

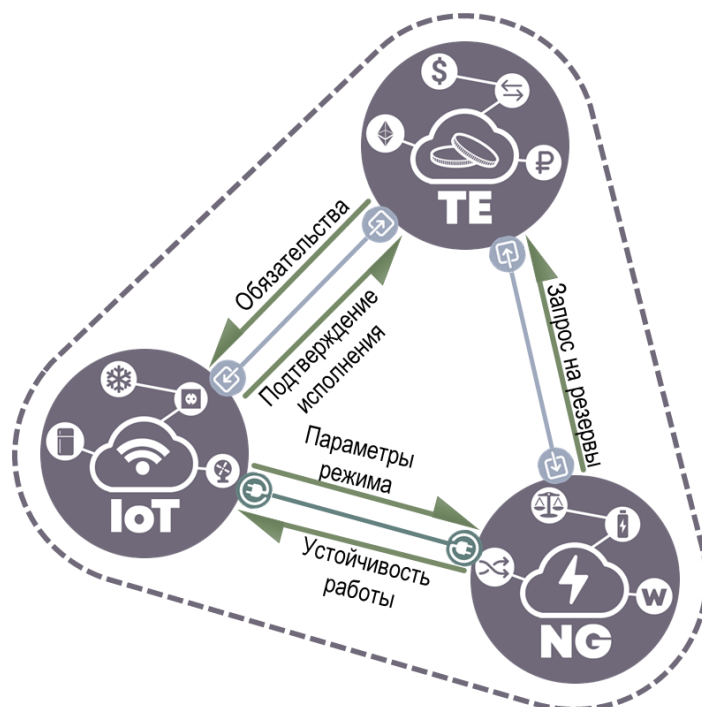
Энерджинет

Национальная
технологическая
инициатива



ЦЕНТР СТРАТЕГИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК
«СЕВЕРО-ЗАПАД»

Архитектура Интернета энергии (Internet of Distributed Energy Architecture)



White Paper 2018

Подготовлено Центром Развития Цифровой Энергетики
в рамках мероприятий «Энерджинет» Национальной Технологической Инициативы

АВТОРСКИЙ КОЛЛЕКТИВ

Дмитрий Холкин, директор центра развития цифровой энергетики Фонда «ЦСР «Северо-Запад»

Игорь Чаусов, ведущий аналитик центра развития цифровой энергетики Фонда «ЦСР «Северо-Запад»

Илья Бурдин, аналитик центра развития цифровой энергетики Фонда «ЦСР «Северо-Запад»

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив благодарит за активное участие в обсуждении предварительной референтной архитектуры, а также за ценные и содержательные замечания И.Л. Озерных (МФТИ), А.А. Волошина (МЭИ), Е.А. Волошина (МЭИ), А.Р. Вериги (РТСофт), В.В. Дорофеева (независимый эксперт), Ю.В. Васильева (МФТИ), В.Н. Попова (МФТИ), Р.В. Неуступкина (АО «РАСУ»), К.А. Дацко (НТЦ «ЕЭС»), В.В. Софьина (ПАО «Россети»), А.Г. Старченко (Сообщество потребителей энергии), Б.А. Бокарева (ОАО Техснабэкспорт), А.А. Неберу (РТСофт), И.Ю. Ряпина (Сообщество потребителей энергии), С.В. Роженко (ARUP), Д.А. Корева (АО «РВК»), Е.А. Сальникову (АО «РВК»), С.П. Ковалева (ИПУ РАН), С.С. Укустова (ONDER), И.В. Данилина (ИМЭМО РАН), К.А. Скурихину (РТСофт), А.С. Толпыгина (РТСофт), А.В. Субботина (РТСофт), Д.М. Ильина (РТСофт), Н.Г. Шубина (РТСофт), А.В. Рыбушкину (Фонд «ЦСР «Северо-Запад»), А.И. Тertyшную (Фонд «ЦСР «Северо-Запад»), Я.Е. Писаренко (ООО «Современные Технологии»), Р.Р. Габитова (ООО «Современные Технологии», ONDER), а также всех принимавших участие в экспертных сессиях и заседаниях Архитектурно-Технологического комитета.

Содержание

1	Ключевые тезисы	Ошибка! Закладка не определена.
2	Понятие Интернета энергии	7
2.1	Цели построения архитектуры Интернета энергии.....	7
2.2	Интернет энергии и «энергетический переход»	8
2.3	Концептуальная модель Интернета энергии.....	11
3	Сценарии использования архитектуры Интернета энергии	15
3.1	Основные use cases	16
4	Архитектурный фреймворк Интернета энергии.....	19
4.1	Интернет энергии для разных стран мира.....	19
4.2	Архитектура Интернета энергии и ее компоненты	22
4.3	Архитектурные принципы построения Интернета энергии.....	41
4.4	Базовые модели реализации архитектуры Интернета энергии	42

1 Основные положения

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

Большой потенциал повышения эффективности энергоснабжения потребителей раскрывается за счет развитие **распределенной энергетики**, дополняющей существующую централизованную энергетическую систему. Распределенная энергетика основана на идее вовлечения распределенной генерации и ресурсов потребителей в управление электроэнергетическими системами с достижением эффекта роста совокупной эффективности работы. Но на пути развития распределенной энергетики встают барьеры резкого роста транзакционных издержек. **Транзакционные издержки** распределенной энергетики связаны с пропорциональным числу участников такой энергетики издержками осуществления экономических отношений между ними, затратами на их информационную интеграцию в контуры управления, а также затратами на интеграцию их оборудования в электрические сети, при которой энергосистема не потеряла бы в устойчивости и надежности работы. Снятие этих издержек – ключевая задача новой архитектуры, поэтому она должна обладать тремя ключевыми свойствами: должна быть **транзакционной** и поддерживать многочисленные быстрые транзакции между пользователями, **интеллектуальной**, то есть поддерживать plug&play присоединение к контурам управления, и быть **устойчивой и гибкой**, поддерживая plug&play присоединение к электрическим сетям с поддержанием устойчивости системы.

Существуют три профиля задачи на построение распределенной электроэнергетики ближайшего будущего, которые должен решать Интернет энергии:

- **Энергетика для неосвоенных территорий:** доступное дешевое энергоснабжение;
- **Энергетика для новой урбанизации и индустриализации:** надежное энергоснабжение с приемлемым качеством;

- **Энергетика для «цифрового» общества:** экологически чистое энергоснабжение с высоким и дифференцированным качеством.

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

Энергетическая транзакция – акт технического и экономического взаимодействия между пользователями и их оборудованием, при котором осуществляется согласованное управление параметрами работы этого оборудования, за счет чего один из пользователей приобретает некоторое полезное качество, ценность, а другой пользователь получает оплату за эту ценность. Энергетическая транзакция представляет собой единство трех взаимодействий между пользователями и их оборудованием: финансово-договорного, информационно-управляющего и физического, электрического.

Пользователями Интернета энергии могут быть владельцы любого электроэнергетического оборудования, которое может производить (генерировать), накапливать (аккумулировать) и потреблять электроэнергию, а также субъекты, оказывающие владельцам электроэнергетического оборудования различные услуги.

Пулы электроэнергетического оборудования пользователей Интернета энергии, имеющего общую точку присоединения к электрическим сетям и информационным каналам, обеспечивающим связь с Интернетом энергии, образуют структурную единицу Интернета энергии – **энергетическую ячейку**. Интернет энергии представляет собой сеть энергетических ячеек и обеспечивает их связь и взаимодействие друг с другом.

В целях роботизированного оказания и получения услуг пользователи Интернета энергии обращаются к **приложениям (App)** – сервисным программам, самостоятельно выстраивающим взаимодействие между энергетическими ячейками за счет формирования наборов энергетических транзакций для реализации тех или иных услуг.

В Интернете энергии возможны два типа энергетических транзакций: **peer-to-peer** транзакции, осуществляемые между двумя пользователями Интернета энергии, и **peer-to-operator** транзакции, осуществляемые между пользователем Интернета энергии и оператором пользовательского приложения.

Архитектура Интернета энергии строится на объединении трех систем:

- Системы формирования, контроля исполнения и оплаты смарт-контрактов **Transactive energy (TE)**;

- Системы межмашинного взаимодействия и обмена управляющими воздействиями между энергетическими ячейками и энергетическим оборудованием **Internet of Things (IoT)**;
- Системы режимного управления, поддержания баланса мощности и обеспечения статической и динамической устойчивости энергосистемы **Neural Grid (NG)**.

В зависимости от возможностей по управлению потоком мощности и роли в производстве и потреблении электрической энергии выделяются **пять возможных типов** энергетических ячеек: просьюмер, маневренный генератор, стохастический генератор, активный потребитель, пассивный потребитель.

К числу необходимых и обязательных компонент Интернета энергии относятся

- **Цифровые управляемые силовые интерфейсы** – кибер-физические устройства, устанавливаемые на границах энергетических ячеек в местах их присоединения к электрическим сетям или друг к другу, объединяющие функции интерфейсов систем ТЕ, IoT и NG, и обеспечивающие за счет этого физическую реализацию и измерительный контроль энергетических транзакций;
- **Платформа транзакций** – цифровая среда взаимодействия аватаров друг с другом и с приложениями;
- **IoT платформа** – цифровая среда взаимодействия приложений, систем управления силовых интерфейсов, сенсоров и актуаторов друг с другом.

2 Понятие Интернета энергии

2.1 Цели построения архитектуры Интернета энергии

Традиционная – централизованная – архитектура построения электроэнергетических систем в значительной степени исчерпала свой потенциал эффективности и в условиях новых вызовов, стоящих перед энергетикой в разных странах мира, не может считаться более эффективным и оптимальным вариантом устройства энергетики.

Наиболее значимыми вызовами развития электроэнергетики сегодня являются:

- Изменение характера спроса потребителей: рост разнообразия этих требований и переход к «цифровому» спросу;
- Падение эффективности: низкая загрузка имеющихся сетевых и генерирующих мощностей и рост издержек работы энергосистем;
- «Энергетический переход» (декарбонизация, децентрализация, дигитализация): быстрое распространение ВИЭ, распределенной энергетики, новых бизнес-моделей и сервисов, базирующихся на использовании цифровых технологий;
- Освоение незаселенных и инфраструктурно неразвитых территорий: потребность в эффективном энергоснабжении удаленных и изолированных территорий.

Ключевая проблема развития энергетики в контексте этих вызовов состоит в том, что энергосистемы с существующей архитектурой ответить на них без существенного роста издержек и снижения системной эффективности не могут. Усиливающийся тренд на применение ВИЭ только усугубляет данную проблему, приводя к снижению КИУМ источников энергии и росту потребности в пиковых и резервирующих мощностях.

Решающую роль на ближайшем шаге развития электроэнергетики будет играть распределенная энергетика. Малая генерация, системы накопления энергии, регулируемая нагрузка конечных потребителей, интегрированные между собой и с централизованной энергосистемой, представляют собой неиспользованный до сих пор ресурс для повышения эффективности энергосистем и потому являются подходящим решением поставленной проблемы. Распределенная энергетика повышает эффективность энергосистемы за счет снижения потребности в присоединенной мощности, появления локальных самобалансирующихся объединений генераторов и потребителей малой мощности, масштабного вовлечения массы небольших, но многочисленных энергетических активов конечных пользователей в процессы управления энергосистемой. Таким образом, указанным вызовам наилучшим образом отвечает энергосистема, обладающая способностью к plug&play-интеграции новых пользователей и децентрализованному управлению большим множеством распределенных энергетических объектов.

Но в существующей архитектуре энергетики масштабное развитие распределенной энергетики сталкивается с ростом издержек:

- транзакционные издержки экономических отношений, растущие при росте числа участников транзакций,
- издержки и высокие капитальные затраты на информационную интеграцию оборудования в контуры управления,
- высокие капитальные и инжиниринговые затраты на интеграцию оборудования в электрические сети, издержки обеспечения системной устойчивости.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы предложить такую архитектуру распределенной энергетики, в которой эти издержки снимались бы или сводились к минимуму, а сама распределенная энергетика позволяла бы повысить эффективность работы энергосистем в целом.

Энергосистема, построенная по новой архитектуре, должна стать:

- **Транзакционной:** экономическое взаимодействие между пользователями должно осуществляться на основе p2p-транзакций, позволяющих реализовать многообразие пользовательских ролей и сервисов, предоставляющих им кастомизированные ценности;
- **Интеллектуальной:** должна быть обеспечена легкость интеграции (plug&play) энергетических устройств пользователей в контуры роботизированного управления различных сервисов;
- **Устойчивой и гибкой:** должна быть обеспечена легкость технического соединения устройств с сетью по принципу plug&play при гарантированном поддержании статической и динамической устойчивости работы системы с большим количеством влияющих друг на друга устройств пользователей.

Пользователь такой системы (различного масштаба) через интерфейсы интегрируется в нее и становится полноценным участником новых сервисов и бизнес-моделей. Он может совершать транзакции, приводящие к согласованным действиям энергетических устройств, и при этом будет обеспечена оптимальность совместной работы, а также устойчивость энергосистемы.

2.2 Интернет энергии и «энергетический переход»

Интернет энергии – тип децентрализованной электроэнергетической системы, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее пользователями.

Интернет энергии как новая архитектура электроэнергетики выступает системно-техническим ответом на происходящий в мире «энергетический переход» (energy transition) – процесс принципиального изменения структуры, состава и характера энергетических систем. Энергетический переход выражается в сочетании следующих групп факторов:

- увеличении разнообразия (диверсификации) и качественном изменении требований пользователей электроэнергетических систем к работе этих систем;
- изменении технологического состава и характера объектов генерации электрической энергии, изменении соотношения типов генерации в энергетических балансах;
- появлении новых типов электроэнергетического оборудования, открывающих пользователям энергосистем технологические возможности для реализации как принципиально новых, так и ранее недоступных этим пользователям функций в энергосистемах;
- распространении новых технологических возможностей интеллектуального управления энергосистемами и снижения транзакционных издержек в экономических взаимоотношениях пользователей энергосистем.

Общепринятым является описание «энергетического перехода» в терминах «3-D»: декарбонизации, децентрализации и дигитализации.

Decarbonization («декарбонизация») – переход к экологически чистой «безуглеродной» (не сопровождающейся выбросами парниковых газов, в частности, диоксида углерода) экономике и энергетике, проявляющийся в трех основных факторах:

- увеличении доли ВИЭ в энергетическом балансе стран и их объединений;
- максимально возможном отказе от применения любых технологий, в которых формируются выбросы парниковых газов, в частности, угольной генерации, газового отопления, двигателей внутреннего сгорания;
- увеличении доли электрического транспорта, в первую очередь, частных электромобилей.

В условиях близких к полному освоению потенциала гидроэнергетических источников в развитых экономиках, рост доли ВИЭ в энергетическом балансе определяется, в основном, солнечной и ветровой энергетикой, а также, в меньшей степени, потреблением биотоплива и использованием твердых бытовых отходов (ТБО).

Decentralization («децентрализация») – переход к территориально распределенной электроэнергетике с большим числом разноуровневых генераторов и потребителей, выражающийся в следующих факторах:

- росте доли распределенной, то есть присоединенной к распределительным сетям, относительно маломощной разнообразной по своему характеру генерации от крышных солнечных панелей до мини-ТЭЦ;
- появлении просьюмеров – нового типа субъектов электроэнергетики, присоединенных к распределительным сетям, которые в зависимости от условий меняют роль, являясь то генератором, то потребителями электроэнергии;
- появлении активных потребителей, обладающих возможностью гибко, в том числе по удаленным командам, изменять профиль своего потребления из сети;
- появлении у конечных потребителей электроэнергии и других субъектов электроэнергетики возможности эффективно участвовать в режимном управлении энергосистемами.

Digitalization («дигитализация») – переход к повсеместному применению в электроэнергетике цифровых управляемых устройств, подключенных к информационным сетям Интернета, на всех уровнях энергосистемы от устройств генераторов и электрических сетей до устройств конечных, в том числе бытовых, потребителей электроэнергии, что обеспечивает возможность реализации интеллектуального управления энергосистемами, основанного на межмашинном (M2M, IoT) взаимодействии.

Реализованная в существующих энергосистемах разных стран мира архитектура централизованной энергетики с однонаправленными потоками электроэнергии от сосредоточенной генерации к распределенным потребителям, единым иерархичным рынком электроэнергии и мощности, централизованным диспетчерским управлением и унифицированными до уровня стандартизации ролями в энергосистеме, а также регламентированными уровнями качества электроснабжения, не способна эффективно удовлетворить новым разнообразным и динамически меняющимся требованиям пользователей. В рамках централизованной архитектуры не могут быть построены энергосистемы, способные одновременно эффективно и надежно функционировать в условиях реализации описанных трендов «энергетического перехода».

Удовлетворить указанным требованиям сможет только распределенная электроэнергетика с децентрализованным управлением и рынками, а также широким вовлечением всех пользователей энергосистем в процесс управления ими в целях экономически оптимального, гибкого, качественного и надежного энергоснабжения. Интернет энергии является архитектурным, системно-техническим ответом на вызов построения такой энергетики.

2.3 Концептуальная модель Интернета энергии

Интернет энергии – тип децентрализованной электроэнергетической системы, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее пользователями.

Под интеллектуальным понимается управление системой, реализованное за счет межмашинного взаимодействия между ее элементами, при котором каждый элемент может самостоятельно принимать решение о реализации того или иного режима своей работы и воздействии на систему, поскольку опирается на информационную модель себя, своего окружения и системы, и может согласовывать свои действия с окружением.

Отличительными чертами Интернета энергии являются:

- децентрализованный характер энергосистемы, в которой на уровне распределительных сетей присутствует как большое число распределенных потребителей, так и большое число распределенных производителей электроэнергии;
- наличие двунаправленных потоков мощности и возможности динамического изменения пользователями роли в энергосистеме;
- наличие между электроэнергетическим оборудованием не только электрических связей и взаимодействия, обеспечиваемых электрическими сетями, но также информационных связей и взаимодействия;
- реализация полностью децентрализованного интеллектуального управления, которое осуществляется за счет межмашинного (M2M) взаимодействия;
- наличие децентрализованного рынка, на котором заключаются peer-to-peer контракты как на куплю-продажу электроэнергии, так и на оказание системных услуг;
- реализация всех процессов и управление ими при помощи прямых транзакций между пользователями.

Таким образом, Интернет энергии – это peer-to-peer электроэнергетика, в которой взаимодействие между производителями и потребителями электроэнергии, торговля электроэнергией и различными услугами, а также режимное управление энергосистемой осуществляются за счет прямых транзакций между пользователями.

Концептуальная модель Интернета энергии опирается на представление об «энергетическом облаке» (Energy Cloud), или «облачной энергетике» (Рисунок 1), введенном аналитиками компании Navigant Research.



Рисунок 1. Концептуальная модель Интернета энергии как «облачной энергетики» (Energy Cloud). Источник: Navigant Research.

Согласно этому представлению, Интернет энергии является экосистемой технически и экономически взаимосвязанных пользователей. **Пользователями** Интернета энергии могут быть владельцы любого электроэнергетического оборудования, которое может производить (генерировать), накапливать (аккумулировать) и потреблять электроэнергию, а также субъекты, оказывающие владельцам электроэнергетического оборудования различные услуги. Это означает, что к пользователям Интернета энергии относятся распределенная генерация, собственная генерация потребителей электроэнергии (в том числе домохозяйства с генерирующими мощностями), накопители электроэнергии (в том числе потребители с накопителями и электромобили), а также промышленные, коммерческие и бытовые потребители электроэнергии со своими системами электроснабжения.

Пулы электроэнергетического оборудования пользователей Интернета энергии, имеющего общую точку присоединения к электрическим сетям и информационным каналам, обеспечивающим связь с Интернетом энергии, образуют структурную единицу Интернета энергии – **энергетическую ячейку**. Вне зависимости от состава и сложности своей внутренней структуры, в Интернете энергии энергетическая ячейка взаимодействует с другими энергетическими ячейками как единое целое.

Пользователи Интернета энергии при помощи своих энергетических ячеек могут играть различные динамически меняющиеся роли в энергосистеме, оказывая друг другу различные услуги. Услугами, которые пользователи Интернета энергии оказывают друг другу, могут быть продажа (поставка) электрической энергии, участие в режимном управлении (в том числе участие в поддержании частоты и уровня напряжения), предоставление энергетического оборудования в аренду или временное удаленное

пользование, обеспечение резерва мощности на загрузку и разгрузку и любые другие виды услуг, которые создаются в электроэнергетике.

Взаимодействие пользователей Интернета энергии, в ходе которого они оказывают друг другу услуги, и взаимодействие соответствующих энергетических ячеек осуществляется за счет **энергетических транзакций**. Энергетическая транзакция, схема которой приведена на Рисунке 2, – это такой акт технического и экономического взаимодействия между пользователями и соответствующими энергетическими ячейками, при котором осуществляется согласованное управление параметрами работы энергетических ячеек, за счет чего один из пользователей (одна сторона энергетической транзакции) приобретает некоторое полезное качество, ценность, а другой пользователь (другая сторона энергетической транзакции) получает оплату за эту ценность.



Рисунок 2. Энергетическая транзакция в Интернете энергии (Internet of Energy).
Источник: ЦСР Северо-Запад

В экономической науке транзакции трактуются как отчуждение и присвоение прав собственности на актив (Дж. Коммонс). Таким образом, энергетическая транзакция – это временное отчуждение прав собственности на энергетическую ячейку одной стороной транзакции и их присвоение другой стороной транзакции, в ходе которого эта сторона получает для своей энергетической ячейки связанное с энергоснабжением полезное свойство (ценность), обеспечиваемое энергетической ячейкой другой стороны, и оплачивает его этой стороне.

Энергетическая транзакция представляет собой единство трех взаимодействий между пользователями и энергетическими ячейками: финансово-договорного, информационно-управляющего и физического, электрического. Во-первых, осуществляется договорное и финансовое взаимодействие в виде смарт-контракта – контракта, заключение, исполнение, верификация исполнения и оплата по которому осуществляются автоматически. Во-вторых, в рамках энергетической транзакции между энергетическими ячейками происходит информационное взаимодействие, в ходе которого происходит обмен данными и командами, по результатам которого возникает согласованное управление режимом работы (состоянием) этих энергетических ячеек для исполнения энергетической транзакции. Наконец, в-третьих, происходит собственно электрическое взаимодействие ячеек, в ходе которого энергетические ячейки осуществляют согласованную работу. Предметом согласования работы энергетических ячеек являются направления и значения потоков активной и/или реактивной мощности, которые генерируют или потребляют энергетические ячейки.

Энергетические транзакции выступают строительными блоками для услуг, которые оказывают друг другу пользователи Интернета энергии. В целях роботизированного оказания и получения этих услуг пользователи Интернета энергии обращаются к **приложениям** Интернета энергии. Приложения – сервисные программы, самостоятельно выстраивающие взаимодействие между энергетическими ячейками за счет формирования наборов энергетических транзакций для реализации тех или иных услуг. Приложения обеспечивают взаимодействие между пользователями Интернета энергии и оказание ими услуг друг другу без транзакционных издержек, которые эти пользователи понесли бы, оказывая услуги друг другу напрямую.

Приложения, формируя наборы энергетических транзакций за пользователей Интернета энергии, сами оказывают этим пользователям различные услуги. Таким образом, на peer-to-peer рынке Интернета энергии выстраивается следующий рыночный слой пользовательских сервисов.

Взаимодействие пользователей Интернета энергии и соответствующих энергетических ячеек с централизованной энергосистемой и ее субъектами, находящимися за границами Интернета энергии, также осуществляется при помощи приложений, оказывающих соответствующую услугу. В этом случае приложения формируют одностороннюю энергетическую транзакцию между пользователем и **оператором** приложения. Оператор приложения играет роль посредника, с одной стороны, взаимодействующего за счет энергетических транзакций с пользователями Интернета энергии, с другой стороны, работающего с субъектами централизованной энергетики –

системными и сетевыми компаниями, субъектами единого рынка электроэнергии и мощности – по ее правилам.

Множество происходящих в Интернете энергии энергетических транзакций между энергетическими ячейками формирует мультиагентное децентрализованное экономическое и технологическое управление энергосистемой Интернета энергии. Согласованная работа энергетических ячеек за счет сбалансированных рыночных взаимоотношений пользователей придает Интернету энергии характер экосистемы.

3 Сценарии использования архитектуры Интернета энергии

Основным принципом работы Интернета энергии является реализация всех возможных сервисных приложений и осуществление всех возможных услуг, как пользователями и соответствующими энергетическими ячейками в адрес друг друга, так и пользователями в адрес субъектов централизованной энергетики, посредством энергетических транзакций.

В наиболее детальной теоретической трактовке экономической транзакции, предложенной новой институциональной экономикой, транзакция рассматривается как форма передачи прав собственности. Транзакция характеризуется последовательностью типовых этапов:

- поиск информации об имеющихся предложениях на товар (продавцы, цена, качество);
- проведение торгов между участниками – установление параметров контракта;
- заключение контракта между участниками;
- надзор за соблюдением условий контракта;
- обеспечение выполнения контракта, разрешение споров.

Данная последовательность свойственна и для энергетических транзакций с тем отличием, что при выполнении энергетической транзакции важным аспектом является проверка физической реализуемости транзакции и изменение состояния энергетических ячеек.

Энергетические транзакции в системе Интернета энергии выступают элементарными актами взаимодействия и строительными блоками для работы пользовательских приложений. Это означает, что для разработки архитектуры Интернета энергии достаточно учета сценариев использования (use cases), состоящих в осуществлении энергетических транзакций, и вспомогательных (инфраструктурных) сценариев использования (use cases), минимально необходимых для запуска энергетических транзакций.

В силу того, что в Интернете энергии действуют два типа субъектов – пользователи Интернета энергии и операторы пользовательских приложений, – возможны два типа энергетических транзакций:

- **peer-to-peer** транзакции (p2p), осуществляемые между двумя пользователями Интернета энергии;
- **peer-to-operator** транзакции (p2o), осуществляемые между пользователем Интернета энергии и оператором пользовательского приложения.

Вспомогательные (инфраструктурные) сценарии использования (use cases) включают операции, необходимые для подключения к системе Интернета энергии необходимых для совершения энергетических транзакций элементов и актуализации информации об их состоянии:

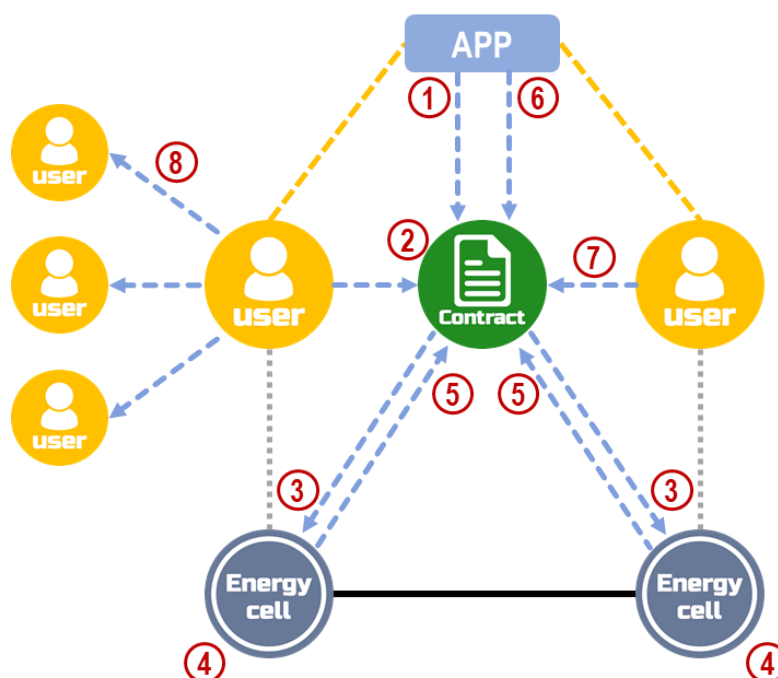
- регистрация пользователя;
- регистрация энергетической ячейки;
- регистрация сервисного приложения.

3.1 Основные use cases

3.1.1 P2P (peer-to-peer) энергетическая транзакция

Назначение:

Изменение состояния энергетических ячеек (изменение размера передаваемой в сеть или получаемой электроэнергии из сети по обговоренному графику мощности) для исполнения договоренностей между пользователями.



Алгоритм реализации:

Шаг 1. Определена пара участников транзакции и составлен проект контракта.

Приложение на основе заявок от пользователей определяет пару пользователей для выполнения транзакции. На основе условий р2р-транзакции от пользователей формируется проект контракта и отправляется пользователям.

Шаг 2. Заключен контракт между пользователями.

Пользователи подписали контракт, содержащий условия р2р-транзакции (правила изменения состояния энергетических ячеек и основные условия выполнения).

Шаг 3. Получена информация энергетической ячейкой об условиях р2р-транзакции.

Энергетическая ячейка получает информацию об условиях р2р-транзакции для осуществления физических изменений состояния. Преобразование информации об условиях р2р-транзакции и передача ее энергетической ячейке определяется вариантом реализации архитектуры.

Шаг 4. Осуществлено изменение состояния энергетических ячеек.

Энергетические ячейки изменяют состояние в соответствии с условиями р2р-транзакции – осуществляется корректировка выдаваемой и/или потребляемой электрической мощности в течение времени реализации контракта.

Шаг 5. Получена информация о результатах исполнения контракта между пользователями.

В приложении отображены фактические данные об изменении состояний энергетических ячеек.

Шаг 6. Произведен расчет фактических обязательств пользователей

Приложение на основании условий контракта и фактических данных о результатах исполнения производит расчет обязательств пользователей.

Шаг 7. Закрыты финансовые обязательства между пользователями.

Пользователи обмениваются цифровыми финансовыми активами для закрытия обязательств по результатам выполнения контракта.

Шаг 8. Распределение цифровых финансовых активов между пользователями-собственниками энергетической ячейки.

В случае наличия нескольких совладельцев энергетической ячейки (пользователей, по отношению к которым имеются финансовые обязательства), осуществляется перераспределение цифровых финансовых активов между остальными совладельцами энергетическими ячейками на основании правил владения.

3.1.2 P2O (peer-to-operator) энергетическая транзакция

Назначение:

Изменение состояния энергетических ячеек (изменение величины выдаваемого в сеть и/или потребляемого из сети потока мощности согласно оговоренному графику) для выполнения договоренности между пользователем и оператором сервисного приложения.

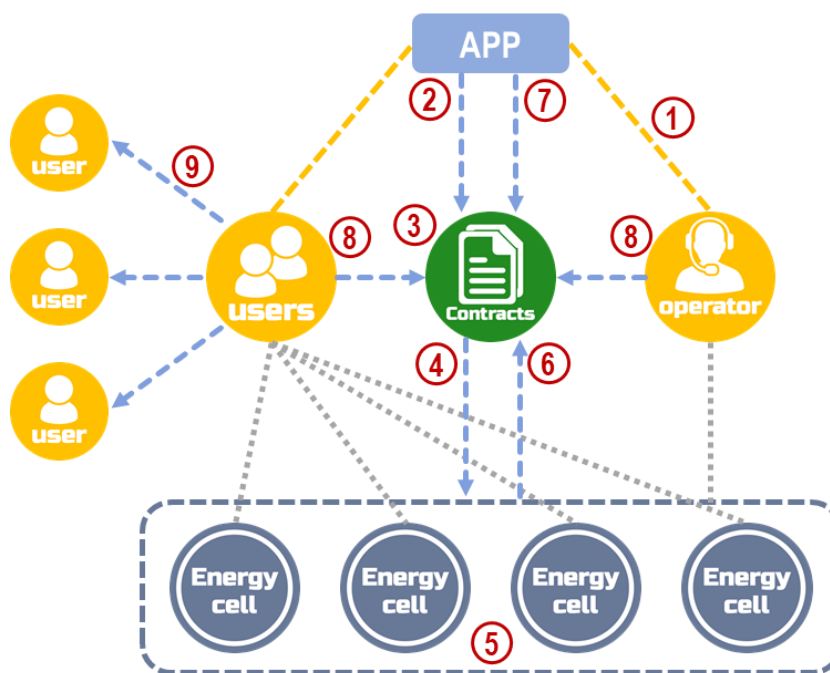


Рисунок 4. Peer-to-operator энергетическая транзакция. Источник: ЦСР Северо-Запад.

Алгоритм реализации:

Шаг 1. Сформирована команда от оператора на изменение состояний энергетических ячеек.

Оператор задает требования к изменению состояния энергетической системы, включающей в себя энергетические ячейки системы Интернета энергии.

Шаг 2. Сформирован проект контракта и отправлен пользователям.

Определен состав пользователей, чьи энергетические ячейки потенциально могут выполнить команду оператора. Пользователям из списка направляются проекты контрактов.

Шаг 3. Контракты на выполнение команды подписаны.

Оператор сервисного приложения и пользователи, владеющие энергетическими ячейками, подписали контракты, содержащие условия р2о-транзакции (правила изменения состояния энергетических ячеек и основные условия выполнения).

Шаг 4. Получена информация энергетическими ячейками об условиях р2о-транзакции.

Энергетические ячейки получают информацию об условиях р2о-транзакции для осуществления физических изменений состояния. Преобразование информации об условиях р2о-транзакции и передача ее энергетической ячейке определяется вариантом реализации архитектуры.

Шаг 5. Осуществлено изменение состояния энергетических ячеек.

Энергетические ячейки изменяют состояние в соответствии с условиями р2о-транзакции – осуществляется корректировка выдаваемой и/или потребляемой электрической мощности в течение времени реализации контракта.

Шаг 6. Получена информация о результатах исполнения контракта между пользователями.

Сформированы фактические данные об изменении состояний энергетических ячеек.

Шаг 7. Произведен расчет фактических обязательств пользователей и оператора пользовательского приложения.

Приложение на основании условий контракта и фактических данных о результатах исполнения производит расчет взаимных обязательств пользователей и оператора приложения.

Шаг 8. Закрыты финансовые обязательства между пользователями и оператором приложения.

Пользователи и оператор приложения обмениваются цифровыми финансовыми активами для закрытия обязательств по результатам выполнения контракта.

Шаг 9. Распределение цифровых финансовых активов между пользователями-собственниками энергетической ячейки.

В случае наличия нескольких совладельцев энергетической ячейки (пользователей, по отношению к которым имеются финансовые обязательства) осуществляется перераспределение цифровых финансовых активов между остальными совладельцами энергетических ячеек на основании правил владения.

4 Архитектурный фреймворк Интернета энергии

4.1 Интернет энергии для разных стран мира

Характер «энергетического перехода» в глобальном масштабе неоднороден: то, насколько страна вовлечена в этот переход и то, в чем он в первую очередь проявляется, определяется особенностями стран и экономик. В наибольшей степени «энергетический переход» проявляется в электроэнергетике развитых стран и их объединений (Европейский Союз, Великобритания, США, Канада, Япония, Австралия и другие). Наиболее существенным изменениям, затрагивающим не только технологическое устройство, но и

экономические взаимоотношения субъектов отрасли, а также архитектуру энергетического комплекса, подвергается распределительный сектор и «последняя миля», включающие распределительные сети, распределенную генерацию и конечных потребителей.

Энергетики стран мира и обобщенные требования их пользователей к энергосистемам ближайшего будущего, на которые отвечает Интернет энергии, могут быть классифицированы на основании трех параметров:

- уровень развития экономики страны (по классификации ООН и МВФ);
- тип и уровень урбанизации страны;
- тип и уровень индустриализации.

Таблица 1. Типы энергетик стран по обобщенным требованиям к энергосистемам

<i>Тип экономики</i>	<div style="text-align: center;"> <i>Тип урбанизации</i> <i>Группа экономик</i> </div>	Урбанистическое общество	Руралистическое общество
Постиндустриальная экономика	Развитая экономика	Учет большого разнообразия динамически меняющихся требований пользователей к экологичности, качеству и надежности энергоснабжения наиболее экономичным из доступных способов. Обеспечение сетевой связности в энергосистеме.	Учет большого разнообразия динамически меняющихся требований пользователей к экологичности, качеству и надежности энергоснабжения наиболее экономичным из доступных способов. Обеспечение высокой автономности энергоснабжения.
Индустриальная экономика	Развивающаяся экономика (среднее развитие)	Высокая доступность и надежность энергоснабжения для	Высокая доступность и надежность энергоснабжения для

		растущего энергопотребления с высокой централизацией потребителей	растущего энергопотребления в изолированных энергосистемах
	Развивающаяся экономика (слабое развитие)	Доступность и низкая стоимость энергоснабжения для растущего энергопотребления с высокой централизацией потребителей	Доступность и низкая стоимость автономного энергоснабжения для растущего энергопотребления
Аграрная экономика	Развивающаяся экономика (слабое развитие)	Доступность и низкая стоимость энергоснабжения при высокой централизации потребителей	Доступность и низкая стоимость автономного энергоснабжения

Интернет энергии будет особенно востребован в развивающихся странах, как с аграрной, так и с индустриальной экономиками, в которых отсутствует собственная страновая или региональная энергосистемы, поскольку в этом случае барьер для развития Интернета энергии, связанный с конкуренцией со старой энергетической инфраструктурой, практически отсутствует.

Из приведенной классификации как обобщение следуют три профиля задачи на построение электроэнергетики ближайшего будущего, которые должны удовлетворяться вариантами реализации Интернета энергии:

1. **Энергетика для неосвоенных территорий:** доступное дешевое энергоснабжение;
2. **Энергетика для урбанизации и индустриализации:** надежное энергоснабжение с приемлемым качеством;
3. **Энергетика для «цифрового» общества:** экологически чистое энергоснабжение с высоким и дифференцированным качеством.

В каждом из этих случаев Интернет энергии необходим для того, чтобы обеспечить наиболее экономически оптимальное решение задачи энергоснабжения.

4.2 Архитектура Интернета энергии и ее компоненты

Интернет энергии – такая децентрализованная электроэнергетическая система, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее пользователями. Архитектура Интернета энергии должна обеспечивать, с одной стороны, возможность реализации энергетических транзакций, с другой – возможность управления энергетическими ячейками за счет межмашинного взаимодействия и, наконец, обеспечивать возможность такого распределенного режимного управления в реальном времени, которое позволяет поддерживать баланс мощности в энергосистеме и ее статическую и динамическую устойчивость.

Интернет энергии представляет собой систему систем (System of Systems, SoS), архитектура которой строится на особом объединении трех систем, границы и взаимодействия которых друг с другом показаны на Рисунке 15:

- Системы формирования, контроля исполнения и оплаты смарт-контрактов **Transactive energy (TE)**;
- Систему межмашинного взаимодействия и обмена управляющими воздействиями между энергетическими ячейками и энергетическим оборудованием **Internet of Things (IoT)**;
- Систему режимного управления, поддержания баланса мощности и обеспечения статической и динамической устойчивости энергосистемы **Neural Grid (NG)**.

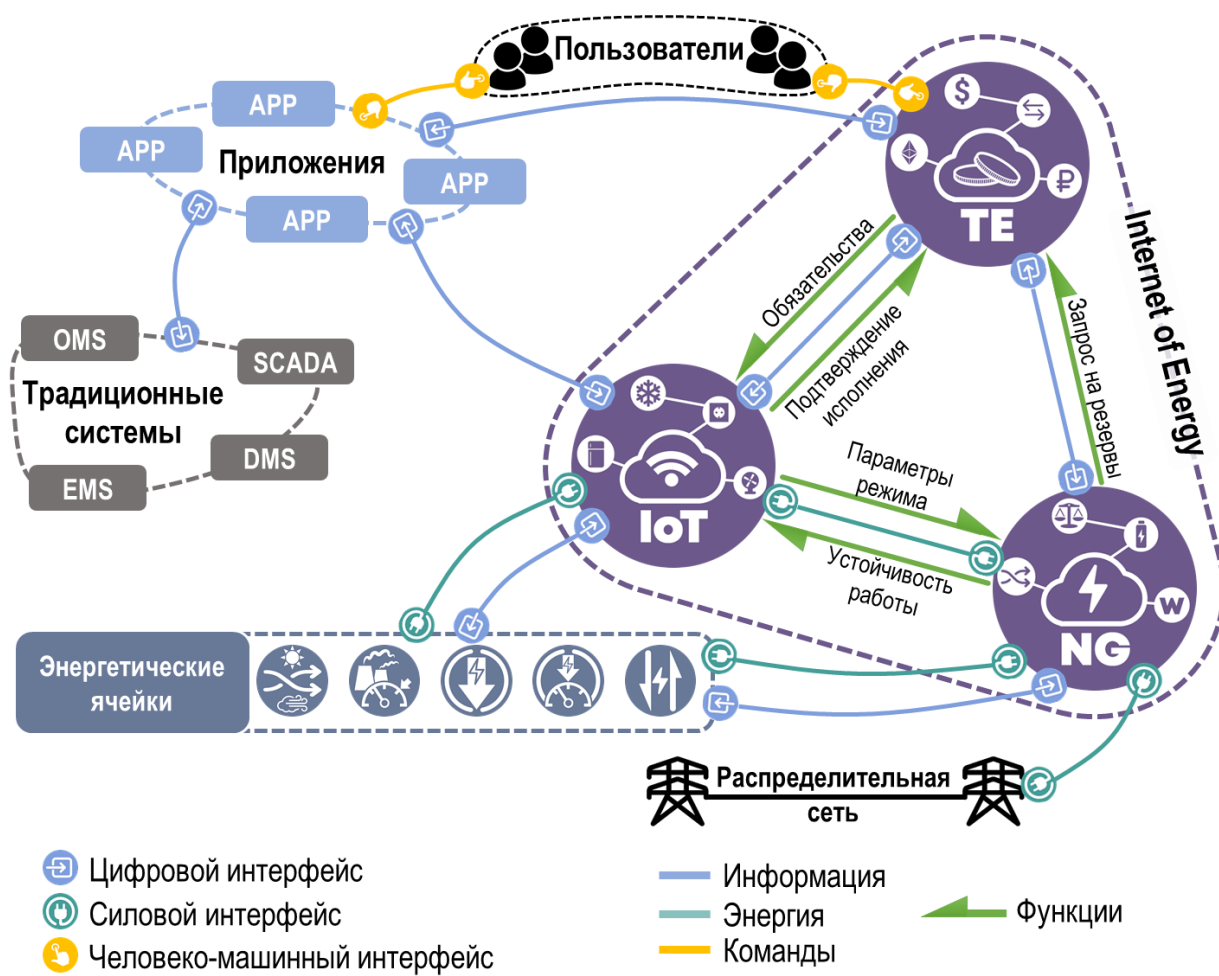


Рисунок 5. Архитектура Интернета энергии как системы систем: границы систем и взаимодействия между ними. Источник: ЦСР Северо-Запад

Каждая из перечисленных систем может быть развернута самостоятельно и выполнять свою функцию независимо от других систем, но только совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих по специальным протоколам систем TE, IoT и NG формирует Интернет энергии.

Взаимосвязь и взаимодействие между системами обеспечивается в ходе осуществления энергетических транзакций между пользователями и соответствующими энергетическими ячейками. Формирование смарт-контракта энергетической транзакции осуществляется в системе TE, информация об обязательствах по смарт-контракту транслируется в систему IoT, и в ней происходит реализация этого смарт-контракта в виде согласования работы энергетических ячеек (задание параметров перетока мощности) за счет их межмашинного взаимодействия. При этом система NG за счет своего измерительного оборудования получает параметры режима, сформировавшегося в силу реализации множества энергетических транзакций, т.е. за счет работы энергетических ячеек, и обеспечивает его устойчивость, поддерживая баланс мощности как на уровне

энергетических ячеек, так и на уровне перетоков мощности между ними. Контроль исполнения смарт-контракта и оплата осуществляются в системе ТЕ. В том случае, если система NG не может обеспечить поддержание баланса мощности в любых границах, где это необходимо, своими силами (только при помощи компонент системы NG), она запрашивает через систему ТЕ резерв мощности, т.е. инициирует необходимую для обеспечения резерва регулирующей мощности энергетическую транзакцию.

Энергетическое оборудование пользователей, находящееся в соответствующих энергетических ячейках, и присоединенное к распределительным энергетическим сетям, связано с системами NG и IoT электрически и информационно специальными интерфейсами.

Пользователи Интернета энергии взаимодействуют с системой ТЕ, участвуя, при необходимости, в определении параметров смарт-контрактов и в операциях с финансовыми активами через соответствующие человеко-машинные интерфейсы.

Основным для пользователей Интернета энергии является взаимодействие с пользовательскими приложениями (Application, App), в которых обеспечивается формирование и проведение энергетических транзакций (соответствующих смарт-контрактов в системе ТЕ и управляющих воздействий на энергетические ячейки и энергетическое оборудование через систему IoT). Поэтому пользовательские приложения (App) по информационным каналам взаимодействуют именно с этими двумя системами.

Взаимодействие пользователей и энергетических ячеек с внешними по отношению к Интернету энергии информационно-управляющими системами традиционной, централизованной энергосистемы или локальными системами управления, стоящими в системах электроснабжения, такими как SCADA, DMS, EMS, OMS, осуществляется также через пользовательские приложения (App).

4.2.1 Система Transactive Energy (TE)

Назначением системы ТЕ, архитектура которой показана на Рисунке 16, является формирование, заключение, контроль исполнения и оплата смарт-контрактов. Компонентами этой системы являются:

- цифровые образы пользователей – **аватары**;
- счета с размещенными на них финансовыми активами в цифровой форме (токенами) – **цифровые кошельки**;
- человеко-машинные интерфейсы аватаров и цифровых кошельков с пользователями;

- информационные интерфейсы, обеспечивающие связь системы ТЕ с средствами измерения, стоящими в точках присоединения энергетических ячеек на их границах с электрическими сетями;
- системное приложение, обеспечивающее **конвертацию** результатов измерений физических величин, характеризующих работу энергетических ячеек и энергетического оборудования в токены;
- другие **системные приложения**, обеспечивающие работоспособность и безопасность работы системы;
- **платформа транзакций** – цифровая среда взаимодействия аватаров друг с другом и с приложениями;
- **интерфейсы с пользовательскими приложениями**, позволяющие этим приложениям взаимодействовать на платформе транзакций с аватарами и системными приложениями системы ТЕ.

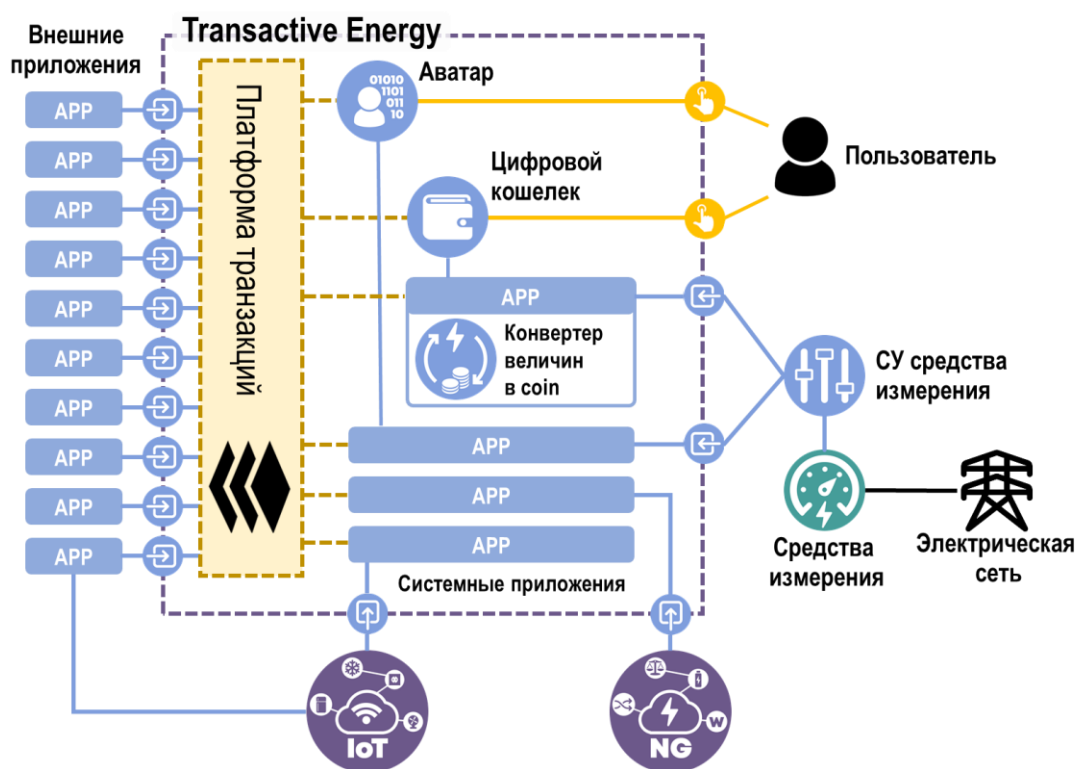


Рисунок 6. Функциональная схема системы Transactive Energy. Источник: ЦСР Северо-Запад

В рамках архитектуры системы ТЕ поддерживается строгое соответствие между пользователем, аватаром и цифровым кошельком.

Система ТЕ обеспечивает, таким образом, информационную взаимосвязь между аватарами пользователей, заключающими peer-to-peer смарт-контракты, пользовательскими приложениями, которые предоставляют различные услуги,

выражающиеся в заключении смарт-контрактов, средствами объективного контроля исполнения смарт-контрактов (средствами измерения) и цифровыми кошельками, между которыми происходит обмен финансами согласно смарт-контрактам, т.е. оплата за исполнение этих смарт-контрактов.

Наиболее современным, эффективным и надежным на нынешнем этапе развития финансово-информационных технологий вариантом технологической реализации системы ТЕ является вариант на основе технологии распределенного реестра (blockchain или производные технологии). При этом варианте в ТЕ используется собственная криптовалюта (собственные токены), которые являются цифровым финансовым активом, размещенным в цифровых кошельках пользователей, а все отношения аватаров друг с другом и с приложениями, т.е. все смарт-контракты записываются в распределенном реестре.

4.2.2 Система Internet of Things (IoT)

Назначением системы IoT, архитектура которой показана на Рисунке 17, является обеспечение межмашинного взаимодействия между системами управления энергетическим оборудованием, в том числе различными силовыми преобразовательными устройствами, при помощи которых энергетическое оборудование пользователей интегрировано в электрические сети, а также системами управления нагрузкой.

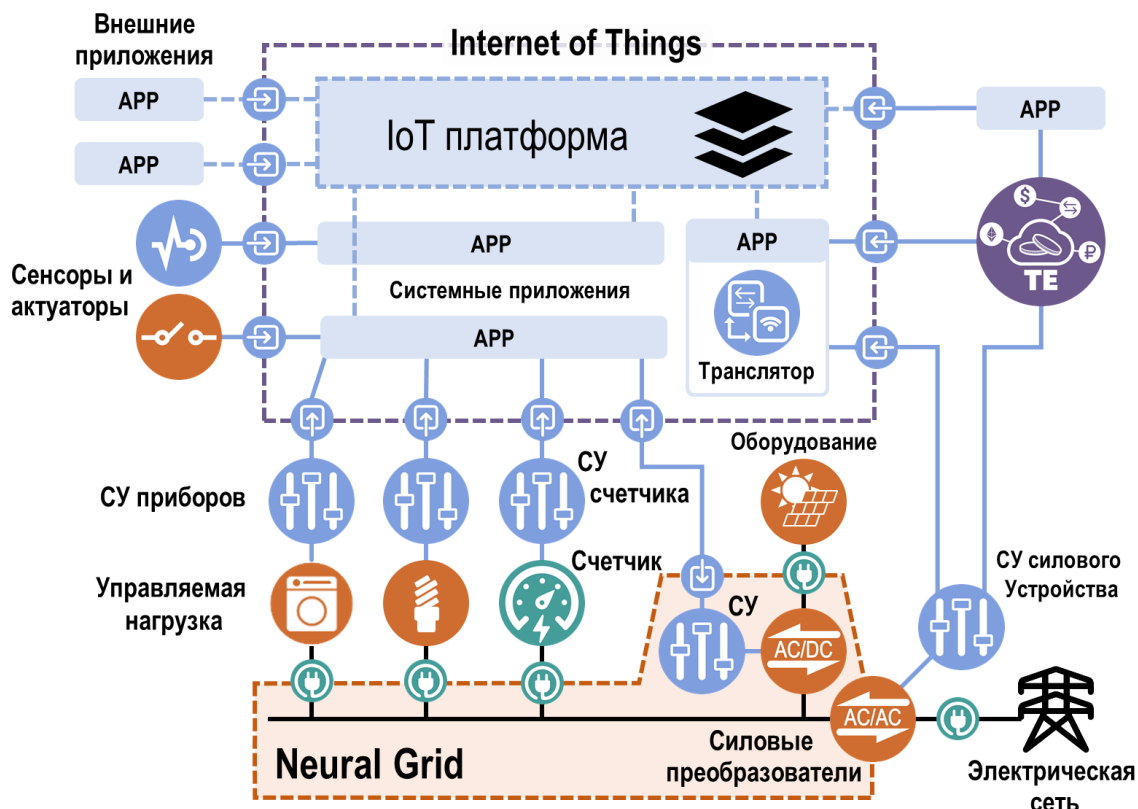


Рисунок 7. Функциональная схема системы Internet of Things (IoT). Источник: ЦСР Северо-Запад

В результате межмашинного взаимодействия между этими системами управления различным энергетическим оборудованием, происходящим в системе IoT, создается среда мультиагентного управления пулами распределенного энергетического оборудования. Взаимодействие в системе IoT позволяет сделать работу этого оборудования согласованной и таким образом, во-первых, формировать режим передачи электроэнергии, управляя ее генерацией, накоплением и потреблением, во-вторых, осуществлять различные функции режимного управления, связанные с вторичным и третичным регулированием баланса мощности и обеспечением заданного качества электроэнергии у пользователей.

Компонентами системы IoT являются:

- цифровые **интерфейсы с системами управления** различным энергетическим оборудованием – силовыми преобразовательными устройствами, через которые в электрические сети интегрирована генерация и накопители, а также управляемой нагрузкой;
- цифровые **интерфейсы со средствами измерения**, необходимые для получения актуальных данных о параметрах режима;
- различные **сенсоры**, необходимые для получения информации, не являющейся данными о параметрах режима электропередачи, но необходимой для экономического и технического управления пулами энергетического оборудования;
- различные **актуаторы**, необходимые для поддержки управления пулами энергетического оборудования, но не являющиеся системами управления этим оборудованием;
- собственные **системные приложения**, обеспечивающие работоспособность и надежность системы, в том числе встроенные и реализованные в логике IoT системы энергетического управления (EMS);
- информационные интерфейсы с пользовательскими приложениями;
- **IoT платформа** – цифровая среда взаимодействия приложений, систем управления оборудованием, сенсоров и актуаторов друг с другом.

Система IoT дает возможность пользовательским приложениям выстраивать мультиагентное, основанное на межмашинном взаимодействии и согласованной работе, управление энергосистемами, которое нацелено на формирование и регулирование режима передачи электроэнергии и его параметров, а также на экономическую оптимизацию работы энергосистемы и входящих в нее пулов энергетического оборудования. Система IoT

позволяет выстроить экономическую самоорганизацию, взаимную подстройку и экономическую оптимизацию работы таких пулов.

4.2.3 Система Neural Grid (NG)

Назначением системы NG, архитектура которой приведена на Рисунке 18, является обеспечение статической и динамической устойчивости энергосистемы на всех необходимых уровнях, как внутри энергетических ячеек, так и на уровне сети энергетических ячеек. Обеспечение статической и динамической устойчивости энергосистемы и поддержание режима передачи электроэнергии реализуется за счет интеллектуального регулирования первичного баланса мощности в энергосистеме. Особенно актуальной эта задача становится в том случае, если локальная энергосистема изолирована от централизованной энергосистемы или имеет с ней только слабую связь.

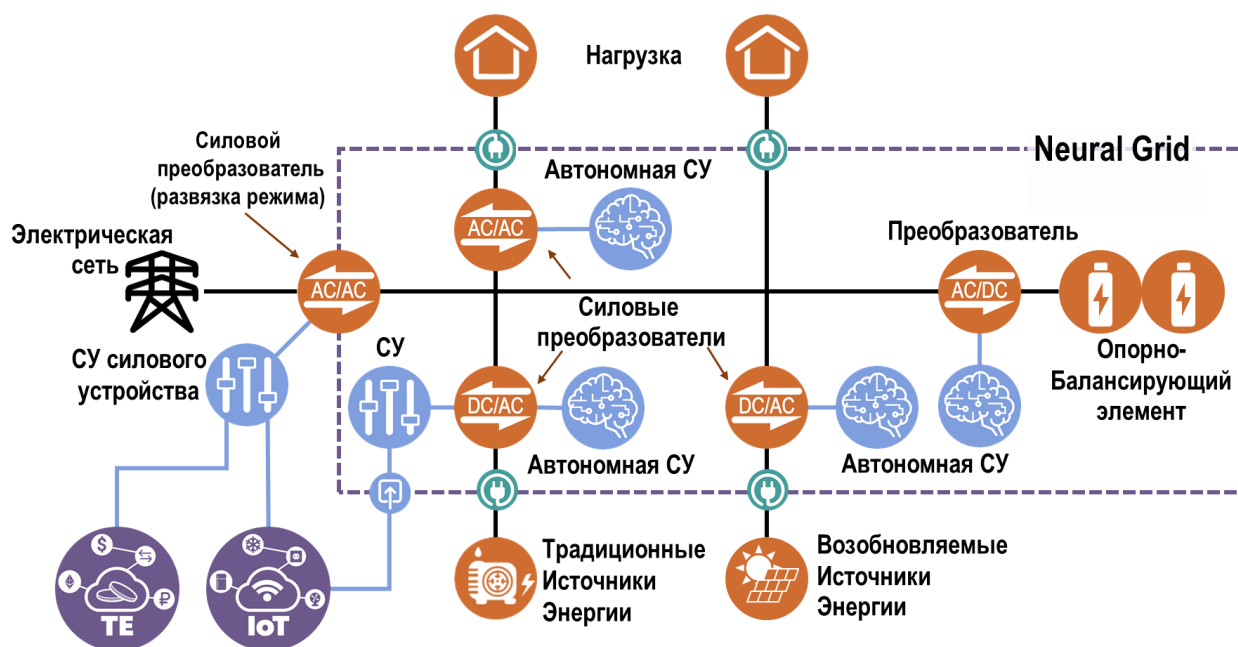


Рисунок 8. Функциональная схема системы Neural Grid (NG). Источник: ЦСР Северо-Запад.

Особенностью системы NG является то, что поддержание баланса мощности между всем подключенным к сети оборудованием осуществляется без информационных связей между ним только за счет автономных систем управления специальными силовыми преобразователями, через которые энергетическое оборудование интегрируется в сеть.

Компонентами системы NG являются:

- силовые интерфейсы (преобразователи) с автономными системами управления, обеспечивающие интеграцию генерирующих устройств, как традиционных, так и на основе ВИЭ;
- силовые интерфейсы с электрической нагрузкой;

- опорно-балансирующий накопитель с силовым преобразователем и специальной интеллектуальной автономной системой управления.

За счет автономных систем управления опорно-балансирующего накопителя и силовых интерфейсов (преобразователей), адаптивно реагирующих на изменение параметров режима электропередачи, опорно-балансирующий накопитель обеспечивает поддержание режима, задавая опорную частоту и напряжение и оказывая балансирующее воздействие при выходе системы из состояния равновесия (возникновении небаланса мощности). Силовые интерфейсы (преобразователи) реагируют на его воздействия, подстраиваясь под опорные частоту и напряжения так, чтобы в целом система работала как система виртуальных синхронных машин, и для каждой единицы энергетического оборудования, выдающей мощность, обеспечивался независимый от других единиц режим максимальной эффективности отбора мощности.

4.2.4 Структурное описание архитектуры Интернета энергии

Интернет энергии – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих по специальным протоколам систем ТЕ, IoT и NG. Группы (пулы) электроэнергетического оборудования пользователей Интернета энергии, имеющего общую точку присоединения к электрическим сетям и информационным каналам, обеспечивающим связь с Интернетом энергии, образуют **энергетическую ячейку**. Интернет энергии представляет собой сеть энергетических ячеек.

Энергетическая ячейка формируется за счет присоединения пользователя Интернета энергии и его энергетического оборудования одновременно к системам ТЕ, IoT и NG. Таким образом, энергетическая ячейка – это такая цифровая электрическая система, которая:

- Может выполнять одну из пяти функциональных ролей в Интернете энергии, типология которых задается возможностями ячейки по отношению к потоку электрической мощности.
- Содержит на своей границе с другими ячейками или электрическими сетями силовой интерфейс с системой управления, который позволяет ей быть подключенной к системам IoT и NG, и позволяющий энергетической ячейке осуществлять энергетические трансакции. Тип интерфейса соответствует типу энергетической ячейки.
- Подключена через свой информационный интерфейс с системой управления к системам IoT и ТЕ.

Интерфейс, через который энергетическая ячейка присоединяется к Интернету энергии, т.е. связана с другими ячейками через связывающие их распределительные сети и

каналы передачи данных, совмещает в себе функции интерфейсов всех трех описанных систем TE, IoT и NG.

Энергетические ячейки Интернета энергии образуют фрактальную сеть с самоподобной вложенностью: энергетическая ячейка может включать в свой состав другие энергетические ячейки меньшего масштаба или входит в состав энергетической ячейки большего состава. При этом структурно и типологически ячейки любого масштаба являются идентичными. Это означает, что также как энергетическая ячейка составляется из энергетического оборудования, например, объектов генерации, управляемой нагрузки и накопителей энергии, она может входить в состав более крупной энергетической ячейки, в которой будет играть динамически меняющуюся роль – в зависимости от энергетической транзакции с другими ячейками, может быть

генератором, накопителем или потребителем.

Если свойство самостоятельного поддержания статической и динамической устойчивости в условиях наличия перетока мощности с другими ячейками или централизованной энергосистемой является за счет системы NG обязательным свойством энергетической ячейки, то способность самостоятельного обеспечения баланса мощности и работы в изолированном режиме в качестве полностью самостоятельной энергосистемы является факультативной.

4.2.5 Типология субъектов Интернета энергии

Субъектом Интернета энергии является присоединенная к нему энергетическая ячейка. Энергетическая ячейка формируется за счет присоединения пользователя Интернета энергии и его энергетического оборудования одновременно к системам TE, IoT и NG.

В зависимости от возможностей энергетической ячейки по отношению к потоку электрической мощности существует пять типов энергетических ячеек. Каждый тип задается сочетанием значений двух параметров:

- Ролью в производстве и потреблении электрической энергии, т.е. направлением потока мощности.
- Маневренностью: способностью гибко управлять величиной и направлением потока мощности.

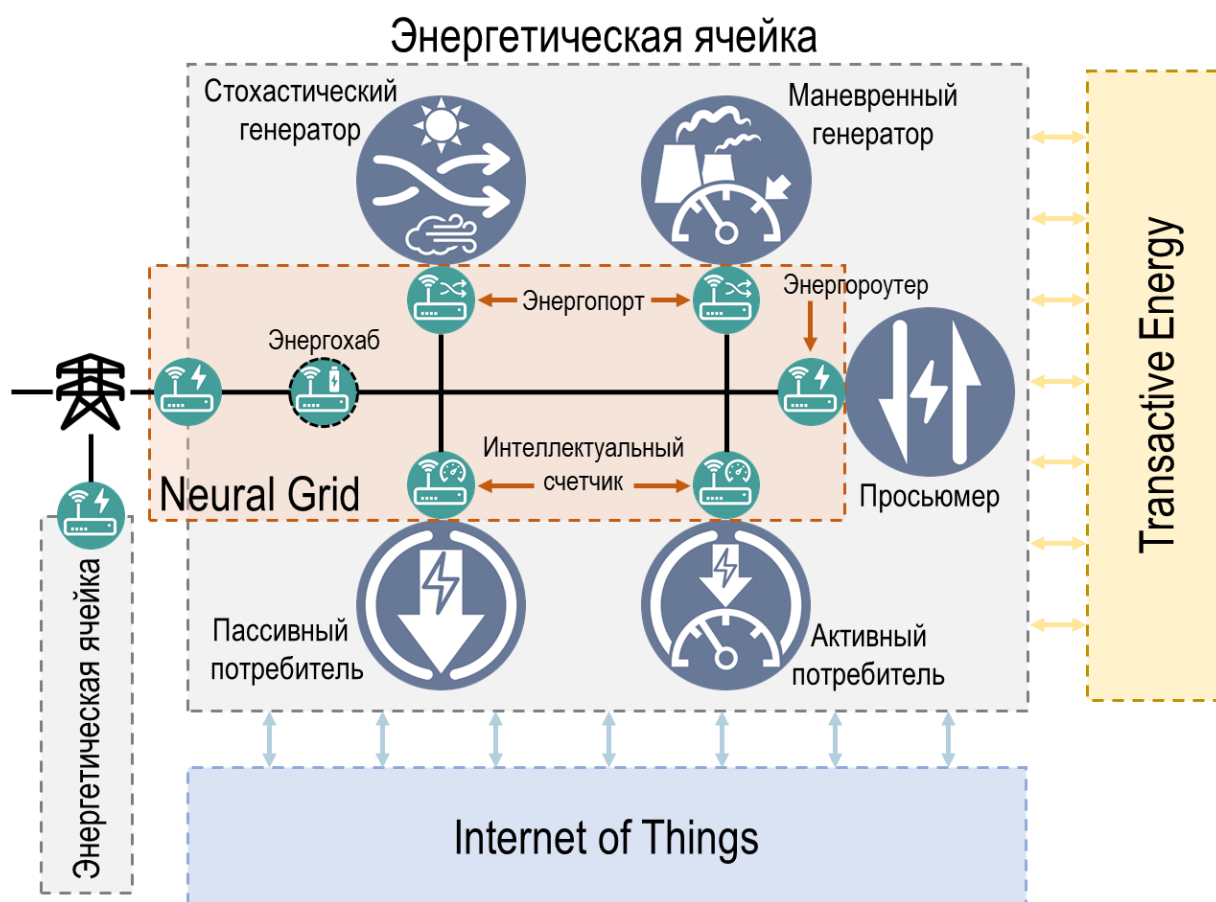


Рисунок 9. Энергетическая ячейка и типы ее элементов. Источник: ЦСР Северо-Запад.

На основе сочетаний значений этих двух параметров возможны следующие типы энергетических ячеек, приведенные на Рисунке 19:

- просьюмер;
- маневренный генератор;
- стохастический генератор;
- активный потребитель;
- пассивный потребитель.

Таблица 2 Типология энергетических ячеек

<div>Маневренность</div> <div>Роль</div>	Гибко управляемая величина потока мощности	Неуправляемая или управляемая в недостаточно широком диапазоне величина потока мощности
	Маневренный генератор	Стохастический генератор

энергии (поток только положительный – исходящий)		
Генератор и потребитель (поток может быть как положительным, так и отрицательным – исходящим или входящим)		
Потребитель электрической энергии (поток только отрицательный – входящий)		

4.2.6 Энергетические транзакции и сервисы в Интернете энергии

Основным принципом работы Интернета энергии является реализация всех возможных услуг, как пользователями и соответствующими энергетическими ячейками в адрес друг друга, так и пользователями в адрес субъектов централизованной энергетики, посредством энергетических транзакций. Энергетические транзакции, таким образом, выступают элементарными актами взаимодействия в Интернете энергии и строительными блоками для работы пользовательских приложений.

Каждая энергетическая транзакция представляет собой задание в системе IoT параметров работы (значений активной и/или реактивной мощности) на интерфейсе одной из энергетических ячеек согласно смарт-контракту, сформированному пользовательским приложением в системе ТЕ в заданный в смарт-контракте период времени с заданной точностью, последующий контроль (измерение) указанных значений, передачу результатов измерений по специальному протоколу в систему ТЕ, в которой энергетическая транзакция

завершается расщепленным согласно смарт-контракту платежом за физически проведенное в системе IoT действие.

4.2.7 Необходимые и обязательные компоненты архитектуры Интернета энергии

К числу необходимых и обязательных компонент Интернета энергии относятся:

- **Цифровые управляемые силовые интерфейсы с энергетическими ячейками** – кибер-физические устройства, устанавливаемые на границах энергетических ячеек в местах их присоединения к электрическим сетям или друг к другу, объединяющие функции интерфейсов систем TE, IoT и NG, и обеспечивающие за счет этого физическую реализацию и измерительный контроль энергетических транзакций;
- **Платформа транзакций** – цифровая среда взаимодействия аватаров друг с другом и с приложениями;
- **IoT платформа** – цифровая среда взаимодействия приложений, систем управления силовых интерфейсов, сенсоров и актуаторов друг с другом.

Типология цифровых управляемых силовых интерфейсов определяется типологией энергетических ячеек, на границах которых интерфейсы устанавливаются.

Таблица 3. Типы и функции интерфейсов энергетических ячеек

Тип энергетической ячейки	Тип интерфейса	Основная функция интерфейса
Просьюмер	Энергетический роутер	Измерение параметров режима в точке присоединения Управление перетоком мощности Поддержание режима отбора максимальной мощности
Стохастический генератор	Энергетический порт	Измерение параметров режима на границе Ограничение перетока мощности

Маневренный генератор		Адаптивное поддержание уровня напряжения и частоты при наличии опорных значений Поддержание режима отбора максимальной мощности
Пассивный потребитель	Интеллектуальный счетчик	Измерение параметров режима на границе
Активный потребитель		

Интеллектуальный счетчик

Интеллектуальный счетчик является универсальным модулем для снятия электрических параметров сети и потребления, а также позволяет использовать платформу транзакций.

Основной функционал интеллектуального счетчика:

- обеспечение измерения электрических параметров сети и потребления;
- обеспечение информационной связи с платформой транзакций;
- обеспечение базового управления параметрами электрического режима потребления.



Рисунок 10. Типовая архитектура интеллектуального счетчика. Источник: ЦСР Северо-Запад

Интеллектуальный счетчик имеет несколько цепей, обеспечивающих его функционал.

- Силовая цепь – содержит в себе реле, для обеспечения размыкания электрической цепи в случаях возникновения аварийного режима или решения задачи управления нагрузкой.
- Измерительная цепь – содержит в себе системы измерения тока и напряжения, для обеспечения контроля электрического режима.
- Цифровая цепь – содержит систему единого реального времени для синхронизации измерения и управляющих сигналов, вычислительные ресурсы, которые реализуют систему управления, а также память для фиксации всех измерений и управляющих воздействий.

В систему управления изначально встроены программы обеспечивающие следующие режимы работы:

- управление реле в режиме реального времени;
- ведение базы данных.

Интеллектуальные счетчики являются базовыми компонентами *neural grid*, на основе которых можно построить взаимодействие с остальными компонентами Интернета энергии.

Энергетический порт

Энергетический порт является универсальным силовым устройством, позволяющим подключать энергетические ячейки с генерацией или накопителем энергии.

Основной функционал энергетического порта:

- обеспечение двунаправленного перетока мощности от систем генерации в сеть, и обеспечением перетока мощности в накопитель энергии при его наличии;
- обеспечение функции виртуальной синхронной машины (поведение и управление инвертора, подключенного в сеть аналогично синхронному генератору);
- обеспечение максимального отбора мощности (отслеживание точки максимальной мощности) от систем генерации, подключенных к энергетическому порту.

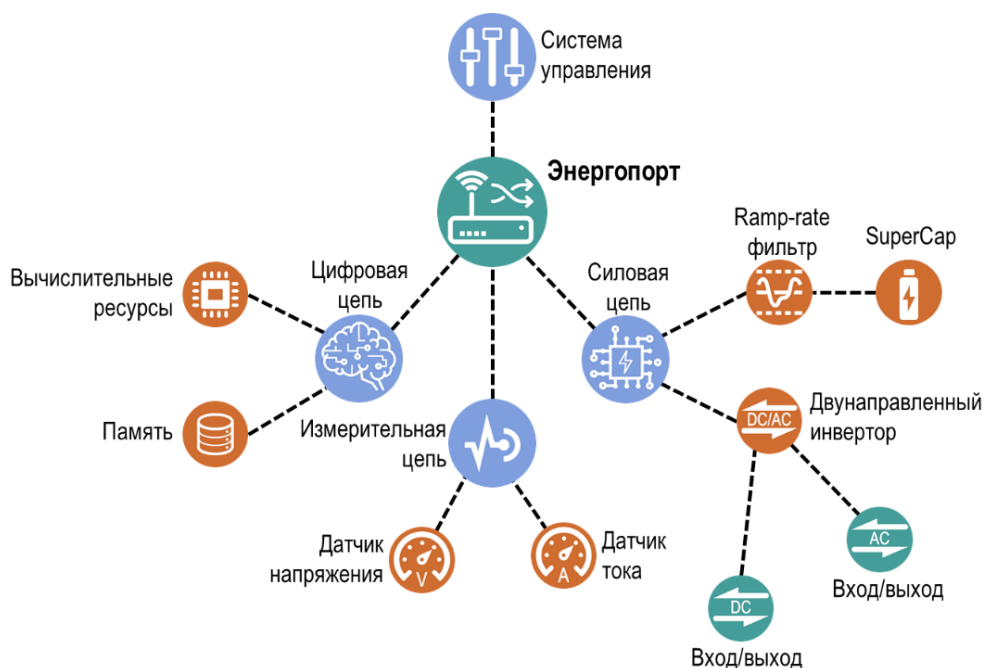


Рисунок 11. Типовая архитектура энергетического порта. Источник: ЦСР Северо-Запад

Энергетический порт имеет несколько цепей, обеспечивающий его функционал.

- Силовая цепь – содержит в себе двунаправленный статический инвертор напряжения с широким входным диапазоном напряжения на шине постоянного тока для подключения различного рода генерации, обеспечивающий работу на несимметричные фазные и линейные нагрузки с сохранением низкого значения коэффициента нелинейных искажений. Также содержит Ramp rate фильтр который обеспечивает устойчивую параллельную работу независимых генераторов (в т.ч. возобновляемых источников энергии) подключенных к порту и функционирующих в точке максимального отбора мощности.
- Измерительная цепь – содержит в себе системы измерения тока и напряжения, для обеспечения контроля электрического режима.
- Цифровая цепь – содержит вычислительные ресурсы, которые реализуют систему управления, также содержит часы реального времени для синхронизации измерения и управляющих сигналов. Также содержит память для фиксации всех измерений и управляющих воздействий.

У энергетического порта имеется система управления, которая реализована по принципу multi-master при котором каждая единица оборудования является равноценной. Данный подход позволяет добиваться более высоких показателей использования установленной мощности, а также обеспечивает существенно большую надежность функционирования системы. В систему управления изначально встроены программы обеспечивающие следующие режимы работы:

- преобразование постоянного напряжения в переменное при работе на автономную нагрузку;
- преобразование переменного напряжения в постоянное при работе на автономную нагрузку;
- параллельная работа с внешними источниками генерации (промышленная сеть, дизель генератор, энергетический шлюз);
- управление в режиме реального времени;
- ведение базы данных.

Энергетические порты позволят исключить процесс индивидуального проектирования технического решения для подключения ячеек с источниками генерации в сеть, поскольку являются унифицированными модулями, обеспечивающими их оптимальный режим работы.

Энергетический роутер

Энергетический роутер (энергороутер) — программно-технический комплекс, предназначенный для управления и распределения электроэнергии в распределительных сетях. Энергороутер работает в распределительных сетях среднего и низкого напряжения, 10/0,4 кВ.

Основной функционал энергетического роутера:

- управление перетоком активной и реактивной мощности;
- изоляция поврежденных участков сети;
- управление качеством электроэнергии.



Рисунок 12. Типовая архитектура энергетического роутера. Источник: ЦСР Северо-Запад

Энергетический роутер имеет несколько цепей, обеспечивающих его функционал.

- Силовая цепь – содержит в своем составе два энергетических порта, которые соединены через интерфейсы постоянного тока (DC), образуя единую шину постоянного тока. Также к этой шине подключается звено постоянного тока (конвертер), обеспечивающий согласование уровней напряжений между общей DC шиной и дополнительным оборудованием, таким как, например. накопитель энергии. Соединённые таким образом энергопорты обеспечивают полностью управляемый переток мощности через энергороутер.
- Измерительная цепь – берет информацию с измерительных систем энергетических портов для обеспечения контроля электрического режима и формирования управляющего воздействия.
- Цифровая цепь – содержит часы единого реального времени для синхронизации измерения и управляющих сигналов, вычислительные ресурсы, которые реализуют систему управления, а также память для фиксации всех измерений и управляющих воздействий.

У энергетического роутера имеется система управления, которая реализована по принципу multi-master и обеспечивает в первую очередь согласованный переток мощности между двумя системами энергетических ячеек. В систему управления изначально встроены программы, обеспечивающие следующие режимы работы:

- реконфигурация и восстановление сетей;
- управление активной и реактивной мощностью;
- автономный режим работы;
- управление в режиме реального времени;
- ведение базы данных.

Энергетические роутеры позволяют конфигурировать и строить различные топологии электрических сетей, развязывать режимы работы между системами энергетических ячеек, а также обеспечивать качество электроэнергии на стыках систем.

4.2.8 Специфические опциональные компоненты архитектуры Интернета энергии

К числу необходимых и обязательных компонент Интернета энергии относится **энергетический хаб** – устройство, устанавливаемое в энергетической ячейке при условии соблюдения в ней самостоятельного баланса мощности для обеспечения возможности ее автономной работы как энергосистемы, поддержания самостоятельного внутреннего

энергетического баланса, статической и динамической устойчивости, а также работы всех вложенных энергетических ячеек в оптимальных для каждой из них независимых режимах.

Энергетический хаб является компонентом системы Интернета энергии только в том случае, если управление им осуществляется посредством энергетических транзакций (дополнительно к работе энергетического хаба как элемента системы Neural Grid), а сам энергетический хаб представляет собой специфический тип энергетической ячейки с особой функцией по отношению к большей энергетической ячейке, в которой он размещен.

Энергетический хаб может устанавливаться во всех типах ячеек, способных генерировать электроэнергию (поток мощности). Представляет собой опорно-балансирующий накопитель электроэнергии, выполняющий функции обеспечения опорных напряжения и (возможно) частоты в ячейке и балансировки системы, т.е. первичного и вторичного регулирования баланса мощности в режиме реального времени.

Энергетический хаб обеспечивает поддержание электрического режима, задавая опорную частоту и напряжение, чем обеспечивает первичный баланс мощности в энергосистеме, к которой он подключен, и тем самым обеспечивает статическую и динамическую устойчивость энергосистемы.

Основными функциями энергетического хаба является:

- первичное регулирование баланса мощности;
- гибкая подстройка под электрический режим нагрузки;
- поддержание высокого качества электрической энергии в цифровой сети распределенной генерации (низкое значение коэффициента нелинейных искажений), стабилизация флуктуаций напряжения;
- агрегация распределенных энергетических ресурсов на основе концепции «виртуальная электростанция» (Virtual Power Plant).

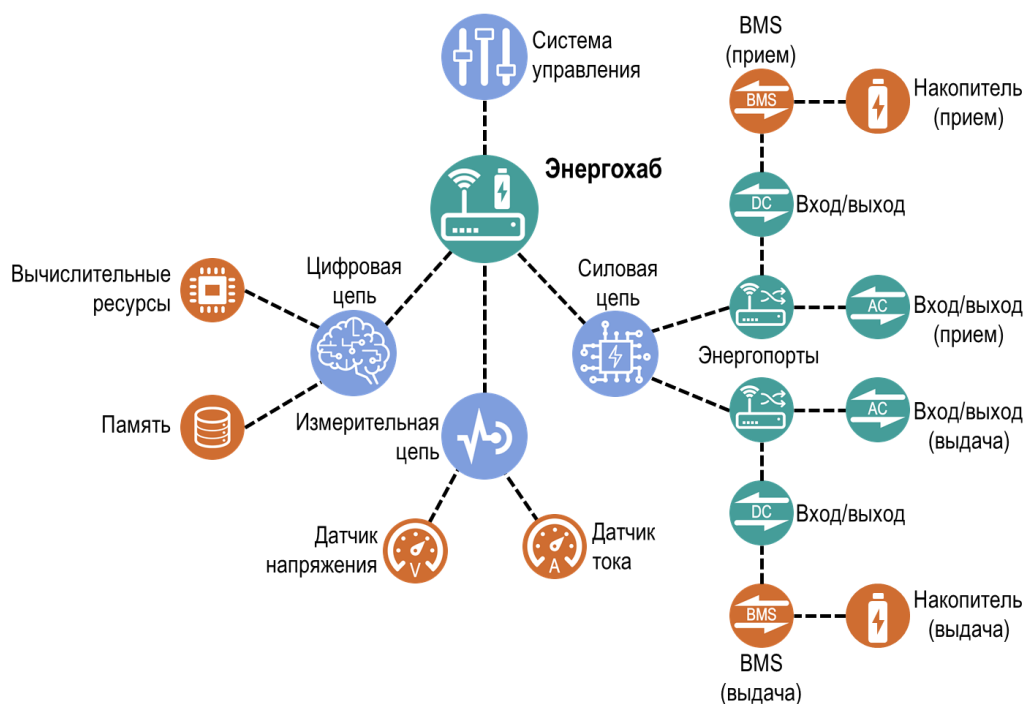


Рисунок 13. Типовая архитектура энергетического хаба. Источник: ЦСР Северо-Запад

Энергетический хаб имеет несколько цепей, обеспечивающих его функционал.

- Силовая цепь – содержит в своем составе два энергетических порта, которые могут работать параллельно в разном режиме, один на выдачу мощности, а второй - на прием мощности из сети.
- Накопитель энергии – содержит в себе систему накопления энергии для обеспечения приема и выдачи энергии в сеть. Данные накопители подключены к энергетическим портам через системы управления батареями (BMS), которые обеспечивают их оптимальный режим.
- Измерительная цепь – берет информацию из измерительных систем энергетических портов для обеспечения контроля электрического режима и формирования управляющего воздействия.
- Цифровая цепь – содержит часы реального времени для синхронизации измерения и управляющих сигналов, вычислительные ресурсы, которые реализуют систему управления, а также память для фиксации всех измерений и управляющих воздействий.

У энергетического хаба имеется система управления, которая реализована по принципу multi-master, при этом энергетический хаб задает энергетический режим в энергосистеме, а именно создает опорную частоту и при необходимости обеспечивает выдачу или прием мощности при небалансе в энергосистеме. Также у системы управления

имеются цифровые интерфейсы для формирования управляющих сигналов для вторичного и третичного регулирования в случае необходимости.

В систему управления изначально встроены программы обеспечивающие следующие режимы работы:

- управление балансом мощности;
- управление в режиме реального времени;
- управление агрегацией распределенных энергетических ресурсов на основе концепции «виртуальная электростанция» (Virtual Power Plant);
- ведение базы данных.

Энергохаб позволит осуществлять интеллектуальный процесс первичного регулирования баланса мощности при наличии различного рода распределенных генераторов и накопителей энергии, подключенных в одну энергосистему.

4.3 Архитектурные принципы построения Интернета энергии

Архитектурными принципами построения Интернета энергии являются:

- Децентрализованный характер энергосистемы Интернета энергии;
- Реализация всех процессов и управление ими при помощи прямых транзакций между пользователями;
- Построение энергосистемы как сети гальванически развязанных ячеек;
- Стремление к формированию и поддержанию локальных балансов мощности и самостоятельной балансировки системы на всех уровнях;
- Реализация двунаправленных потоков мощности между пользователями;
- Динамическое изменение пользователями роли в энергосистеме;
- Наличие между электроэнергетическим оборудованием не только электрических связей и взаимодействия, обеспечиваемых электрическими сетями, но также информационных связей и взаимодействия;
- Реализация полностью децентрализованного интеллектуального управления;
- Реализация управления за счет межмашинного взаимодействия;
- Наличие децентрализованного рынка, на котором заключаются peer-to-peer контракты;
- Наличие связей и взаимодействия с централизованной энергосистемой и ее субъектами, при котором обеспечивается оптимальное для пользователей сочетание традиционной централизованной и распределенной энергетик.

4.4 Базовые модели реализации архитектуры Интернета энергии

4.4.1 Описание базовых моделей реализации

Базовые модели реализации архитектуры Интернета энергии являются набором типовых сервисов (App), обеспечивающих ценность для пользователей Интернета энергии.

Данные модели направлены на получение следующих возможностей:

- Оптимизированные прямые продажи электроэнергии между просьюмерами.
- Гибкость энергосистемы за счет управления потреблением электроэнергии.
- Устойчивость работы энергосистемы.

Данные возможности достигаются при выполнении следующих базовых моделей реализации:

- P2P торговля электроэнергией – поиск оптимальной пары для энергообмена и проведение p2p энергообмена.
- Управление спросом (Demand Response) – оценка возможности и эффективности снижения потребления, оптимизация графика потребления.
- Управление энергопотреблением (EMS) – оптимизация энергопотребления в рамках энергетической ячейки.
- Балансирование изолированной энергосистемы – управление балансом электроэнергии и мощности в энергосистеме без подключения к внешней энергосистеме.
- Интеграция с внешней энергосистемой – управление балансом электроэнергии и мощности в энергосистеме при наличии подключения к внешней энергосистеме.

P2P торговля электроэнергией

Модель P2P торговли электроэнергией направлена на оптимизацию рынка прямых продаж электроэнергии между просьюмерами.

Модель включает:

- сбор данных от просьюмеров (текущие параметры энергетических активов, заявки на продажу мощности, заявки на покупку электроэнергии в заданном графике, диапазоны допустимых отклонений в потреблении / генерации);
- поиск оптимальных пар для энергообмена на основе данных об энергетических ячейках (возможности генерации по выдаче электроэнергии, запрашиваемый объем электроэнергии от потребителей, наличие физического подключения между участниками торгов);
- p2p энергообмен между просьюмерами;

- оптимизация системы поиска пар и условий контрактов с учетом статистики о проведенных операциях.

Управление спросом (Demand Response)

Модель управления спросом (Demand Response) направлена на оптимизацию энергосистемы при появлении возможности регулирования (снижения / увеличения) объема потребления электроэнергии за счет заранее сформированных договоренностей по управлению.

Модель включает:

- интеграция энергетических активов (ЭПУ);
- оценка возможности и эффективности снижения потребления;
- расчет оптимального графика потребления;
- выдача команд по управлению спросом;
- контроль исполнения команд и проведение расчетов.

Оптимизация энергопотребления (EMS)

Модель оптимизации энергопотребления (EMS) направлена на оптимизацию потребления нескольких энергетических ячеек, находящихся под управлением одного владельца или оператора.

Модель включает:

- оценка структуры энергопотребления;
- поиск вариантов по оптимизации энергопотребления;
- оценка эффективности выполнения вариантов оптимизации;
- выдача команд по управлению энергопотреблением;
- контроль исполнения команд;
- оценка эффективности оптимизации энергопотребления и корректировка модели оптимизации.

Балансирование изолированной энергосистемы

Модель балансирования изолированной энергосистемы направлена на обеспечение технологической устойчивости энергосистемы в условиях отсутствия подключения к внешней энергетической системе (поддержание локального баланса электроэнергии и мощности с целью нивелирования колебаний в параметрах электрической сети и поддержания параметров качества электроэнергии).

Модель включает:

- определение состава устройств управления и возможностей регулирования;

- сбор и анализ текущих параметров электрической сети;
- построение трендов изменения структуры потребления и генерации электроэнергии;
- выполнение превентивных управляющих воздействий;
- выполнение оперативных управляющих воздействий;
- оценка эффективности корректировки параметров электрической сети и корректировка модели выполнения управляющих воздействий.

Интеграция с внешней энергосистемой

Модель интеграции с внешней энергосистемой направлена на обеспечение устойчивости энергосистемы при условии наличия подключения к внешней энергосистеме.

Модель включает:

- определение состава устройств управления и возможностей регулирования;
- оценка пропускной способности сети с внешней энергосистемой;
- сбор и анализ текущих параметров электрической сети регулируемой энергосистемы;
- выполнение превентивных управляющих воздействий;
- выполнение оперативных управляющих воздействий;
- оценка эффективности корректировки параметров электрической сети и корректировка модели выполнения управляющих воздействий.

4.4.2 Пример реализации референтной архитектуры Интернета энергии

Рассмотрим реализацию архитектуры на примере реального кейса морского порта в Российской Федерации. Энергетическая инфраструктура морского порта состоит из большого количества разнородных активов, связанных как с производством, так и с передачей, хранением и потреблением энергии, она включает в себя следующие активы:

- 2 объекта тепловой генерации;
- дизель-генерацию;
- внешнюю сеть;
- внутреннюю сеть;
- потребителей (цехи, промышленные субъекты и т.п.).

Совокупность указанных элементов — это крупная энергетическая инфраструктура, в которой отдельные участки, несмотря на близость расположения, слабо связаны друг с другом и разделены по зонам отдельных терминалов. Имеется резерв мощности трансформаторов (в рассматриваемом примере загрузка составляла менее 16%). Указанные

выше элементы энергетической системы представляют собой распределённую генерацию с разными интересантами. Внедрение Интернета энергии в такую распределённую систему позволит её оптимизировать и решить ряд имеющихся проблем.

В морском порту имеется необходимость перепроектирования текущей энергосистемы, в связи с тем, что она выстроена неэффективно. Внедрение Интернета энергии позволит избегать больших потерь при передаче мощностей, оптимизировать процесс генерации собственными источниками энергии и сэкономить на покупке электроэнергии у оператора, Интернет энергии также позволит сглаживать пики потребления и выступит в роли единого центра управления.

Рассмотрим возможность реализации на основе данного кейса подходов архитектуры Интернета энергии. Интернет энергии уже сейчас включает в себя множество вариантов реализации на текущих системах. Технология «Интернета энергии» позволяет выстроить элементы таким образом, чтобы все они стали работать как части единой архитектуры, части общего механизма. Применение концепции «Интернета энергии» позволяет снизить затраты на электроэнергию и обслуживание энергооборудования на 30% и в 7 раз сократить потребность в новой мощности в случае реконструкции. Переконфигурирование текущей энергетической инфраструктуры позволяет своевременно реагировать на изменение качества электроэнергии, выявлять неполадки в работе головной подстанции и оперативно предотвращать перепады напряжения, избегая выхода из строя оборудования порта. Таким образом, морской порт может являться своеобразной действующей микроэнергосистемой, энергетическим рынком.

В данном случае ключевыми задачами Интернета энергии является интеграция всех элементов инфраструктуры с различными интересантами, выстраивание единой микроэнергосистемы морского порта, обеспечение возможности Plug and Play подключения новых элементов (в том числе переход судов в разряд «мобильных» участников энергосистемы). Внедрение Интернета энергии поможет в снижении затрат на собственные сети, себестоимости собственной выработки, потребности в новых мощностях, а также поспособствует покупке пиков из сети и выравниванию графика нагрузки.

Для выполнения данной транзакции необходимо выстроить систему, обеспечивающую выполнение следующих требований:

- Модернизация и оптимизация собственной генерации;
- Обеспечение возможности управления нагрузками.

Для разворачивания системы Интернета энергии необходимо добавить в систему следующие элементы:

- Энергетический роутер предназначен для соединения внутренней и внешней сети, обеспечивает измерение параметров в точке присоединения, управление перетоком мощности, поддержание режима отбора максимальной мощности;
- Интеллектуальный счётчик предназначен для подключения пассивных и активных потребителей к сети и для обеспечения измерений параметров сети и потребления;
- Балансирующий накопитель для регулирования нагрузки в текущий момент и сглаживания пиков;
- Энергетический порт для обеспечения измерения параметров на границе и ограничения перетока мощности, адаптивного поддержания уровня напряжения и частоты, поддержания режима максимальной мощности.

Архитектура Интернета энергии предполагает исполнение нескольких наборов сценариев Интернета энергии и транзакций, которые соответствуют всем предъявляемым требованиям. При таком подходе Каждый актив внутренней сети порта является ячейкой Интернета энергии. Для каждого типа актива определен собственный интерфейс для подключения к сети. Устройства энергетической инфраструктуры порта, подключенные к внутренней сети, связаны с внешней сетью через роутер. Во внутренней среде есть 2 объекта тепловой генерации и дизельная генерация, а также балансирующий накопитель. В данной системе также учитываются потребители электроэнергии, ячейки Интернета энергии (различные субъекты порта), которые подключены к распределенной генерации.

Целевая схема реализации данной транзакции в соответствии с архитектурой Интернета энергии представлена на Рисунке 26.

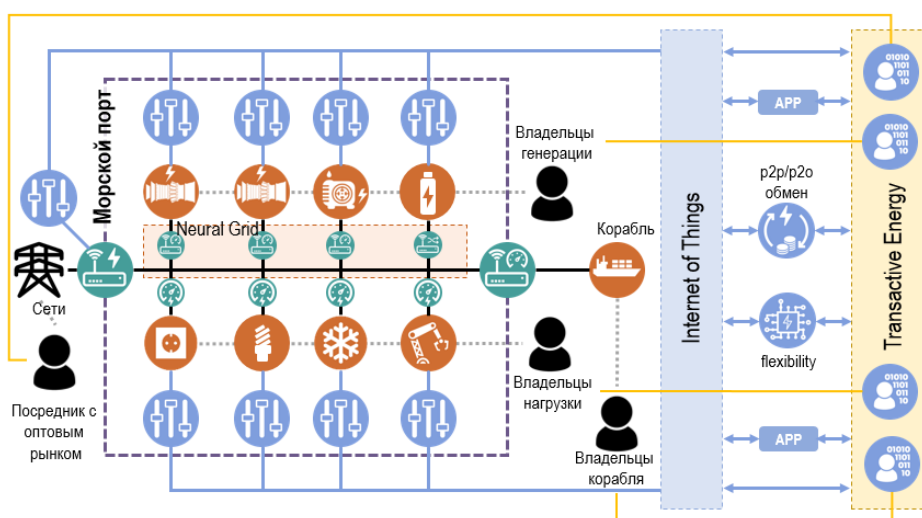


Рисунок 14. Пример реализации архитектуры Интернета энергии. Источник: ЦСР Северо-Запад

Данный кейс предполагает применение основных сценариев использования Интернета энергии:

- p2p-транзакции;
- сервис гибкости (сервис балансирования энергии и мощности);
- p2o-транзакции.

P2p-транзакции используются для продажи энергии от объектов генерации энергетическим ячейкам. Контракт p2p предполагает продажу и покупку определённого объема электроэнергии. Но в энергосистеме регулярно происходят колебания потребления, так как включение тех или иных приборов меняет мгновенную нагрузку в системе. Для компенсации таких колебаний в данном кейсе предусмотрен сервис гибкости, который позволяет соблюдать баланс энергии и мощности в системе. Если текущие объекты генерации не обеспечивают в полной мере потребности, то реализуются p2o-транзакции. P2o-транзакции предназначены для покупки недостающей электроэнергии у оператора.

Алгоритм реализации p2p-транзакции включает последовательность из 3 шагов:

1. Заключение договора на поставку электроэнергии от объекта генерации к потребителю;
1. Осуществление физической передачи электроэнергии согласно заключенному договору;
2. Оплата поставленного объема электроэнергии в соответствии с условиями договора.

Для реализации сервиса гибкости осуществляется постоянный контроль текущей генерации и нагрузки в системе. При наличии избыточной энергии, происходит её запас, а при недостатке энергии – передача уже запасённой ранее энергии потребителям.

При p2o-транзакциях осуществляется контроль за количеством электроэнергии в системе. При недостаточном количестве энергии от объектов генерации и запасённой энергии, посылается запрос на покупку электроэнергии у внешнего оператора и передача купленной электроэнергии во внутреннюю сеть через энергетический роутер.