисунке 5 приведена компонентная диаграмма системы Internet of Things (IoT). Функциями системы Internet of Things (IoT) являются:

1. предоставление программным агентам доступа к системам управления энергетических ячеек и электроустановками энергетических ячеек;
2. обеспечение интероперабельности программных агентов с электроустановками энергетических ячеек, присоединенных к Интернету энергии;
3. обеспечение интероперабельности между электроустановками энергетических ячеек, присоединенных к Интернету энергии;
4. обеспечение устойчивости и защищенности хранения данных об энергетических ячейках и их электроустановках.

В систему Internet of Things (IoT) входят следующие компоненты:

1. IoT-платформа;
2. межсоединительные устройства с электроустановками энергетических ячеек;
3. интеллектуальные счетчики электрической энергии и мощности;
4. драйверы, адаптеры, интерфейсы для соединения с электроустановками энергетических ячеек;
5. программный интерфейс с программными агентами энергетических ячеек;
6. программный интерфейс с системой TE;
7. программный интерфейс с системой NG;
8. интеллектуальные счетчики (опционально);
9. датчики, сенсоры, актуаторы (опционально);
10. вспомогательные программы и приложения для межмашинного взаимодействия (опционально).

В целях обеспечения интероперабельности межмашинных взаимодействий на IoT-платформе рекомендуется при разработке технических решений по реализации архитектуры IDEA применять требования согласно стандартам IEEE1547–2018, IEEE2030.5–2018.

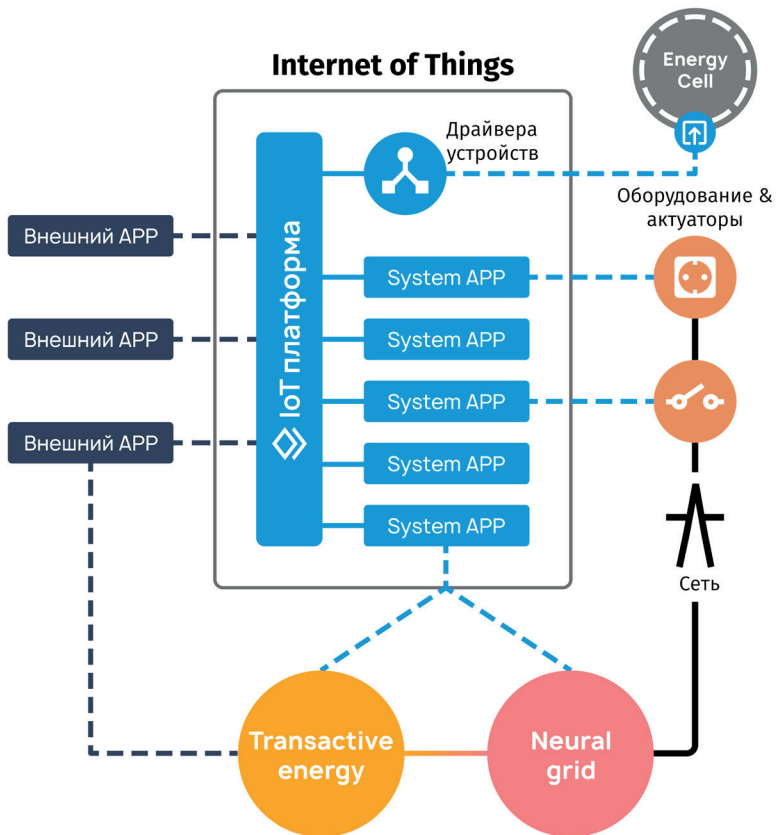


Рисунок 5. Компонентная архитектура системы Internet of Things (IoT)

Система Neural Grid (NG)

Neural Grid (NG) — система осуществления физической (электроэнергетической) составляющей энергетических транзакций, которая при необходимости обеспечивает децентрализованное регулирование частоты и баланса мощности, управление перетоками мощности в энергосистеме в целях формирования необходимого для реализации энергетических транзакций режима электропередачи и поддержания его статической и динамической устойчивости в условиях одновременной реализации множества энергетических транзакций. Система обеспечивает функции адаптивной релей-

ной защиты и автоматики — технологических защит энергетических ячеек и электрической сети в условиях двунаправленных перетоков мощности, обусловленных энергетическими транзакциями, а также интеграцию некоторых видов энергетических ячеек с электрическими сетями (присоединение к электрическим сетям).

На Рисунке 6 приведена компонентная диаграмма системы Neural Grid (NG). Функциями системы Neural Grid (NG) являются:

1. поддержание статической и динамической устойчивости энергосистемы в условиях осуществления энергетических транзакций;
2. оказание необходимых для осуществления энергетических транзакций воздействий на режим электропередачи;
3. оказание необходимых для осуществления энергетических транзакций воздействий на баланс активной и реактивной мощности в энергосистеме, энергоузле;
4. обеспечение качества электрической энергии;
5. обеспечение технологической защиты энергетических ячеек.

В систему Neural Grid (NG) входят следующие компоненты:

1. регулятор перетока мощности (энергетический роутер);
2. опорный регулятор баланса мощности (энергетический хаб);
3. регулятор выдачи (потребления) мощности (энергетический порт);
4. адаптивная релейная защита и автоматика;
5. программный интерфейс с системой IoT;
6. программный интерфейс с системой TE.

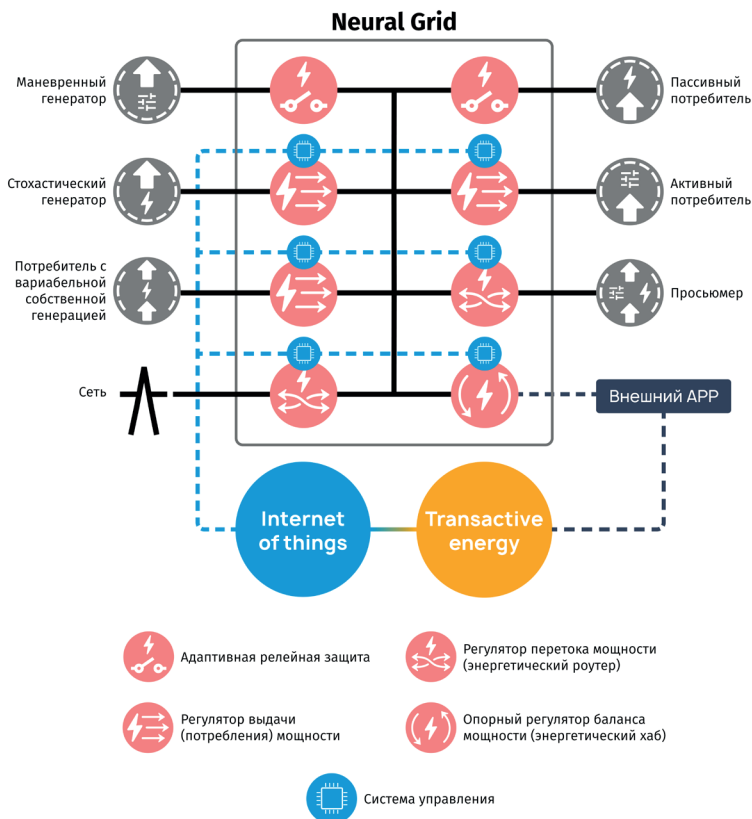


Рисунок 6. Компонентная архитектура системы Neural Grid (NG)

Регулятор двухстороннего перетока мощности (энергетический роутер)

Регулятор двухстороннего перетока мощности служит для управления перетоком мощности в целях осуществления энергетических транзакций и устанавливается в сечении между двумя участками энергосистемы или в сечении между микрогридом и энергосистемой, в котором необходимо обеспечить регулирование величины и направления перетока активной и/или реактивной мощности в целях выполнения функций системы NG.

Регулятор двухстороннего перетока мощности должен обеспечивать возможность выполнения работы в следующих режимах:

1. питание со стороны питающей сети, потребление со стороны микрогрида;
2. питание со стороны питающей сети и микрогрида, потребление со стороны других микрогрида;
3. ограничение перетока электроэнергии в сторону части микрогридов;
4. ограничение перетока электроэнергии в сторону сети энергосистемы;
5. питание со стороны одних микрогридов, потребление со стороны других микрогридов.

Рекомендуется применение требований к протоколам обмена данными с системой управления верхнего уровня регулятором двустороннего перетока мощности согласно ГОСТ Р МЭК 60870–5–104–2004.

Опорный регулятор баланса мощности (энергетический хаб)

Опорный регулятор баланса мощности должен обеспечивать формирование опорного напряжения в изолированной энергосистеме, в которой он установлен, и обеспечивать первичное регулирование частоты и мощности, в том числе в случае отсутствия в энергосистеме синхронных генераторов.

Опорный регулятор баланса мощности должен обеспечивать регулирование частоты в соответствии с требованиями раздела 4 ГОСТ Р 55890–2013.

При реализации архитектуры Интернета энергии в технологически изолированных энергосистемах, не имеющих в своем составе синхронных генераторов, должны быть установлены опорные регуляторы баланса мощности (энергетические хабы).

Присоединение энергетических ячеек

В зависимости от принадлежности к перечисленным в Таблице 1 типам энергетическая ячейка присоединяется к Интернету энергии посредством интерфейсов, типы которых приведены в Таблице 3. Интерфейсы между энергетическими ячейками и Интернетом энергии включают в общем случае транзакционную, информационно-управляющую и силовую компоненты в соответствии с тремя системами Интернета энергии и посредством систем ТЕ и IoT связаны с программными агентами энергетических ячеек.

Таблица 3. Типы интерфейсов между энергетическими ячейками и Интернетом энергии

Тип энергетической ячейки	Функциональный тип межсоединительного устройства
Маневренный генератор	Регулятор выдачи (потребления) мощности (энергетический порт или инвертор)
Стохастический генератор	
Просьюмер	Регулятор двухстороннего перетока мощности (энергетический роутер)
Потребитель с переменной собственной генерацией	
Активный потребитель	Интеллектуальный счетчик электрической энергии и мощности с адаптивной технологической защитой (РЗА)
Пассивный потребитель	

Указанные межсоединительные устройства должны содержать следующие компоненты:

1. Транзакционные компоненты:
 - нода распределенной платформы транзакций,
 - генератор криптографических ключей,
 - конвертер величин.
2. Информационно-управляющие компоненты:
 - набор программных интерфейсов,
 - интеллектуальная система измерений.

В целях обеспечения интеграции энергетических ячеек с электрическими сетями и их интероперабельности с Интернетом энергии рекомендуется при разработке технической реализации межсоединительных устройств Интернета энергии применять требования согласно стандарту IEEE1547-2018.

Топология электрических сетей в Интернете энергии

Можно определить четыре типовые топологические модели построения Интернета энергии как объединения энергетических ячеек, показанные на Рисунке 7:

1. Микрогрид (Microgrid). Энергосистема, составленная из энергетических ячеек, и обладающая способностью к устойчивой работе в изолированном режиме без ограничения потребления. Может быть построена по

трем основным топологиям:

- радиальная распределительная сеть, с несколькими фидерами от центра питания, которым является любая из энергетических ячеек, являющаяся генератором или просьюмером,
- кольцевая распределительная сеть,
- одноранговая mesh-сеть со связями «каждый с каждым».

2. Распределительная сеть энергетических ячеек (Grid of cells). Энергосистема, составленная из энергетических ячеек, присоединенных к распределительным сетям централизованной (внешней) энергосистемы и обменивающихся энергией между собой и с централизованной (внешней) энергосистемой. Топологически может быть построена как радиальная или радиально-кольцевая в зависимости от топологии распределительной сети.

3. Распределительная сеть с микрогридами (Grid of microgrids). Энергосистема, составленная из обменивающихся энергией между собой и с централизованной (внешней) энергосистемой микрогридов, присоединенных к имеющимся распределительным сетям централизованной (внешней) энергосистемы. Топология построения такой сети соответствует топологии имеющихся распределительных электрических сетей.

4. Одноранговая сеть микрогридов (Mesh of microgrids). Специфическая модель построения Интернета энергии, заключающаяся в объединении микрогридов в одноранговую mesh-сеть, в которой присутствуют только связи типа «точка — точка», и при этом такие связи присутствуют между большей части микрогридов по принципу «каждый с каждым». Важной особенностью этой модели является то, что разворачивание такой mesh-сети требует, чтобы каждый, кто в нее входит, самостоятельно поддерживал свой энергетический баланс, так как в mesh-сети в указанных условиях связей и перетоков «точка — точка» не формируется общая режимно-балансовая ситуация, отсутствует единый режим передачи электроэнергии. Балансы мощности выполняются только для связанных между собой пар микрогридов по каждой связи, что и требует наличия самостоятельного баланса в каждом из объединяемых микрогридов.

Еще одно логически возможное объединение энергетических ячеек — в виде mesh-сети (Mesh of cells) — как показано, является частным топологическим случаем построения микрогридов.

При этом возможны три типа топологии энергосистем Интернета энергии:

- 1. Ячеистая электрическая сеть.** Характеризуется наличием связей типа «точка — точка» между присоединенными электроустановками;

2. **Радиальная электрическая сеть.** Характеризуется наличием только одного маршрута, связывающего центр питания и присоединенные электроустановки;
3. **Сложно-замкнутая (кольцевая) электрическая сеть.** Характеризуется наличием кольцевых участков электрической сети и наличием как минимум двух маршрутов, связывающих центр питания и присоединенные электроустановки.

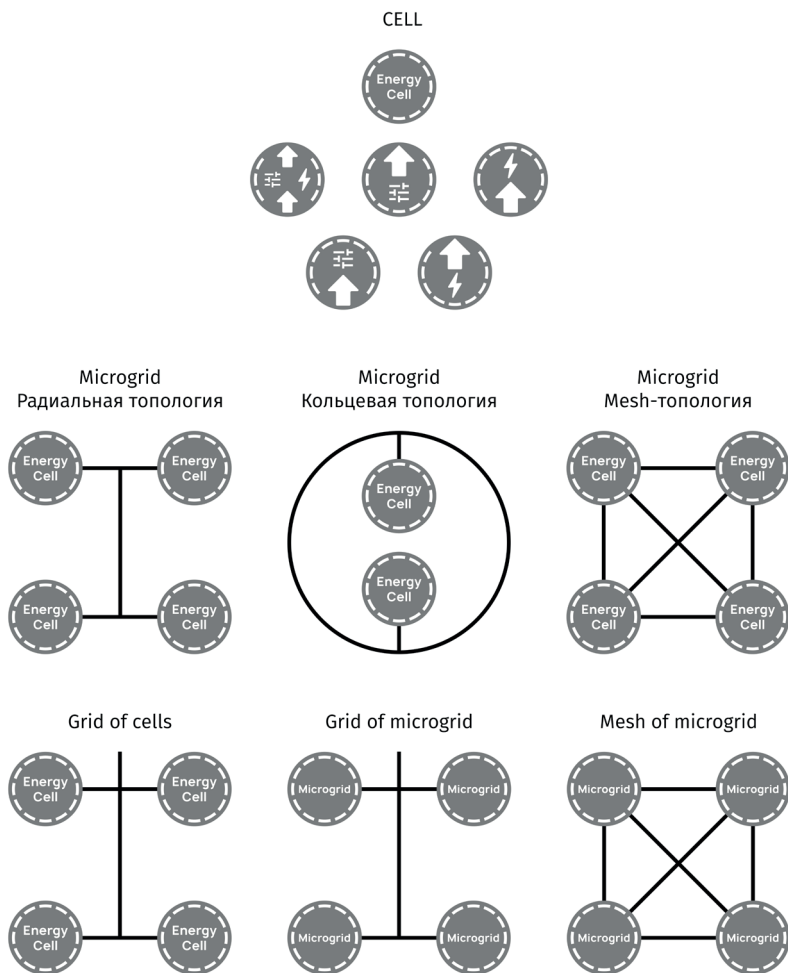


Рисунок 7. Типовые модели построения Интернета энергии — варианты объединения энергетических ячеек

Информационная безопасность

Требования к информационной безопасности в Интернете энергии и его системам при реализации архитектуры Интернета энергии должны применяться согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799–2005, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006, ГОСТ Р 52448–2005, ГОСТ Р 52863–2007.

Дополнительно требования к информационной безопасности системы TE, ее программных интерфейсов и межсоединительных устройств с программным агентом энергетической ячейки и другими системами следует применять согласно ГОСТ Р ИСО/ТО 13569–2007, ГОСТ Р 57580.1–2017.

Дополнительно требования к информационной безопасности систем IoT и NG, их программных интерфейсов и межсоединительных устройств с другими системами следует применять согласно ГОСТ Р МЭК 62443–3–3–2016.

Демонстрационный комплекс — реализация Интернета энергии

Примером модульной реализации архитектуры Интернета энергии выступает демонстрационный комплекс Интернета энергии, размещенный в Московском физико-техническом институте. Его состав и возможные перетоки мощности в нем показаны на Рисунке 8.

В рамках демонстрационного комплекса Интернета энергии развернуто четыре просьюмера. В состав каждого просьюмера входит источник энергии (бензиновый генератор, две группы солнечных панелей, накопитель электроэнергии в зависимости от просьюмера) и три нагрузки — электроприемники. Каждый просьюмер в зависимости от соотношения между генерируемой и потребляемой мощностями может выступать как продавцом, так и покупателем электрической энергии.

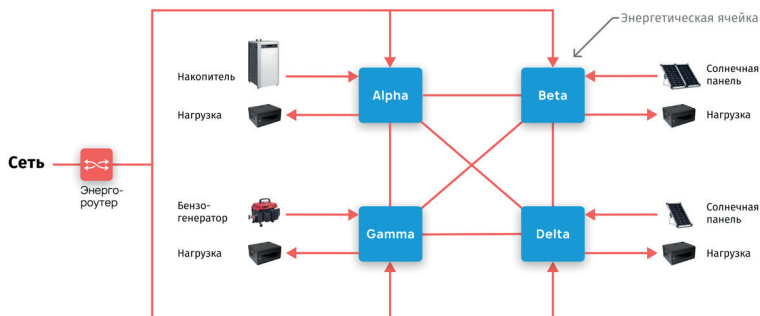


Рисунок 8. Состав и возможные перетоки мощности в демонстрационном комплексе Интернета энергии

Демонстрационный комплекс Интернета энергии позволяет реализовать следующие основные тестовые сценарии:

1. Работа группы просьюмеров в режиме питания от внешней сети и собственных источников энергии как с осуществлением энергетических транзакций и перетоков мощности между просьюмерами, так и без таковых;
2. Работа группы просьюмеров в изолированном (автономном) режиме

- с взаимной оптимизацией энергоснабжения за счет энергетических транзакций и перетоков мощности между просьюмерами;
3. Подключение к группе просьюмеров нового просьюмера в режиме plug & play с автоматическим подключением к имеющимся сервисам Интернета энергии.

В рамках демонстрационного комплекса реализуется одноранговый (peer-to-peer) энергообмен между просьюмерами. На Рисунке 9 показана модульная схема демонстрационного комплекса Интернета энергии.

Для реализации однорангового обмена энергией разворачиваются мультиагентная система управления, транзакционная система (TE), система межмашинного взаимодействия (IoT), а также в сеть устанавливаются регуляторы перетоков активной и реактивной мощности — компоненты системы управления режимом (NG), а именно:

1. Общая шина питания просьюмеров переменным током 0,4 кВ присоединяется к системе электроснабжения здания (сети общего пользования) через **регулятор перетока активной и реактивной мощности — энергетический роутер переменного тока**.
2. Общая шина питания просьюмеров переменным током 0,4 кВ присоединяется к просьюмерам через двусторонний **AC\DC-регулятор перетока активной и реактивной мощности**.
3. Линии постоянного тока 48 В между просьюмерами присоединяются к просьюмерам через **DC\DC-регулятор перетоков активной мощности**.
4. У каждого просьюмера устанавливается буферная система накопления электрической энергии, служащая **опорно-балансирующим регулятором — энергетическим хабом**.

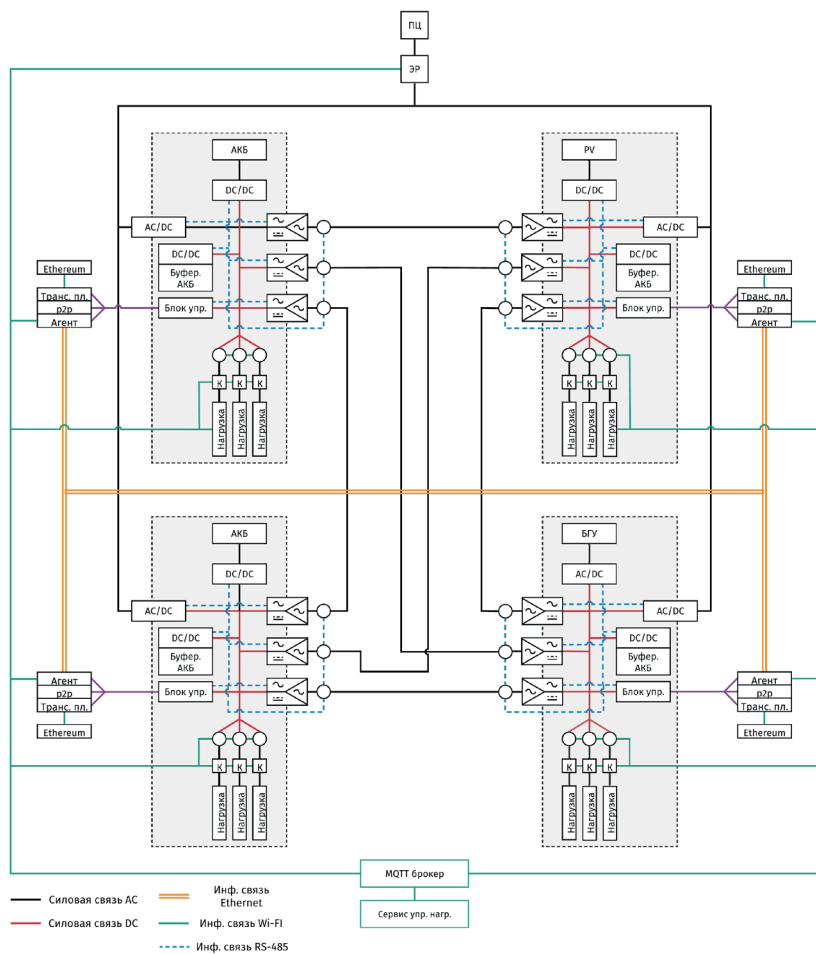


Рисунок 9. Модульная схема демонстрационного комплекса Интернета энергии

Приложения сервисов

В рамках модульной реализации архитектуры IDEA на демонстрационном комплексе Интернета энергии развернуты два приложения сервисов:

1. P2P-торговля электроэнергией на базе мультиагентной системы, разработанной ООО «ИЭЭС»;

2. приложение на базе программного пакета AMIGO (АО «РТСофт») по оптимальному отключению нагрузки по запросу программного агента энергетической ячейки.

Модульная реализация цифровых агентов энергетических ячеек

Каждый просьюмер оборудован программным агентом, размещенным в блоке управления — на промышленном компьютере. Программные агенты, созданные ООО «ИЭЭС», являются цифровыми представителями просьюмеров, осуществляют взаимодействие друг с другом, формируют договоренности об обмене энергией, передают данные об этих договоренностях в транзакционную систему, в соответствии с этими договоренностями с помощью IoT-системы передает данные и команды на энергетическое оборудование просьюмеров и на регуляторы перетоков активной и реактивной мощности, чтобы те в соответствии с этими командами формировали необходимый для реализации обмена энергией баланс мощности и режим электропередачи.

Программные агенты включают каждый следующие модули:

1. код агента, написанный на языке JADE;
2. пользовательский интерфейс (UI) с возможностями регистрации энергетической ячейки, подписки на сервис и выбора профиля участия в сервисе P2P-рынка;
3. программный интерфейс с транзакционной платформой Φ NDER;
4. программный интерфейс с другими агентами, реализованный на базе протокола FIPA.

Модули системы TE

Транзакционная система представляет собой программный продукт Φ NDER (ООО «Элиот»), который обеспечивает формирование платежных долговых каналов между аватарами просьюмеров, фиксацию параметров транзакций по обмену энергией в форме смарт-контрактов, верификацию их исполнения на основе данных измерительных устройств, а также автоматическое перечисление условных финансовых единиц между электронными кошельками просьюмеров в соответствии с ценовыми параметрами смарт-контрактов и фактическими верифицированными объемами обмена энергией.

Транзакционная система Φ NDER включает в себя распределенную платформу транзакций на базе технологии платежных долговых каналов

(модификации технологии каналов состояний), а также модульные реализации компонент системы TE:

1. криптографически защищенные аватары пользователей;
2. криптографически защищенные цифровые кошельки;
3. конвертер данных с датчиков тока и счетчиков электрической энергии в токены;
4. программный интерфейс со средствами измерения, реализованный через систему IoT по протоколу MQTT;
5. программный интерфейс с программными агентами энергетических ячеек, реализованный по протоколу MQTT;
6. программный интерфейс с системой IoT по протоколу MQTT.

Взаимодействие систем TE и NG в описываемой модульной реализации не предусмотрено. Программные агенты энергетических ячеек, система Φ NDER (распределенная система) размещены на четырех промышленных компьютерах, стоящих на границах энергетических ячеек и присоединенных к оборудованию ячеек через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus. Приложение сервиса оптимального отключения нагрузки AMIGO размещено на отдельно стоящем промышленном компьютере.

Модули системы IoT

IoT-система включает две подсистемы: MQTT-сервер, через который осуществляется межмашинное общение, и систему передачи данных регуляторам перетоков мощности, построенную с применением Ethernet и применяющую протоколы Modbus и RS-485. IoT-система обеспечивает межмашинное взаимодействие, передачу данных между другими элементами системы управления энергосистемой, а также доступ до регуляторов перетоков мощности и всего энергетического оборудования.

IoT-платформа реализована в существенно редуцированном виде за счет сочетания указанных в Таблице 4 интерфейсов и протоколов межмашинного взаимодействия. Для использования протокола MQTT развернут MQTT-брокер.

Таблица 4. Модульная реализация системы IoT в демонстрационном комплексе Интернета энергии

Технология интерфейсов и передачи данных	Протокол обмена данными	Взаимодействующие машины
Ethernet	FIPA	Программные агенты энергетических ячеек
RS-485	Modbus	Программные агенты энергетических ячеек Системы управления электроустановками энергетических ячеек Модулями системы NG Датчики постоянного тока из системы IoT
Wi-Fi	MQTT	Программные агенты энергетических ячеек Транзакционная система ØNDER Энергетический роутер Приложение сервиса управления нагрузкой Реле системы управления нагрузкой Счетчики электрической энергии сетей переменного тока

Использование информационного интерфейса с энергетическими ячейками (электроустановками) RS-485 и протокола Modbus обеспечивает программным агентам энергетических ячеек доступ к системам управления и драйверам этих электроустановок. Специальное межсоединительное устройство с энергетической ячейкой (электроустановкой) не требуется. Программный интерфейс с программными агентами энергетических ячеек обеспечивается за счет всех указанных интерфейсов и протоколов. Программный интерфейс с системой TE реализован за счет интерфейса Wi-Fi и протокола MQTT. Программный интерфейс с системой NG реализован за счет использования интерфейса RS-485 и протокола Modbus.

На линиях постоянного тока стоят датчики тока, подключенные к IoT-платформе посредством интерфейса RS-485 и протокола Modbus. На линиях переменного тока установлены цифровые счетчики электрической энергии, подключенные к IoT-платформе через Wi-Fi и протокол MQTT. Управляемые реле (актуаторы) подключены к IoT-платформе через Wi-Fi и протокол MQTT. MQTT-сервер и MQTT-брокеры размещены на отдельно стоящем промышленном компьютере.

Модули системы NG

Система управления режимом NG в составе перечисленных ранее регуляторов перетоков активной и реактивной мощности и опорно-балансирующих регуляторов получает команды от программных агентов и за счет управления перетоками активной и/или реактивной мощности в сечениях, где установлены регуляторы, а также выдачи или потребления электроэнергии буферными аккумуляторами, формируют баланс мощности в энергосистеме и режим электропередачи, которые соответствуют сформированным транзакциям по обмену энергией между просьюмерами и позволяют исполнить эти транзакции. В Таблице 5 приведен перечень и указано количество модулей системы NG, реализующих функции соответствующих компонентов.

Таблица 5. Модули системы Neural Grid (NG)

Компонент	Модули	Место установки
Регулятор перетока мощности	Рективвертор	Подключение ячейки к mesh-сети
	Энергетический роутер	В сети общего пользования на подключении к центру питания
Опорный регулятор баланса мощности	Аккумуляторная батарея, подключенная через DC/DC-преобразователь	На шину постоянного тока ячейки
Регулятор потребления мощности	AC/DC-преобразователь	Подключение ячейки к шине переменного тока

Адаптивная релейная защита в рамках приведенной реализации архитектуры Интернета энергии не устанавливалась.

Модулем, выполняющим функцию компонента регулятора перетока мощности между энергетическими ячейками, является рективвертор. Каждая энергетическая ячейка соединена с тремя другими энергетическими ячейками при помощи четырех рективверторов, размещенных на границе энергетической ячейки и подключенных одной DC-стороной к шине DC48 В энергетической ячейки, а другой DC-стороной — к линиям DC48 В, образующим mesh-сеть, связывающую ячейки. Один из этих рективверторов осуществляет прием мощности из mesh-сети от трех других энергетических ячеек, остальные три — выдачу мощности в mesh-сеть соответствующим энергетическим ячейкам.

Вторым модулем, выполняющим функцию компонента регулятора

перетока мощности — между сетью общего пользования и шиной АС0,4 кВ, питающей все энергетические ячейки — является энергетической роутер на 25 кВА (кВАР), разработанный ООО «ИЭЭС». Он устанавливается на границе между демонстрационным комплексом Интернета энергии и сетью общего пользования.

Модулем, выполняющим функцию опорного регулятора баланса мощности, является аккумуляторная батарея, подключенная к шине энергетической ячейки через управляемый DC/DC-преобразователь. Всего установлено четыре модуля опорных регулятора баланса мощности — по одному на каждую энергетическую ячейку для упрощения регулирования баланса за счет его разбиения на четыре частных баланса мощности энергетических ячеек.

Модулем, выполняющим функцию регулятора потребления мощности, является AC/DC-преобразователь, устанавливаемый на границе каждой энергетической ячейки, подключаемый DC-стороной к шине DC48 В энергетической ячейки, а AC-стороной — к шине АС0,4 кВ, идущей через энергетической роутер от сети общего пользования.

Топология электрической сети

Каждый просьюмер имеет подключение к сети электроснабжения на переменном токе 0,4 кВ и связан со всеми другими просьюмерами линиями постоянного тока 48 В. Общая для всех просьюмеров питающая шина переменного тока 0,4 кВ подключена к системе электроснабжения здания, в котором располагается демонстрационный комплекс.

В рамках демонстрационного комплекса реализуется вариант способа управления энергосистемой для реализации однорангового обмена энергией между активными потребителями, присоединенными к электрическим сетям с mesh-топологией.

Реализация энергетических транзакций

Энергетическая транзакция при одноранговом обмене энергией между двумя просьюмерами осуществляется следующим образом:

1. Программные агенты, связанные через Ethernet и взаимодействующие по протоколу FIPA, в соответствии с вводимыми через пользовательский интерфейс (UI) программных агентов настройками просьюмеров и правилами однорангового рынка электроэнергии

осуществляют торги на электроэнергию. По результатам этих торгов формируют согласованные между двумя агентами параметры транзакции по обмену энергией.

2. Программные агенты, связанные с транзакционной системой через Wi-Fi и осуществляющие взаимодействие с ней по протоколу MQTT, передают в транзакционную систему криптографически защищенные идентификационные данные, ценовые сигналы и другие параметры транзакции по обмену энергией. Транзакционная система осуществляет идентификацию данных агентов, их привязку к соответствующим аватарам и формирует смарт-контракт на транзакцию по обмену энергией.
3. Программные агенты, связанные с энергетическим оборудованием через Ethernet и взаимодействующие с ними по протоколу Modbus, передают ему команду на увеличение или снижение мощности выдачи (или потребления в случае накопителя энергии) электроэнергии.
4. Программные агенты, связанные с опорно-балансирующим регулятором через Ethernet и взаимодействующие с ними по протоколу Modbus или RS-485, передают им команды на выдачу или потребление электроэнергии в целях формирования баланса мощности в энергосистеме в соответствии с транзакциями по обмену энергией.
5. Программные агенты, связанные с AC/DC- и DC/DC-регуляторами перетока активной и реактивной мощности через Ethernet и взаимодействующие с ними по протоколу Modbus, передают им команды на формирование необходимых для исполнения транзакций перетоков между общей питающей шиной и просьюмерами и между двумя просьюмерами, соответственно.
6. При необходимости для формирования баланса мощности в условиях нехватки энергии программные агенты могут инициировать отключение части нагрузки своего просьюмера. Для этого они при помощи Wi-Fi передают по протоколу MQTT соответствующий запрос в размещенную на отдельном сервере программу AMIGO, которая формирует оптимальный план отключения нагрузок и передает по протоколу MQTT команды на отключение на дистанционно управляемые реле, связь с которыми обеспечивается при помощи Wi-Fi.
7. Опорно-балансирующие регуляторы, AC/DC- и DC/DC-регуляторы в соответствии с командами формируют необходимый баланс

- мощности и режим электропередачи. Трансакции приводятся в исполнение.
8. Программные агенты получают от измерительного оборудования AC/DC- и DC/DC-регуляторов данные о фактическом перетоке мощности и передают их и идентификационные данные в транзакционную систему. Транзакционная система с помощью этих данных осуществляет авторизацию программных агентов, верификацию осуществления транзакции по обмену энергией и осуществляет автоматический перевод условных финансовых единиц между электронными кошельками активных потребителей. На этом транзакция по одноранговому обмену энергией является завершенной.

Пилотирование, верификация, стандартизация

Пилотные проекты

Пилотный проект на полигоне REIDS в Сингапуре

REIDS — крупный международный проект, основная цель которого — апробировать в условиях, максимально приближенных к реальным, различные комплексные решения для создания «островных», автономных микрогридов, включающих генерацию на основе ВИЭ. Среди партнеров проекта, создающих свои микрогриды, такие крупные игроки глобального технологического рынка, как EDF, Engie, Rolls Royce, Schneider Electric, General Electric и десятки других компаний. Самая интересная особенность полигона — то, что в рамках него все уже работающие и создаваемые микрогриды, а также оборудование общего пользования (SAS), принадлежащее Наньянскому технологическому университету (NTU), будут связаны единой сетью 6,6/0,4 кВ в кластер микрогридов, которые могут обмениваться электроэнергией друг с другом. Это делает полигон чрезвычайно интересным с точки зрения реализации на нем архитектуры Интернета энергии: есть возможность опробовать энергетические транзакции между всеми микрогридами и оборудованием общего пользования, а также полностью децентрализованное управление такой транзакционной энергосистемой.

Демонстрационный полигон REIDS — это шоурум лучших мировых решений для автономного электроснабжения, ориентированных на рынок всей Юго-Восточной Азии.

Первым автономным микрогридом на острове стала система энергоснабжения цеха перегрузки шлака, развернутая еще до старта проекта REIDS в интересах реального потребителя. Эта автономная система, обслуживающая нагрузку примерно 250 кВт днем и 180 кВт ночью, включает 400 кВт крышных солнечных панелей, накопители электроэнергии на 200 кВт·ч и два дизельных генератора по 500 кВт.

Кроме того, уже установлено оборудование общего доступа (SAS) в составе двух дизельных генераторов по 50 кВА, солнечных панелей на 400 кВт, управляемой имитационной нагрузки мощностью 350 кВА с программируемым профилем и регулируемой реактивной составляющей. В ближайшее время

появится накопитель энергии мощностью 100 кВт на 180 кВт·ч.

Engie в кооперации со Schneider Electric и MuRata практически завершил строительство микрогрида с ветрогенератором мощностью 100 кВт, солнечными панелями на 200 кВт, тремя дизельными генераторами на 200 кВт суммарной мощности и накопителем энергии от MuRata мощностью 100 кВт и емкостью 200 кВт·ч, а также системой накопления энергии в водородном цикле с электролизером и топливным элементом мощностью по 50 кВт каждый и возможностью заправки водородных автомобилей. EDF разворачивает свой микрогрид под задачу демонстрации возможностей технологии V2G в условиях автономного электроснабжения. Предполагается, что постепенно будут развернуты все восемь проектов микросетей.

Управление всеми перечисленными мощностями осуществляется из единого диспетчерского центра — REIDS Hub — предоставляющего также доступ к использованию оборудования общего доступа партнерам проекта по расписанию. Этот диспетчерский центр сам является микрогридом, в котором оборудование питается от солнечных панелей на 37 кВт и двух накопителей энергии: литий-ионного на 31 кВт·ч и свинцово-кислотного на 77 кВт·ч.

Планы по реализации элементов архитектуры Интернета энергии на острове на первом, идущем в настоящее время этапе включают разворачивание до конца года транзакционной платформы ØNDER, которая свяжет потоки учетных и расчетных данных от всех имеющихся единиц оборудования общего пользования (SAS) и системы энергоснабжения цеха перегрузки шлака, а также инсталляцию системы оптимального управления (EMS) от АО «РТСофт» (на базе решения AMIGO), которая будет согласованно управлять оборудованием общего пользования.

В настоящее время на полигоне складывается нестандартная балансовая ситуация: днем выработка крышных солнечных панелей на цехе перегрузки шлака больше, чем потребление, иногда в два раза. Но емкости собственных систем накопления энергии этого микрогрида не достаточно для того, чтобы сохранить всю избыточную солнечную электроэнергию. Ночью же, напротив, этот цех вынужден использовать дизельную генерацию после полной разрядки накопителей, которая наступает раньше восхода солнца. Наличие связей 0,4/6,6 кВ с оборудованием общего пользования (SAS), в первую очередь, накопителем и солнечными панелями, позволило бы за счет предоставления услуг по накоплению солнечной энергии (сервиса «шэринга» накопителей) существенно снизить потребность микрогрида цеха в дизельной генерации и повысить эффективность его электроснабжения. Это — один из сценариев энергетических транзакций, которые предстоит

реализовать в рамках демонстрации Интернета энергии.

Первый этап. ТЕ

Реализация решения IDEA на первом этапе направлено на автоматизацию процесса учета и взаиморасчета за оказанные услуг по электроснабжению. Схема реализации элементов архитектуры Интернета энергии на первом этапе пилотного проекта показана на Рисунке 10.

На первом этапе осуществляется реализация одного из компонентов архитектуры IDEA — системы ТЕ, а именно информационной платформы, которая позволяет производить взаиморасчеты (транзакции) между участниками энергосистемы на основе реальных данных учета электроэнергии. Уже сейчас имеются договоренности между компанией ØNDER и университетом NTU и проводятся работы по реализации платформы ТЕ на базе платформы ØNDER, которая будет интегрироваться с системой мониторинга и управления REIDS Hub, что позволит ей собирать данные по учету электроэнергии по каждому активу SAS и по MG0 в целом и производить между ними взаиморасчеты.

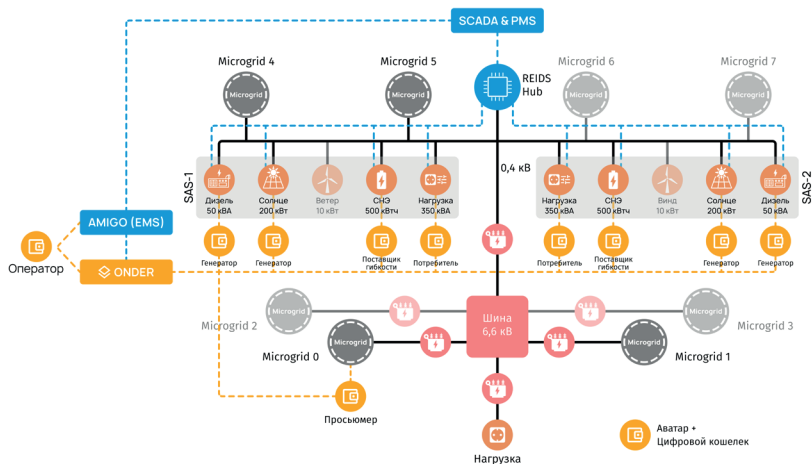


Рисунок 10. Модульная архитектура пилотного проекта реализации IDEA на полигоне REIDS на первом этапе

Также в рамках первого этапа реализуется AMIGO EMS от АО «РТСОФТ», которое в данной системе является приложением Интернета энергии, осуществляющим автоматизированное управления распределенными энергетическими ресурсами с целью оптимизации режимов работы SAS-1 и SAS-2

через встроенную систему управления REIDS Hub.

При реализации первого этапа не будут доступны все распределенные энергетические ресурсы SAS-1 и SAS-2, в частности, на момент реализации решений не будут установлены ВЭУ и нагрузка SAS-2.

Основные технологические решения в рамках данного этапа:

1. REIDS Hub (SCADA + PMS) программно-аппаратное обеспечение, которое позволяет осуществлять автоматическое/ автоматизированное управление распределенными энергетическими ресурсами (активами) SAS и производить мониторинг данных учета электроэнергии, а также обеспечивает первичное регулирование в рамках SAS.
2. Платформа ØNDER, которая позволяет осуществлять автоматический учет и взаиморасчет за оказанные услуги по электроснабжению на основе реальных данных учета (полученных от REIDS Hub).
3. Система EMS, которая обеспечивает оптимизацию потребления электроэнергии на основании данных о стоимости электроэнергии от приложения «P2P-энергорынок» путем регулирования режимов работы энергетических активов посредством системы управления REIDS Hub.
4. Приложение «P2P-энергорынок», реализованное на базе платформы ØNDER, которое предоставляет возможность купли-продажи электроэнергии между пользователями (владельцами энергетических ресурсов). В рамках данного этапа приложение осуществляет только расчет стоимости электроэнергии и передает данные платформе ØNDER и AMIGO EMS.

Целевое видение. TE + IoT + NG

Реализация решения IDEA на данном этапе направлена на построение децентрализованной системы управления распределенными энергетическими ресурсами за счет реализации платформы IoT. Техническая реализация данного решения достигается путем установки на каждый актив SAS и MGO в целом устройства IDEA-Bot. Система приобретает децентрализованный характер управления за счет того, что каждое из устройств IDEA-Bot имеет встроенную интеллектуальную систему управления (программного агента). Данная система осуществляет управление распределенными энергетическими ресурсами, основываясь на информационной модели себя, своего окружения и системы в целом, и может согласовывать свои действия с окружением. Схе-

ма реализации архитектуры Интернета энергии в рамках целевого видения показана на Рисунке 11.

Реализация архитектуры IDEA направлена, кроме того, на демонстрацию полностью децентрализованного обеспечения статической и динамической устойчивости изолированной энергосистемы REIDS за счет установки на сетевую инфраструктуру REIDS следующих аппаратных компонент Neural Grid:

1. Энергетический хаб — устройство, обеспечивающее первичное регулирование, поддержание внутреннего энергетического баланса (в данном случае, энергетического баланса активов одного из SAS), статической и динамической устойчивости режима электропередачи;
2. Энергорouter — программно-технический комплекс, предназначенный для управления и распределения электроэнергии в распределительных сетях.

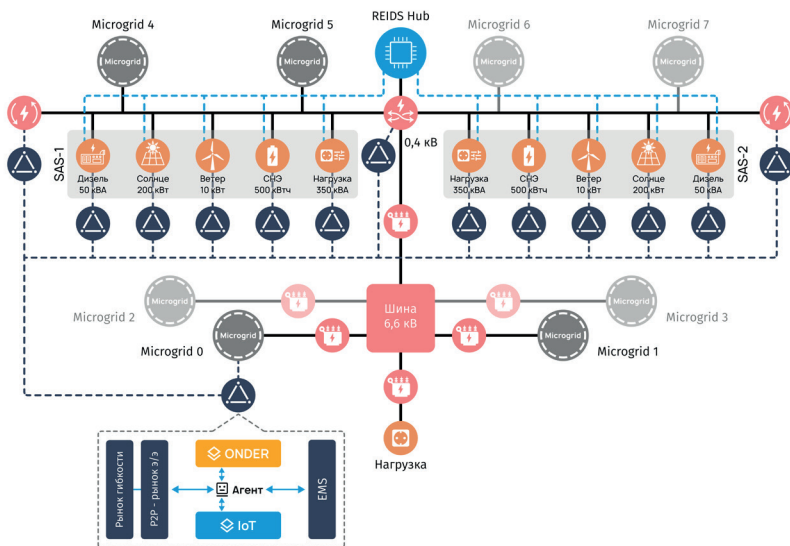


Рисунок 11. Целевая модульная архитектуры пилотного проекта реализации IDEA на полигоне REIDS

Основные технологические решения в рамках систем TE и IoT на данном этапе — следующие:

1. IDEA-Vot, который включает следующее программное обеспечение:
 - Программный агент — программное обеспечение, осуществ-

вляющее управление активами пользователя, исходя из пользовательских предпочтений (выбранных настроек) и расчета экономической целесообразности. Программный агент физически управляет активами через IoT (отправляя уставки), также обеспечивает финансовое взаимодействие (контрактацию, взаиморасчеты) с другими агентами через TE;

— IoT — программное обеспечение, которое на основе команд от программного агента преобразует их в конечные уставки и направляет на систему управления электроустановок;

— TE — программное обеспечение, которое на основе предварительных данных от программных агентов формирует и публикует смарт-контракты, а также производит контроль исполнения смарт-контрактов.

2. Платформа Φ NDER, которая позволяет осуществлять автоматический учет и взаиморасчет за оказанные услуги по электроснабжению на основе реальных данных учета.

3. Платформа IoT, которая позволяет осуществлять автоматическое/автоматизированное управление энергетическими активами SAS и мониторинг данных учета электроэнергии.

4. Приложение «P2P-энергорынок», которое предоставляет возможность купли-продажи электроэнергии (заключения смарт-контрактов) между пользователями (владельцами энергетических активов).

5. REIDS Hub — программно-аппаратное обеспечение, которое осуществляет контроль исполнения команд IDEA-Bot.

Верификация и стандартизация

Верификация в международном профессиональном сообществе

Верификация архитектуры Интернета энергии (IDEA) в международном профессиональном сообществе была проведена на следующих площадках:

1. Семинар «Workshop on Distributed Architecture» в Наньянском технологическом университете (NTU) с участием представителей университета и компаний EDF, Engie, Rolls-Royce — Сингапур, 16 мая 2019 года
2. Семинар «Workshop on Distributed Architectures in electric power

- systems» в рамках 17-й международной конференции IEEE по промышленной информатике INDIN-2019 — *Хельсинки, 22 июля 2019 года*
3. Азиатская конференция по энергетике и электрификации транспорта (АСЕПТ) в рамках Азиатского саммита по чистой энергетике (ACES) на Сингапурской международной энергетической неделе (SIEW) — *Сингапур, 31 октября 2019 года*
 4. 48-я Генеральная сессия Международного совета по большим электрическим системам (CIGRE) — *в онлайн-формате 15 июля 2020 года*

Стандартизация

На основе описанной архитектуры Интернета энергии были разработаны следующие проекты предварительных национальных стандартов (ПНСТ):

1. **Проект ПНСТ «Информационные технологии. Умная энергетика. Типовая архитектура Интернета энергии (IDEA — Internet of distributed energy architecture)»** вводит концептуальную модель Интернета энергии и устанавливает требования к его полезным свойствам, энергетическим транзакциям, компонентам, интерфейсам подключения электроустановок, информационной защищенности, а также рекомендации по модульной реализации архитектуры IDEA.
2. **Проект ПНСТ «Информационные технологии. Умная энергетика. Термины и определения»** устанавливает требования к понятийному аппарату и терминологии при разработке и описании практик цифровой энергетике и вводит в оборот понятийный аппарат архитектуры Интернета энергии.
3. Тексты проектов ПНСТ размещены на сайте Технического комитета 094 «Кибер-физические системы» по адресу http://tc194.ru/internet_of_energy_public

Варианты реализации архитектуры IDEA

Промышленный микрогрид

Архитектура Интернета энергии (IDEA) представляет коммерческие и промышленные микрогриды в качестве энергообъединений, в которых различные субъекты со своими энергоустановками ведут друг с другом энергетические транзакции и за счет этого оказывают друг другу различные услуги от продажи электроэнергии до регулирования качества электроэнергии. На Рисунке 12 представлена принципиальная схема устройства коммерческого или промышленного микрогрида в подходе Интернета энергии (IDEA). В него могут входить генераторы и промышленные потребители с различными источниками энергетической гибкости — управляемыми нагрузками (регулируемыми электроприемниками) и накопителями электроэнергии. Часть потребителей может не иметь источников гибкости. С точки зрения Интернета энергии, в таком микрогриде возникают экономические основания для формирования локального рынка электроэнергии и гибкости. На этом рынке объекты по производству электрической энергии продают эту энергию промышленным и коммерческим потребителям, а те в свою очередь могут предоставлять сервисы гибкости как этим генерирующим объектам, повышая эффективность их использования, так и друг другу, например, уступая в определенные часы потребляемую мощность. Интернет энергии выступает инфраструктурой такого рынка и технологического управления энергетикой микрогрида.

Преимущество реализации микрогрида в подходе Интернета энергии состоит в том, что за счет интероперабельности и масштабируемости, которые задает архитектура Интернета энергии, появляется возможность создавать легко масштабируемые коммерческие и промышленные микрогриды на базе электроустановок различных поставщиков. В таких микрогридах появляется возможность plug & play присоединения новых энергоустановок и новых субъектов, которая и обеспечивает легкое масштабирование и реконфигурацию микрогридов. Кроме того, архитектура Интернета энергии позволяет менять и расширять набор реализуемых приложений сервисов, а значит — без существенного изменения IT-инфраструктуры — вводить технологическую основу для новых моделей экономических отношений субъектов микрогрида.

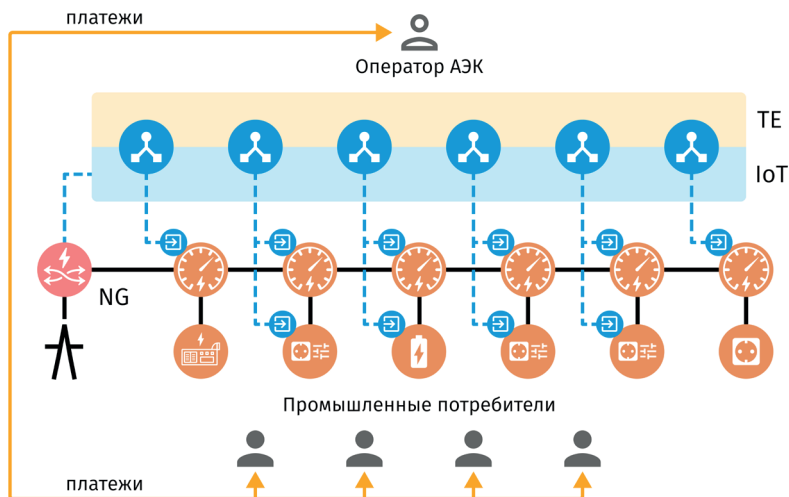


Рисунок 12. Промышленный микрогрид в подходе архитектуры Интернета энергии (IDEA)

Архитектура Интернета энергии (IDEA) определяет один из вариантов реализации управляемого интеллектуального соединения в микрогриде. Для реализации УИС согласно архитектуре Интернета энергии на границе микрогрида и сетевой компании должен быть установлен регулятор перетока мощности — энергетический роутер. Энергетический роутер служит элементом системы Neural Grid (NG) и обеспечивает локальное ограничение перетока мощности между микрогридом и сетью. Более того, в определенном диапазоне мощности энергетический роутер может регулировать величину перетока между микрогридом и сетью без увеличения выработки на генерации в микрогриде и без снижения потребления его субъектами.

Каждая группа энергоустановок и электроприемников в микрогриде должна быть снабжена программным агентом, который осуществляет энергетические транзакции с другими программными агентами. Программные агенты являются роботизированными представителями субъектов микрогрида — генераторов и потребителей. Программные агенты взаимодействуют с системами управления энергоустановок и электроприемников, а также друг с другом при помощи системы Интернета вещей (IoT). Энергетические транзакции фиксируются в форме смарт-контрактов в системе Transactive Energy (TE), в этой же системе их исполнение верифицируется (с использо-

вание связанных с IoT счетчиков) и производится процессинг и клиринг.

В такой реализации оператор микрогрида — это оператор инфраструктуры Интернета энергии в нем, оказывающий его субъектам услуги по обеспечению работы управляемого интеллектуального соединения и, например, локального рынка электроэнергии и гибкости.

Локальный рынок электроэнергии и гибкости представляет собой один из вариантов приложения сервиса, которые могут быть развернуты на базе Интернета энергии. Возможен и альтернативный вариант — разворачивание диспетчерских приложений типа EMS. При помощи соответствующих приложений сервисов, входящих в устройство УИС и разворачиваемых на базе Интернета энергии, микрогрид взаимодействует с сетевой компанией и гарантирующим поставщиком или сбытовой компанией.

Автоматическое управление спросом (Advanced Demand Response)

Вовлечение массовых потребителей в практики управления спросом сопряжено с существенными интеграционными и транзакционными издержками. Чем более мелким и массовым является потребитель, тем выше удельный и суммарный размер этих издержек. В числе этих издержек:

1. Капитальные затраты на превращение нагрузки потребителей из пассивной в удаленно управляемую;
2. Капитальные и операционные затраты на интеграцию потребителей и их нагрузки в информационно-управляющий контур практики управления спросом, как правило, контур агрегатора управления спросом, и обслуживание соответствующих информационных систем;
3. Капитальные и операционные затраты на интеграцию потребителей в информационные системы коммерческого учета, расчета и осуществления платежей;
4. Издержки посреднической деятельности, необходимой для осуществления («проведения») учетных, расчетных и платежных операций (транзакций), включая поверку и контроль показаний приборов учета, банковскую деятельность по клирингу, биллинг, обслуживанию расчетных и лицевых счетов и другие операции такого типа.

Эти издержки являются основным сдерживающим фактором при мас-

штабировании практик управления спросом и увеличении «глубины» их проникновения в управление энергосистемой.

Интернет энергии (IDEA) призван обеспечить легкую и быструю масштабируемость новых энергетических практик. Эти качества реализации управления спросом в архитектуре Интернета энергии достигаются за счет установки у конечных потребителей достаточно унифицированного средства присоединения к Интернету энергии — «агента IDEA» — представляющего собой управляющую приставку с соответствующим программным обеспечением (см. Рисунок 13).

«Агент IDEA» за счет встроенных портов и протоколов из числа используемых для формирования Интернета вещей (IoT) получает доступ к конечному оборудованию потребителя — системам управления нагрузкой, «умным» розеткам и всей технике, которая в принципе является управляемой нагрузкой.

Также «агент IDEA» содержит систему подключения к транзакционной системе и персональный «кошелек» агрегируемого потребителя, обеспечивая осуществление всей учетно-расчетной и платежной деятельности без посредников.

Ядром «агента IDEA» является собственно программный агент — «представитель» потребителя, получающий запросы от агрегатора управления спросом. Функцией этого программного агента является принятие решения по участию в событии управления спросом согласно выбранным потребителям профилям участия в сервисе управления спросом и превращение принятых к исполнению запросов агрегатора в команды для систем управления интегрированных в управление нагрузок. Этот же программный агент инициирует учет факта и величины участия в событии управления спросом, расчеты по этому факту и исполнение платежа за участие в этом факте.

Таким образом, при реализации практики управления спросом на основе архитектуры Интернета энергии масштабирование этой практики упрощается, а с точки зрения агрегируемого потребителя электрической энергии его вовлечение в практику управления спросом сводится к следующему набору элементарных операций:

1. Покупка управляющей приставки (заказ в Интернете с доставкой);
2. Подключение управляющей приставки (самостоятельно или силами специалиста);
3. Выбор на маркетплейсе и установка приложения (App), поставляемого агрегатором;

4. Регистрация в приложении (App), выбор типа сервиса (или профиля участия);
5. Наблюдение за самостоятельной работой сервиса через приложение;
6. Установка новых приложений, автоматическое получение обновлений.

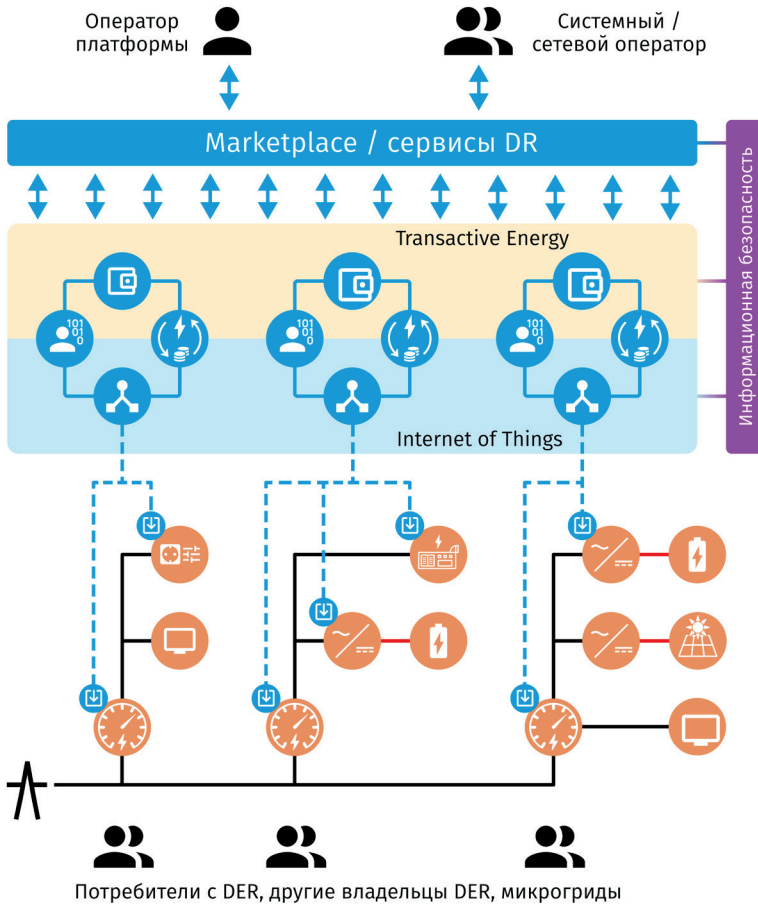


Рисунок 13. Система автоматического управления спросом (advanced demand response) в подходе архитектуры Интернета энергии (IDEA)

Заключение

Описанная в настоящем докладе архитектура Интернета энергии (IDEA) находится на стадии перехода к созданию на ее базе коммерческих продуктов, в том числе воплощающих отдельные подсистемы и элементы архитектуры, и пилотной реализации на энергетических объектах с использованием этих продуктов.

Тем не менее, в разработке архитектуры Интернета энергии (IDEA) остается немало вопросов, пока что не получивших свои окончательные ответы.

Наиболее сложным вопросом реализации архитектуры Интернета энергии (IDEA) является обеспечение возможности plug & play присоединения новых энергетических ячеек (новых пользователей) в распределенной энергосистеме с сетью переменного тока. В этом случае возникают существенные сложности с согласованностью работы силовых интерфейсов (инверторов, роутеров), через которые эти ячейки присоединены к сетям, и сложности с формированием единого устойчивого режима электропередачи. Эти вопросы требуют глубоких теоретических исследований и практических, технологических разработок, которые идут в настоящее время в МЭИ, МФТИ и Сколтехе.

Другой важный и непростой вопрос реализации архитектуры Интернета энергии (IDEA) — обеспечение действительно широкой интероперабельности работы Интернета энергии (программных агентов, приложений сервисов) с огромным множеством разнотипных электроустановок и другого оборудования, которое стоит в энергетических ячейках различных пользователей. Возможно, в ответе на этот вопрос поможет стандартизация информационных межсоединительных устройств и протоколов обмена данными, которую ведет IEEE, а также появление и распространение стандартов Интернета вещей (IoT).

Реализация пилотных проектов, основанных на архитектуре Интернета энергии (IDEA), и продолжение исследований и разработок в консорциумах и партнерствах, созданных для продвижения и реализации архитектуры Интернета энергии (IDEA), позволят приблизиться к ответам на эти вопросы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Архитектура Интернета энергии. Internet of Distributed Energy Architecture. White paper (preliminary version) — М.: Инфраструктурный центр «Энерджинет», 2018
2. Активные энергетические комплексы — первый шаг к промышленным микрогридам в России. Экспертно-аналитический доклад.— М.: Инфраструктурный центр «Энерджинет», 2020
3. Baer W.S., Hassel S., Vollaard B.A. Electricity Requirements for a Digital Society — RAND Corporation, 2002 (https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1617.html)
4. Morley J., Widdicks K., Hazas M. Digitalization, energy, and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption.— Energy Research & Social Science, № 38, 2018, pp. 128–137
5. Eyre N. Energy demand in the energy transition.— Energy World, № 479, 2019, pp. 14–15
6. Engel H., Hensley R., Knupfer S., Sahdev S. The potential impact of electric vehicles on global energy systems.— McKinsey & Company, 2018 (<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-global-energy-systems#>)
7. Распределенная энергетика в России: потенциал действия.— Московская школа управления «Сколково», 2018
8. Электроэнергия для промышленности в Европе и США в 2019 году подешевела, а в России подорожала в два раза выше инфляции.— Ассоциация «НП Сообщество потребителей», 2020 (<https://www.np-ace.ru/news/partnership/1466/>)
9. GB power system disruption on 9 August 2019. Energy Emergencies Executive Committee (E3C): Final report.— H. M. Government Department of Business, Energy & Industrial Strategy, 2020

Список рисунков

Рисунок 1. Сравнение принципов построения централизованной и децентрализованной энергосистем	11
Рисунок 2. Концептуальная модель Интернета энергии	19
Рисунок 3. Схематическое представление архитектуры Интернета энергии (IDEA).....	31
Рисунок 4. Компонентная архитектура системы Transactive Energy (TE)	39
Рисунок 5. Компонентная архитектура системы Internet of Things (IoT)	41
Рисунок 6. Компонентная архитектура системы Neural Grid (NG).....	43
Рисунок 7. Типовые модели построения Интернета энергии — варианты объединения энергетических ячеек.....	47
Рисунок 8. Состав и возможные перетоки мощности в демонстрационном комплексе Интернета энергии	49
Рисунок 9. Модульная схема демонстрационного комплекса Интернета энергии	51
Рисунок 10. Модульная архитектура пилотного проекта реализации IDEA на полигоне REIDS на первом этапе	61
Рисунок 11. Целевая модульная архитектуры пилотного проекта реализации IDEA на полигоне REIDS	63
Рисунок 12. Промышленный микрогрид в подходе архитектуры Интернета энергии (IDEA)	67
Рисунок 13. Система автоматического управления спросом (advanced demand response) в подходе архитектуры Интернета энергии (IDEA).....	70

Список таблиц

Таблица 1. Типология энергетических ячеек.....	34
Таблица 2. Роли энергетических ячеек в энергетических транзакциях.....	35
Таблица 3. Типы интерфейсов между энергетическими ячейками и Интернетом энергии.....	45
Таблица 4. Модульная реализация системы IoT в демонстрационном комплексе Интернета энергии	54
Таблица 5. Модули системы Neural Grid (NG)	55

Архитектура Интернета энергии (IDEA)

Версия 2.0

Руководитель проекта Д. В. Холкин
Ответственный редактор И. А. Чаусова, И. С. Чаусов
Технический редактор В. В. Южаков
Оформление И. А. Бурдин, В. В. Южаков

Инфраструктурный центр «Энерджинет»
e-mail: info@internetofenergy.ru
home-page: idea-go.tech

Издатель
Д. В. Холкин. e-mail: dvh@internetofenergy.ru

Подписано в печать 14.04.2021

Формат А5

Тираж 100 экз.

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами в
ООО «Компания «ЛАБ ПРИНТ»

Telegram канал [Internet of Energy](https://t.me/InternetofEnergy)



INTERNETOFENERGY 