

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЕСТРА (BLOCKCHAIN) В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

И.Н. Перекальский, С.Е. Кокин

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия,*

Современные энергосистемы стремительно развиваются в сложные киберфизические системы. Децентрализация энергетических ресурсов, уход от нынешней традиционной централизованной модели электроснабжения, повсеместное внедрение новых информационных технологий требуют создания безопасной, эффективной и надежной киберинфраструктуры, которая способна обеспечить должный уровень конфиденциальности и автоматизации процессов купли-продажи электроэнергии. Эти задачи может решить набирающая популярность технология распределенного реестра Blockchain. Технология обеспечивает распределенные вычисления, безопасную среду для взаимодействия участников в сети и надежное хранение информации. Blockchain позволяет сделать каждого участника сети не только потребителем энергии, но и ее поставщиком, организовав для этого «цифровую» среду. Продажа энергии при этом будет осуществляться напрямую между участниками, без посредников, с использованием умных счетчиков и адаптивных алгоритмов взаиморасчетов, которые взаимодействуют в режиме реального времени.

В 2017 г. Blockchain оценивался топ-менеджерами как ключевая прорывная цифровая технология на горизонте ближайших пяти лет. Согласно результатам опроса Deloitte, в 2019 г. 53 % компаний называют Blockchain стратегически приоритетной технологией, а в 2018 г. такое мнение выразили только 43 %.

В то же время проекты последние два года выходящие на рынок и получающие финансирование, отличаются большей комплексностью и индустриальной спецификой. В числе стран-лидеров находятся США, Германия и Великобритания. Половина Blockchain-проектов в области электроэнергетики зарегистрированы в пяти государствах: США (50 проектов), Германия (22 проекта), Великобритания (15 проектов), Австралия (13 проектов) и Япония (13 проектов). При этом на долю России пришлось всего 4 проекта.

Ключевые слова: Blockchain, Smart grid, Distributed computing, Energy internet, распределенный реестр.

Введение

Современные энергосистемы стремительно развиваются в сложные киберфизические системы. В России и других технологически развитых странах в настоящее время происходит переворот в энергетике, который часто называют «3D-моделью энергии». Его можно представить тремя основными тенденциями:

- декарбонизация;
- децентрализация;
- цифровизация.

Катализатором и ключевым фактором энергетического перехода национальных систем от традиционного уклада XX в. к новым технологиям и практикам XXI в. исследователи МШУ «Сколково» называют именно распределенную энергетику. К 2016 г. производство энергии распределенной генерацией достигло 25 % в мире [1]. В энергетику активно интегрируются возобновляемые источники энергии, которые по прогнозам к 2022 г. достигнут 30 % и 60 % – к 2050 г. [2].

Развитие электроэнергетического сектора сопровождается появлением новых подходов и технологий. В начале XXI в. была представлена концепция «Smart Grid», характеризующая будущую электроэнергетическую систему как более «дружелюбную» к пользователю, эффективную и устойчивую к аварийным ситуациям. За последние

несколько лет представлена концепция «Energy Internet» [4], которая описывает возможности интеграции различных энергетических систем и распределенных энергетических ресурсов в единое пространство. В работах, посвященных данной концепции, описана «Energy Ecosystem» [5], характеризующая взаимосвязь, взаимодействие и совместимость автономных источников энергии.

Электрическая сеть трансформируется и становится более «гибкой». Этому способствуют внедрения технологии Demand Response (DR), при использовании которой мы можем регулировать потребление у конечных потребителей, IoT, позволяющая получать данные от любого потребителя энергии и в совокупности с AI (искусственный интеллект) с наибольшей точностью делать прогнозы потребления, и многие другие технологии, направленные на широкое внедрение систем распределенного управления. Сегодня представлена парадигма будущего энергетики, эта парадигма основывается на применении концепции P2P (peer-to-peer) рынка. Данная структура является полной противоположностью традиционной системе с централизованным управлением и планированием. Она позволяет сделать каждого участника сети не только потребителем энергии, но и ее поставщиком. Продажа энергии при этом будет осуществляться напрямую между участниками, без посред-

ников, с использованием умных счетчиков и адаптивных алгоритмов взаиморасчетов, которые взаимодействуют в режиме реального времени.

Blockchain способна обеспечить безопасную среду взаимодействия участников P2P рынка за счет применения системы распределенного реестра и алгоритмов консенсуса [6].

Blockchain – это дополняющийся список криптографически подписанных, безотзывных записей о транзакциях, общих для всех участников сети. Каждая запись содержит метку времени и ссылки на предыдущие транзакции. С помощью этой информации любое лицо, имеющее права доступа, может в любой момент времени отследить транзакцию, принадлежащую любому участнику. Blockchain является одним из архитектурных решений более широкой концепции распределенных реестров. Он может хранить совершенно любую информацию, а использование методов криптографии значительно повышает безопасность, целостность и надежность системы.

Как технология распределенных вычислений для создания надежного общего реестра с помощью криптографии, механизмов консенсуса и умных контрактов Blockchain добилась огромных успехов в финансовой сфере, примером может служить криптовалюта Bitcoin. Ее основные характеристики работы, включающие: эффективное использование в распределенных узлах, масштабируемость, защищенность, надежность хранения информации, делают ее многообещающей технологией взаимодействия, которую можно использовать в будущих распределенных электроэнергетических сетях. Цель данной статьи дать обзор потенциала технологии в электроэнергетических системах.

В п. 2 рассмотрены базовые принципы функционирования Blockchain. В п. 3 рассмотрена модель киберфизической инфраструктуры электроэнергетических сетей в будущем. На основании этого обзора рассмотрены возможности применения технологии в п. 4. В п. 5 рассмотрена концепция, сценарии применения, потенциальные барьеры применения технологии. В заключении представлен общий анализ применимости технологии.

1. Современное состояние технологии Blockchain

Концепция Blockchain была впервые анонсирована Satoshi Nakamoto [6]. Технология разработана для осуществления прямых электронных платежей без привлечения третьих сторон для сопровождения транзакций. За последние 10 лет потенциал технологии активно обсуждался во многих сферах. Blockchain подразделяется на 3 категории.

1. *Публичный Blockchain «Public Blockchain».* Считается открытым и «полностью децентрализованным». Каждый из участников может прочитать цепочку блоков отправить транзакции и участвовать в процессе вычислений [6].

2. *Приватный Blockchain «Private Blockchain».* Владельцем в данном случае единолично является либо участник, либо компания, которая выдает разрешения на подтверждение транзакций. Blockchain либо может иметь публичный доступ, либо нет. Преимущество его в том, что Blockchain является «изменяемым» (т. е. транзакции могут быть отменены). Валидаторы известны, в большинстве своем подобный тип используется компаниями во внутренних процессах, таких как базы данных [7].

3. *Консорциум Blockchain «Consortium Blockchain».* Контролируется определенной группой, где участники процесса вычислений определены заранее. Подобная система рассматривается как частично децентрализованная. Права для участников здесь могут быть полными либо ограниченным. Подобный тип Blockchain наиболее употребим в финансовом секторе, аудит и др. [7].

2. Основные характеристики Blockchain

Blockchain обладает следующими основными характеристиками.

1. *Децентрализация.* Blockchain имеет явное преимущество перед централизованной системой. В финансовой сфере в традиционной централизованной системе подтверждение денежных транзакций происходит как покупателем, так и продавцом. Вся информация о транзакциях сохраняется, и ее источник, и приемник могут быть определены. Такой централизованный подход может привести к некоторым опасностям, таким как раскрытие конфиденциальности пользователя, манипулирование информацией о торговых операциях злоумышленниками. Blockchain обеспечивает трансформацию централизованного подхода в децентрализованный, делая при этом систему полностью автономной. В Blockchain информация подтверждается всеми узлами сети. Механизм подтверждения основан на достижении соглашения между узлами «консенсуса». Данная операция осуществляется специальными алгоритмами «Алгоритм консенсуса». Узлы подтверждающие транзакции называют валидаторами или «майнерами».

2. *Распределенные узлы и хранилища.* Blockchain обеспечивает автономность и самоуправление всех узлов. Узлы в Blockchain независимы и географически могут располагаться где угодно. Благодаря своей структуре Blockchain обеспечивает децентрализованное хранение информации обо всех транзакциях в сети, то есть каждый узел сети имеет свою локальную копию базы данных, в которую вносятся изменения по мере добавления новых блоков.

3. *Консенсус и smart contract.* Blockchain координирует участие в процессе подтверждения блоков все узлы для построения доверенной и надежной сети. В этой сети каждое решение о добавлении блоков принимается совместно – «достига-

ется консенсус». В настоящее время для достижения консенсуса существует множество алгоритмов, однако есть два основных – Proof of Work (PoW) и Proof of Stake (PoS) [8]. Остальные являются либо модификациями этих алгоритмов, либо интегрируют в себя функции обоих. Еще одна парадигма развития Blockchain – это smart contract. Принцип smart contract был описан американским криптографом и программистом Ником Сабо еще в 1996 г. задолго до появления технологии blockchain. Согласно концепции Сабо, интеллектуальные контракты – это цифровые протоколы для передачи информации, которые используют математические алгоритмы для автоматического выполнения транзакции после выполнения установленных условий и полного контроля процесса. Это определение, которое опережало свое время более чем на десять лет, остается точным и по сей день. Однако в 1996 г. эта концепция не могла быть реализована: в то время необходимые технологии не существовали, в частности распределенный реестр. Сегодня smart contract связывают с платформой Ethereum, так как впервые он был анонсирован в 2015 г. Виталиком Бутериным именно на этой платформе [9]. Smart contract представляет собой код, который записан в Blockchain. Код используется для ввода всех условий договора, заключенного между сторонами сделки. Обязательства участников предоставляются в интеллектуальном контракте в форме «если – то». Контракт выполняется в автоматическом режиме и обеспечивает выполнение всех прописанных в нем условий, не привлекая при этом третью сторону для контроля исполнения.

4. Асимметричность и шифрование. Поскольку распределенная система является полностью автономной, используется специальная надежная система шифрования данных. Асимметричное шифрование является неотъемлемой частью технологии Blockchain. Каждый узел в сети имеет по два ключа: закрытый и открытый. Открытый известен всем узлам, и он используется как ID адрес пользователя. Закрытый известен исключительно пользователю он также служит для идентификации узла. Отправляющим узлом информация шифруется с помощью публичного ключа «public key» и добавляется цифровая подпись. После чего информация транслируется всем узлам в сети. Однако только узел, для которого предназначается транзакция, имея закрытый ключ, сможет ее расшифровать. Примеры асимметричных алгоритмов шифрования можно найти в [10], наиболее употребимые SHA256, RIMPE160, RSA, Elgamal, Рабин, D-H и ECC.

2.1. Существующие проекты на Blockchain

Blockchain серьезно набрал свою известность за последние годы. Множество научных статей посвящено изучению свойств данной технологии. Исследователи «примеряют» технологию на раз-

личные сферы жизни [11]. В [12] технология рассматривается как система управления персональными данными пользователей. В [13] предложено использовать Blockchain в качестве системы управления набором роботов обеспечивая при этом надежность и гибкость. В [14] предложено создать систему платежей и хранения информации по кредитам. В [15] предложено создать базы данных пациентов больницы, чтобы ликвидировать неэффективность в области электронных медицинских карт.

Реальные проекты, применившие Blockchain, находятся в области финансов и энергетики. В финансовой сфере наиболее яркий представитель – Bitcoin [6]. Bitcoin в настоящее время используется 10 млн пользователями, и его стоимость составляет 7000 USD [15]. На основе Blockchain и Bitcoin, в частности, создано множество платформ, такие как Ethereum [16], Litecoin [17], and Coinbase [18]. Более того, многие банки весьма заинтересовались технологией и, учитывая, что она может подорвать их позиции на рынке, они хотят интегрировать ее в свои бизнес модели. Множество проектов открыли Blockchain путь и в электроэнергетику. В Австралии компания Power Ledger разработала на основе технологии систему взаимной продажи энергии между домохозяйствами, оснащенными солнечными панелями [19]. Некоторые подобные работы представлены в Германии, компания Conjoule также планирует создать площадку торговли энергией между домохозяйствами на технологии Blockchain [20]. В США компания LO3 Energy представила проект TransActive Grid, обеспечивающий функционирование P2P рынка для местных потребителей. [21]. Существуют интересные проекты в области зарядных станций для электромобилей. Данные проекты обеспечили возможность создания инфраструктуры для электромобилей, позволяя при этом получать прибыль Share&Charge project [22].

Ниже представлена карта ключевых игроков в мире, делающих ставку на технологию Blockchain в области электроэнергетики [23] (рис. 1).

Географию проектов можно увидеть на рис. 2.

Почти каждый второй (46 %) проект находится в Европе. Следом идет Северная Америка (24 %) – на США приходится 50 проектов, а на Канаду и Мексику в совокупности приходится только шесть (2,1 и 0,4 %, соответственно). Удалось обнаружить только пять проектов в странах СНГ (четыре в России и один в Белоруссии). Подобное географическое распределение можно объяснить тем фактом, что значительная часть проектов так или иначе связана с возобновляемыми источниками энергии. В ряде развитых и развивающихся стран активно продвигается и развивается тема «зеленой» электроэнергетики, а правительства и гражданское общество активно поддерживают проекты, функционирующие в данной области. Помимо этого, регуляторная специфика отдельных

Криптовалюты	Ethereum (эфирium)	Coïn (койн)			Solar Coïn (соларкойн)	Bitcoin Ripple (биткойн ripple) ...
Электроэнергетические компании	RWE	Международные электроэнергетические компании	VATTENFALL			
Разработчики/инженерно-технические компании	Slock.it	oneUP		LO3 ENERGY	LO3 ENERGY, CONSENSYS, TRANSACTIVEGRID	M-PAYG, theSunExchange, Nasdaq
Проекты	Block-Charge Блокчейн-приложения в сфере электро-мобильности/подзарядки электромобилей	POWR Пилотный проект, в рамках которого проводятся испытания децентрализованной энергосистемы	Power-peers Продажа электроэнергии в сети P2P	Exergy Распределенные серверы для обеспечения отопления домов; счета за потребленную тепловую энергию выставляются с использованием технологии «блокчейн»	Brooklyn Microgrid (Бруклинская микросеть) Пилотный проект, объединивший 10 домашних хозяйств в Бруклине в рамках микросети, работающей на основе блокчейн-технологии	Solar Change Платформа для обмена монет SolarCoins «блокчейн»

Рис. 1. Проекты в области Blockchain

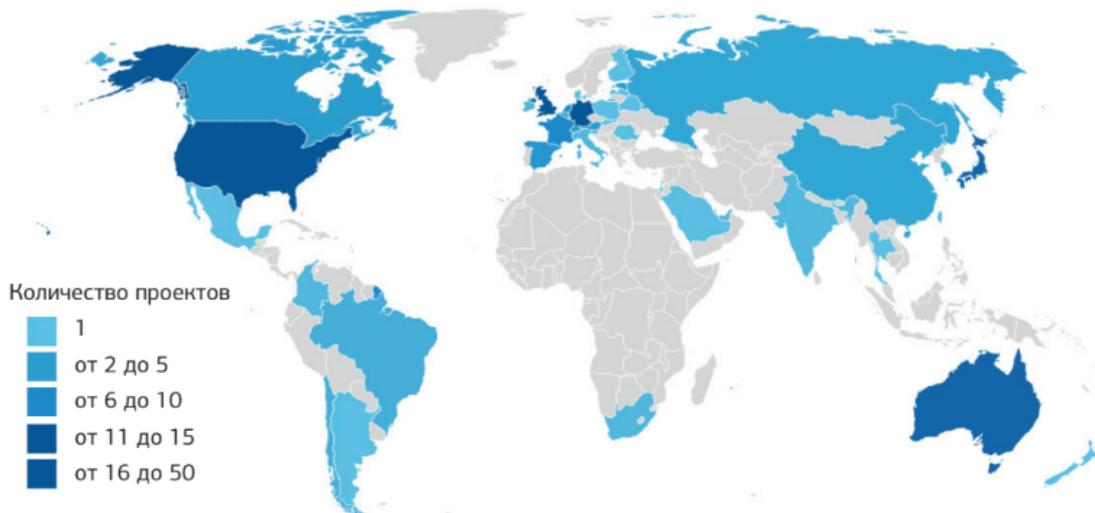


Рис. 2. Географическое распределение Blockchain-проектов в энергетике

стран также может влиять на выбор места регистрации. Например, Цуг в Швейцарии или Белоруссия становятся более привлекательными в силу принятого там законодательства, благоприятного для развития Blockchain-проектов [23].

3. Киберфизическая структура Blockchain для применения в энергосистемах

В данном разделе рассмотрена киберфизическая структура применения технологии в электроэнергетике. На рис. 3 изображены ее основные компоненты.

Данную структуру можно разделить на две

составные части «кибер» или информационную и «физическую». Первая нужна для реализации систем управления, вторая необходима для взаимодействия с физическим миром.

Информационная будет включать в себя распределенную базу данных, платформу подтверждения транзакций, Интернет вещей (IoT), облачные системы хранения информации.

Физическая инфраструктура будет включать в себя всех участников рынка, генерацию, распределение и потребителей. Данная структура позволит объединить виртуальный мир с физическим.

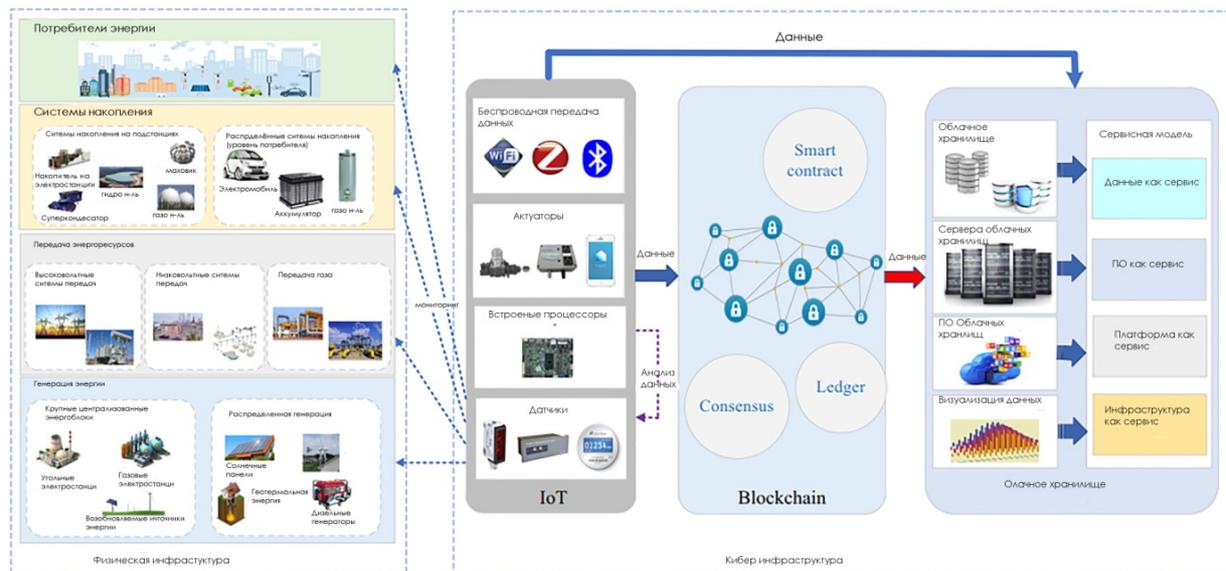


Рис. 3. Киберфизическая структура будущих энергосистем

3.1. Физическая инфраструктура

Физическая структура объединит в себе различные энергетические ресурсы и участников. Она будет осуществлять контроль над генерацией, распределением, потреблением и накоплением.

Генерация, в свою очередь, будет включать как мощные электрические станции, так и мелкие распределенные генераторы. К мощным электрическим станциям можно отнести ставшие традиционными (газовые, угольные, гидро-, атомные и др. электростанции) и возобновляемые источники энергии (ветро-, солнечные электростанции). Распределенные генераторы могут включать в себя как возобновляемые источники энергии, так и дизель-генераторы, электромобили и др.

Распределительная инфраструктура включает в себя распределительные сети различных уровней напряжения, оборудование и объекты, участвующие в передаче энергии (трансформаторы, подстанции и др.).

К потребительскому сегменту можно отнести различные виды нагрузок: промышленные потребители, домохозяйства, электромобили и др.

Системы накопления включают в себя: теплоаккумуляторы, супер-конденсаторы, гидроаккумуляторы и др. Накопители могут быть интегрированы в сеть на различных уровнях напряжения, то есть мы можем включать их как на уровне microgrid (накопители маховичного типа или химические батареи), так и на уровне домохозяйств (химические накопители малой мощности, электромобили).

Физическую инфраструктуру будут также представлять энергетические рынки, агрегаторы спроса и др. Которые непосредственно не участвуют в передаче энергии, но занимаются координацией работы сети. Мониторинг и контроль над

системой будет в данном случае осуществляться через надежную информационную киберструктуру, описанную ниже.

3.2. Киберинформационная инфраструктура

IoT является технологией позволяющей создать среду, в которой каждое устройство (потребитель) может подключаться к информационной сети для управления или мониторинга. Для реализации подобной концепции каждое устройство оснащается микроконтроллером, системой беспроводной передачи данных, что делает эти устройства частью общей информационной сети (Интернет), позволяя им взаимодействовать друг с другом или с пользователем [24]. За последние годы сделаны шаги для интеграции IoT в электроэнергетику. Разработаны «умные счетчики» и другие устройства (phasor measurement unit (PMU)). В представленной киберфизической модели IoT будет ключевым игроком на каждом уровне энергетической системы и станет «мостом» для взаимодействия компонентов во всей киберструктуре (к примеру Blockchain и Облачные системы хранения информации).

IoT структура в свою очередь объединит в себе 3 части:

- датчики и актуаторы;
- встроенные в устройства вычислительные процессоры;
- системы беспроводной передачи информации.

Благодаря этим 3 сегментам IoT станет собирать многомерные данные, которые будут положены в основу работы Blockchain и облачных систем и позволят обеспечить принятие правильных решений всеми заинтересованными сторонами энергосектора.

Например, на стороне генерации IoT будет осуществлять сбор информации о текущем статусе

се, величине выброса CO₂ конкретно для каждого вида генерации, также будут получаться данные солнечной инсоляции, скорости ветра и др. Все это позволит получить картину текущих режимов генерации для конкретных участков.

В распределительных сетях IoT обеспечит мониторинг текущего состояния сети благодаря различным датчикам в том числе PMU, SCADA систем и др.

На стороне потребителей IoT обеспечит сбор данных о потреблении, внешних условиях (температура и др.).

В сегменте накопителей IoT сможет отслеживать состояние заряда батареи, ее износ и др.

IoT позволит управлять устройствами в режиме реального времени, реагируя на различные внешние условия. Более того, текущие вычислительные возможности современных микроконтроллеров позволят решать задачи предварительной обработки данных (проверка, фильтрация и т. д.), прежде чем они будут переданы на уровень выше в среду (Blockchain или облако). Таким образом, достигается взаимодействие со всеми энергетическими ресурсами.

3.3. Система распределенной обработки на Blockchain

Blockchain предоставляет децентрализованную и распределенную среду обработки данных для IoT системы.

Он обеспечит следующие базовые сервисы для обработки данных через IoT и взаимодействие различных участников энергосистемы.

1. *Распределенное хранение данных.* Благодаря своей структуре алгоритмам консенсуса Blockchain создаст копии базы данных на каждом узле и обеспечит их синхронизацию через интернет. При этом структура «цепи» позволит отследить все данные и сделать их неизменными. Алгоритмы консенсуса обеспечат верификацию и синхронизацию данных. Все это в комплексе создаст безопасную среду для работы IoT по сбору данных. Распределенное хранение данных позволит избежать отказа системы в случае выхода из строя любого из узлов.

2. *Smart contract.* Как уже упоминалось ранее smart contract в Blockchain представляет собой электронный договор или код с набором условий для каждого его участника. Blockchain предоставит платформу для реализации smart contract.

3. *Авторизация.* Blockchain сделает информацию отслеживаемой и неизменной. Эти его функции обеспечат механизм авторизации и верификации участников, соглашений между ними и др.

3.4. Облачная платформа

IoT и Blockchain образуют современную вычислительную среду. Облачные технологии обеспечат сервисориентированный подход к управлению информацией, полученной от системы IoT.

Система облачных вычислений основана на распределенных центрах обработки, данных оборудованных серверами, устройствами хранения

информации и специализированным ПО, устойчивым к сбоям [24, 25]. В представленной структуре облачные системы работают на вершине архитектуры IoT и Blockchain. Обеспечивая при этом сервис-ориентированное взаимодействие для пользователей энергией и участников рынка. Массивы данных собираемые IoT могут быть сохранены в Blockchain или загружены в облако в зависимости от текущих требований. Облако в свою очередь также может получить информацию, сохраненную в Blockchain, и провести анализ благодаря возможностям виртуализации и обеспечения динамических вычислений. Облачная система способна легко интегрировать данные и информацию из IoT и Blockchain и представить множество дополнительных сервисов для всех участников:

1. *Инфраструктура как услуга (IaaS).* Технология виртуализации позволит создавать экземпляры памяти и серверов на узлах конечных пользователей обеспечивая при этом доступ пользователям к их ресурсам. Для них это будет как управление своими локальными ресурсами, хотя фактически использоваться будут ресурсы удаленных серверов.

2. *Данные как сервис (DaaS).* Пользователи без труда смогут получить доступ к данным IoT и Blockchain через службы предоставления облачных данных, механизма облачной авторизации.

3. *Платформа как сервис (PaaS).* Участники энергетического рынка могут разрабатывать свои уникальные сервисы в облаке. Например, выполнение smart contract может быть реализовано через инструменты облачных хранилищ.

4. *Программное обеспечение как сервис (SaaS).* Участники рынка могут получить доступ к облачному хранилищу через специальное ПО. Например, они могут использовать SQL либо другие языки запросов для взаимодействия по IoT. Также они могут использовать различные инструменты визуализации составления отчетов непосредственно в облачном хранилище.

В заключение хотелось бы сказать, что облачные технологии, IoT в совокупности с Blockchain позволят создавать различные модели взаимодействия, обеспечат необходимый уровень защиты информации и дадут возможность участникам реализовать свои бизнес-модели.

4. Перспективные проекты на Blockchain

В предыдущих разделах рассмотрен огромный потенциал технологии в развитии электроэнергетических сетей в будущем. Далее рассмотрены перспективные проекты, реализованные с использованием технологии Blockchain.

4.1. Управление данными

По сути, Blockchain можно рассматривать как распределенную систему баз данных, создающую множество копий на узлах в сети. Структура цепи обеспечивает связность и неизменность данных. В данном разделе будут рассмотрены сценарии управления данными:

- защита данных сети;
- агрегация данных.

Вопрос защиты данных рассмотрен в работах [26]. Этот вопрос очень важен, так как на основе данных принимаются решения в сети, производятся управляющие воздействия на всю систему. В настоящее время SCADA системы обеспечивают централизованное хранение информации, которая уязвима для кибератак. В работе [27] рассмотрено использование механизмов Blockchain для обеспечения хранения и обмена информацией с датчиков. На рис. 4 можно увидеть структуру данной системы.

Все датчики располагаются на физическом уровне оборудования. Взаимодействие центрального узла и датчиков друг с другом происходит по беспроводным каналам на киберинформационном уровне, формируя таким образом свою распределенную сеть обмена данными.

В данной сети каждый измерительный узел работает согласно своим правилам:

- 1) сбор информации об объекте;

- 2) шифрование информации с использованием «private key»;

- 3) трансляция информации в сеть.

Другие узлы расшифровывают информацию, используя предустановленный «public key», и, используя механизмы консенсуса, подтверждают корректность данных. Используется алгоритм консенсуса POS. Все данные упаковываются в блок который соединяется в цепочку с предыдущим.

Далее происходит обработка данных. Агрегирование данных о потреблении и режиме работы энергосистемы может осуществлять системный оператор. Это в дальнейшем позволит обеспечить правильность принятия решений и проведение различных анализов. Однако здесь встает вопрос защиты данных, полученных от приборов учета. На рис. 5 рассмотрена система, использующая Blockchain как инструмент защиты данных для бытовых «умных счетчиков».

На рис. 5 изображена концепция сети, которая будет обеспечивать безопасный сбор данных с использованием Blockchain. Система состоит из

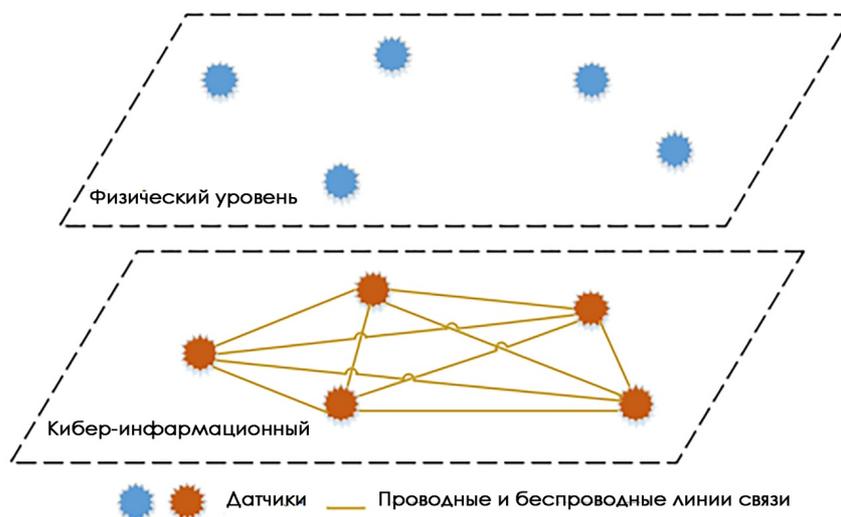


Рис. 4. Структура системы Blockchain

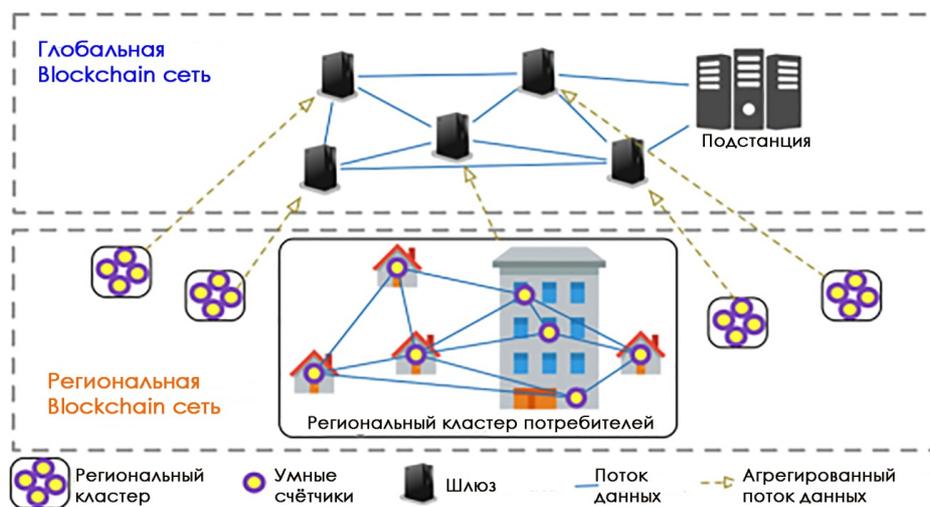


Рис. 5. Агрегация данных на основе Blockchain

2 кластеров: регионального и глобального. Региональный Blockchain имеет приватный тип, он обеспечивает сбор данных с определенной территории. Все счетчики объединены в кластер и составляют региональную Blockchain-сеть.

Глобальный Blockchain работает на уровне подстанции и является хранилищем данных для соответствующих региональных кластеров. Контрольный центр может получить доступ к глобальной цепочке блоков через подстанции и прочитать агрегированные региональные данные по любому счетчику.

4.2. Архитектура открытого энергетического рынка

Успех Blockchain в финансовом мире дает нам основание полагать, что он также имеет потенциал в электроэнергетике. Текущий энергетический рынок России имеет централизованную структуру. Таким образом, всем взаимодействием управляет АТС (Администратор торговой сети). То есть все участники подают заявки в АТС на генерацию или потребление, а он уже принимает решение об удовлетворении данных заявок. Формирует соответствующие компьютерные запросы.

Подобная архитектура имеет свои ограничения.

1. Она уязвима для кибератак. Примером может служить блэкаут в Украине 2015 г. [28]. Он показал возможность нарушить работу национального контрольного центра. Подобные атаки приводят к нарушению или полному прекращению всех торговых операций и могут повлиять на управление всей энергосистемой в целом [26].

2. Централизованная структура не позволяет сделать систему рынка открытой и трансграничной. Несмотря на удачную демонстрацию Nordic Energy Market, перекрестная система торговли энергоресурсами для стран Северной Европы, проблема доверия все еще является серьезным препятствием для установления трансграничного энергетического рынка.

3. Централизованная структура трудно масштабируема, если рассматривать ее с точки зрения интеграции множества мелких участников, в частности маломощных потребителей. В России пока не налажен даже механизм такого взаимодействия.

В этом контексте Blockchain может помочь повысить доверие на рынке вне зависимости от статуса игроков (крупные или мелкие производители). Она выступит регулятором для осуществления транзакций. Такой безопасный трансграничный энергетический рынок будет выгоден для оптимизации распределения энергии.

На уровне сети Blockchain поможет в создании рынков с серьезным уровнем доверия. Подобные рынки могут быть как локальными (расположенными в одной стране), так и иметь международную составляющую. Безусловно, в таком контексте роль АТС ослабнет, так как для регулирования рынка необходимость в третьей стороне упадет. Подобные рынки станут выгодными для оптимизации распределения энергии.

На стороне распределительных компаний Blockchain позволит создать новый рынок с уча-

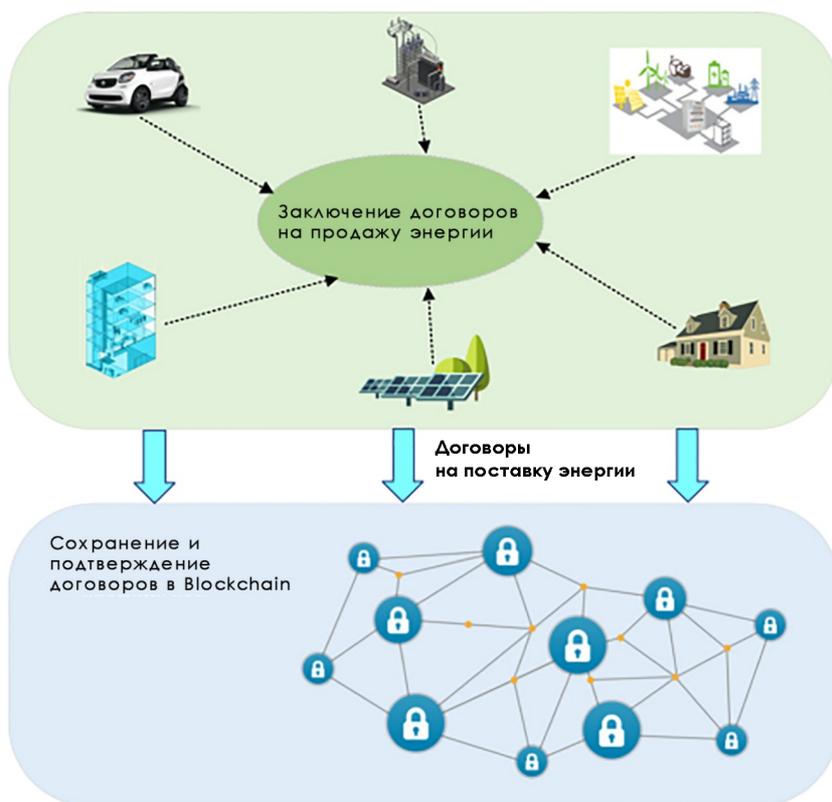


Рис. 6. Структура будущего рынка электроэнергетики

стием различных генераторов потребителей (здания, агрегаторы спроса, маленькие электростанции на возобновляемых источниках энергии). Подобный рынок будет иметь двухуровневую структуру, изображенную на рис. 6.

На верхнем уровне создан определенный механизм, позволяющий осуществлять переговоры относительно объемов и цены на поставляемую энергию. На нижнем уровне может использоваться Blockchain для обеспечения безопасности и осуществления безопасных транзакций.

4.3. Глобальное управление энергетическими ресурсами

Как распределенная база данных Blockchain обеспечивает синхронизацию и запись данных. Это позволит операторам управлять этой глобальной сетью и достигать любых технологических задач. Как пример далее будет рассмотрена технология, которая обеспечит «прямое» управление нагрузкой (DLC) на основе Blockchain. В данном случае Blockchain обеспечивает безопасную коммуникацию между распределительной компанией и потребителями, генераторами. Цель данного взаимодействия – снизить пиковую нагрузку. В данной архитектуре каждый участник имеет свою копию базы данных со всеми транзакциями и осуществляет взаимодействие со всеми узлами в сети. Процесс передачи энергии запускается распределительной компанией посредством контрольно-нагрузочной транзакции. В процессе взаимодействия происходит следующий порядок действий.

1. *Формирование контракта.* В первую очередь формируется соглашение между пользователем распределительной компанией и DLC. Распределительная компания генерирует контрольно-нагрузочную транзакцию, в которую уже помещено соглашение с DLC. Все это помещается в область метаданных и шифруется публичным ключом клиента. Далее эта транзакция транслируется всем участникам сети. При получении транзакции клиент подписывает ее и транслирует транзакцию снова, чтобы она была записана в Blockchain всех узлов.

2. *Данные по нагрузке.* На основании договора распределительная компания генерирует генезис-транзакции для мониторинга состояния каждой нагрузки на стороне потребителя энергии. Получая транзакцию-генезиса, нагрузка отправляет данные состояния распределительной компании с использованием единой подписи DR транзакции.

3. *DLC управление.* На основании полученных данных распределительная компания принимает соответствующие действия по управлению.

4. *Осуществление управляющих воздействий и контроль нагрузки.* Распределительная компания дает команды на исполнительные органы потребителей (коммутиционные аппараты) при помощи генерации общей транзакции «multi-signature load control transaction» и транслирует ее всем узлам в Blockchain-сеть.

5. *Осуществление контроля нагрузки.* При получении «load control transaction» коммутационные аппараты на стороне потребителя выполняют все операции прописанные в транзакции.

4.4. Аутентификация

Blockchain можно использовать для автоматической аутентификации участников энергетического рынка. Примером может служить проверка квот сертификатов на выбросы CO₂. Концепция квот на выбросы была предложена Киотским протоколом в 1997 г. Эта квота начисляется в зависимости от возможного выброса в атмосферу при производстве продукта.

Квота может продаваться среди различных участников энергетического рынка с помощью определенных рыночных механизмов. Многие страны уже используют продажу подобных квот в своих энергетических рынках: Китай, Корея, Евросоюз. Применение Blockchain при осуществлении продаж подобных сертификатов позволит сделать прозрачной и доверенной эту процедуру. Аутентификация при назначении подобных квот участникам может происходить автоматически и записываться в Blockchain. В дополнение к аутентификации для предоставления квот Blockchain позволяет аутентификации в сервисах управления спросом.

5. Возможности технологии Blockchain

Несмотря на серьезный потенциал, который показывает Blockchain, применение данной технологии имеет свои ограничения.

1. *Избыточность информации.* Blockchain создает множество копий баз данных на каждом из узлов в сети. Это необходимо для функционирования самой технологии и обеспечения надежности и безопасности. Однако многократное копирование информации создает ее избыточность. Соответственно при осуществлении транзакции участвуют все узлы сети. Это необходимо для функционирования алгоритмов консенсуса. Все это ведет к необходимости иметь достаточный объем памяти на каждом узле для хранения информации о всех транзакциях, не говоря уже о значительном расходе энергии в процессе записи. Следовательно, применение Blockchain в будущем требует решения проблем с избыточностью информации.

2. *Производительность и масштабируемость.* Как система для P2P операций Blockchain обладает скоростью обработки транзакций значительно более низкой, чем ее централизованный аналог. В отличие от других распределенных систем, добавление новых узлов в Blockchain не увеличивает ее производительность. Более того, в зависимости от применяемого протокола консенсуса при увеличении участников скорость обработки транзакций может снизиться. В настоящее время идет работа над созданием иных протоколов консенсуса для решения этих проблем.

3. *Безопасность смарт контракта*. Smart contract – это программа, написанная человеком. Соответственно, там могут быть ошибки и уязвимости. В компаниях, производящих софт, такие проблемы решаются выпуском новых версий с исправленными ошибками. Однако сама природа Blockchain не позволяет вносить изменения в существующие контракты. Для решения этих проблем необходимо разработать механизмы выявления уязвимостей еще до записи контракта в Blockchain.

4. *Взаимодействие Blockchain*. Адаптация Blockchain в будущих энергосистемах, в том числе налаживание взаимодействия с IoT, потребует значительных усилий. Облачные системы имеют ограниченную полосу пропускания трафика. Протоколы консенсуса Blockchain производят значительное количество трафика. Соответственно, здесь требуются дополнительные доработки. Более того, для реализации технологии Blockchain требуется согласование со всеми игроками энергетического рынка, что является нетривиальной задачей.

5. *Внедрение Blockchain в физическую энергетическую структуру*. На киберинформационном

уровне Blockchain и smart contract обеспечивают безопасность. Однако изменение локации генератора и потребителя, которые будут происходить при заключении контракта, будут влиять на потоки энергии в физическом мире (перекоммутации сети), которые могут привести к таким проблемам, как перегрузки сети, отклонения напряжения и др. Тем не менее решения и этих проблем разрабатываются.

Заключение

В данной статье были рассмотрены перспективы применения технологии Blockchain в будущих энергосистемах. Представлен киберинформационный уровень реализации, включающий в себя такие технологии, как IoT, облачные хранилища. Представлены некоторые перспективные реализации систем на Blockchain в будущих энергосистемах, а также ее ключевые возможности. Подытожив выше сказанное, можно с уверенностью судить, что характеристики Blockchain – децентрализация, надежность и прозрачность – делают ее очень перспективной технологией для будущих энергосистем.

Литература/References

1. Merlinda Andonia, Valentin Robua, David Flynn, Simone Abramb, Dale Geachc, David Jenkinsd, Peter McCallumd, Andrew Peacockd. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 100 (5), pp. 143–174. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.014
2. Ahl Amanda, Yarime Masaru, Tanaka Kenji, Sagawa Daishi. Review of blockchain-based distributed energy: Implications for institutional development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 107, pp. 200–211. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.002
3. Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power Mag*, 2005, 3 (5), pp. 34–41. DOI: 10.1109/MPAE.2005.150702
4. Huang A., Crow M., Heydt G. et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proc IEEE*, 2011, 99 (1), pp. 133–148. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2081330
5. Dong Z.Y., Luo F., Lai J. et al. Data-centric energy ecosystem in active distribution network. *Southern Power System Technology*, in press.
6. Nakamoto S., Bitcoin [a peer-to-peer electronic cash system]. Available at: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (accessed 01.12.2019).
7. Mengelkamp E., Notheisen B., Beer C., Dauer D., Weinhardt C. A blockchain-based smart grid: Towards sustainable local energy markets. *Comput. Sci. Res. Dev.*, 2018, 33, pp. 207–214.
8. King S., Nadal S. *PCoin: peer-to-peer crypto-valuta met proof-of-stake* Available at: <https://peercoin.net/assets/paper/peercoin-paper-nl.pdf> (accessed 01.12. 2019).
9. Ethereum [Wikipedia]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ethereum> (accessed 02.12. 2019).
10. Ebrahim M., Khan S., Khalid U. Symmetric algorithm survey: a comparative analysis, *Int J Comput Appl*, 2013, 61 (20), pp. 12–19.
11. Korpela K., Hallikas J., Dahlberg T. Digital supply chain transformation toward Blockchain integration. *Proceedings of the 50th Hawaii international conference on system sciences*, Hawaii, USA, 16 January 2017, 10 p. DOI: 10.24251/HICSS.2017.506
12. Zyskind G., Nathan O., Pentland A. Decentralizing privacy: using Blockchain to protect personal data. *Proceedings of the 2015 IEEE security and privacy workshops*, San Jose, USA, 21–22 May 2015, pp. 180–184.
13. Ferrer E.C. The Blockchain: a new framework for robotic swarm systems, arXiv Preprint. arXiv, 2016, pp. 12–13. DOI: 10.1007/978-3-030-02683-7_77
14. Azaria A., Ekblaw A., Vieira T. et al. MedRec: using Blockchain for medical data access and permission management. *Proceedings of the international conference on open and big data*, Vienna, Australia, 22–24 August 2016, pp. 25–30. DOI: 10.1109/OBD.2016.11
15. Blockchain cons. [Bitcoin Charts]. Available at: <https://blockchain.info/charts/> (accessed 05.01.2019).

16. Ethereum cons. [Ethereum] Available at: <https://www.ethereum.org> (accessed 05.01.2019).
17. Litecoin cons. [Litecoin open source P2P digital currency]. Available at: <https://litecoin.com/> (accessed: 06.01.2019).
18. Coinbase cons. [Coinbase open source P2P digital currency]. Available at: <https://www.coinbase.com/?locale=en> (accessed 07.01.2019).
19. Decentralised energy marketplace. Power ledger [Decentralised energy marketplace]. Available at: <https://web.powerledger.io> (accessed 08.01.2019).
20. Conjoule [our shared energy future]. Available at: <http://conjoule.de/en/home> (accessed: 08.01.2019).
21. LO3 energy [The future of energy/ LO3 energy]. Available at: <https://lo3energy.com/> (accessed 08.01.2019).
22. The future of energy [Share and charge The future of energy]. Available at: <http://shareandcharge.com/en> (accessed 08.01.2019).
23. Блокчейн консорциум. Новые возможности для производителей и потребителей электроэнергии. Обзор мировой электроэнергетики, подготовленный PwC [Blockchain cons. New opportunities for producers and consumers of electricity. PwC Global Electricity Survey]. Available at: www.pwc.com/utilities (accessed: 08.01.2019).
24. Luo F., Dong Z.Y., Chen Y. et al. Hybrid cloud computing platform: the next generation IT backbone for smart grid. *Proceedings of the IEEE PES general meeting*, San Diego, USA, pp. 22–26, July 2012, 7 p. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6345178
25. Luo F., Zhao J., Dong Z. Y. et al. Cloud-based information infrastructure for next generation power grid: conception, architecture, and applications. *IEEE Trans Smart Grid*, 2016, 7 (4), pp. 1896–1912. DOI: 10.1109/TSG.2015.2452293
26. Liang G., Weller S.R., Luo F. et al. Generalized FDIA-based cyber topology attack with application to the Australian electricity market trading mechanism. *IEEE Trans Smart Grid*, 2017, 9 (4), pp. 3820–3829. DOI: 10.1109/TSG.2017.2677911
27. Liang G., Weller S.R., Luo F. et al. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks. *IEEE Trans Smart Grid*, 2018, 10 (3), pp. 3162–3173. DOI: 10.1109/TSG.2018.2819663
28. Liang G., Weller S., Zhao J. et al. The 2015 Ukraine blackout: implications for false data injection attacks. *IEEE Trans Power Syst*, 2016, 32 (4), pp. 3317–3318. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2631891

Перекальский Игорь Николаевич, аспирант, кафедры «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; perekalskiy_igor@mail.ru.

Кокин Сергей Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, кафедры «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; s.e.kokin@urfu.ru.

Поступила в редакцию 14 января 2020 г.

DOI: 10.14529/power200108

APPLICATION OF TECHNOLOGIES THE DISTRIBUTED REGISTER (BLOCKCHAIN) IN ENERGY POWER SYSTEMS

I.N. Perekalskiy, perekalskiy_igor@mail.ru,

S.E. Kokin, s.e.kokin@urfu.ru

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation*

Modern energy grids are rapidly evolving into complex cyber-physical systems. Decentralisation of energy resources, shift away from the current traditional centralised model of power supply, the widespread introduction of new information technologies requires the creation of a safe, efficient and reliable cyber infrastructure that can ensure the proper level of confidentiality and automation of the processes of buying and selling electricity.

The growing popularity of Blockchain distributed ledger technology can solve these challenges. The technology provides for distributed computing, a secure environment for interaction between network members and reliable storage of information. Blockchain ensures that each network member is a supplier of energy, rather than only a consumer, and organises a “digital” environment for this. At the same time, energy will be sold directly between the members, with no middleman, using smart meters and adaptive algorithms for reciprocal payment that interact in real time.

In 2017, Blockchain was rated by top executives as a key breakthrough digital technology for the next five years. According to the Deloitte 2019 poll, 53 % companies called Blockchain a “strategical priority” technology, a 10 % rise y.o.y.

At the same time, projects that have entered the market and received financing over the past two years are more complex and industrially specific. Among the leading countries are USA, Germany and the UK. Half of the Blockchain projects in the electric power industry are registered in five states: USA (50 projects), Germany (22 projects), Great Britain (15 projects), Australia (13 projects) and Japan (13 projects). At the same time, Russia accounted for only 4 projects.

Keywords: Blockchain, Smart Grid, Distributed Computing, Energy Internet, Distributed Registry.

Received 14 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Перекальский, И.Н. Применение технологий распределенного реестра (Blockchain) в электроэнергетических системах / И.Н. Перекальский, С.Е. Кокин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 64–75. DOI: 10.14529/power200108

FOR CITATION

Perekalskiy I.N., Kokin S.E. Application of Technologies the Distributed Register (Blockchain) in Energy Power Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 64–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200108