СТАТЬИ

УДК 004.9:338

КОНЦЕПЦИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦИФРОВОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН И СМАРТ-КОНТРАКТОВ

Белкин П.А., Ростовский Н.С.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, e-mail: info@mephi.ru

Возобновляемые источники энергии находят все большее применение по всему миру. Однако одним из ключевых их недостатков остается нестационарность генерируемых мощностей. В случае небольшого отказа высокосинхронизированной сети может возникать масштабное отключение электроэнергии, что в свою очередь приводит к отказу в предоставлении сервиса конечным потребителям, ожидающим регулярной поставки электроэнергии. В этой статье рассматривается проблема организации децентрализованной энергетической сети, обеспечивающей постоянный поток мощности, при использовании нескольких источников генерации с учетом как физических, так и финансовых аспектов. В качестве решения по физическому устройству сети предлагается разбить существующую древовидную энергетическую сеть на ячейки, в которых происходит генерации и распределение мощности. Для решения по контролю и организации рынка торговли электроэнергией и мониторинга инфраструктуры используются технологии блокчейн и смартконтракты. Первая позволяет решать задачи надежного хранения данных и прогнозирования на их основе рыночной ситуации в части спроса и предложения на электроэнергию. Благодаря второй технологии может быть обеспечена автоматизация процессов заключения договорных отношений. Все это является частью большой концепции управления сетью на основе данных.

Ключевые слова: цифровая трансформация, блокчейн, блокчейн-платформы, возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, децентрализованное управление, потребление электроэнергии, торговля энергией

INFRASTRUCTURE CONCEPT OF DIGITAL HETEROGENEOUS DECENTRALIZED POWER GRID USING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY AND SMART CONTRACTS

Belkin P.A., Rostovskiy N.S.

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, e-mail: info@mephi.ru

Renewable energy sources are increasingly used around the world. However, one of their key shortcomings remains the non-stationary nature of the generated capacities. In the event of a small failure of a highly synchronized network, a large-scale power outage can occur, which in turn leads to a denial of service to end consumers waiting for a regular supply of electricity. This article discusses the problem of organizing a decentralized energy network that provides a constant flow of power when using multiple sources of generation, taking into account both physical and financial aspects. As a solution for the physical structure of the network, it is proposed to split the existing tree-like energy network into cells in which power generation and distribution takes place. Blockchain technologies and smart contracts are used to address the control and organization of the electricity trade market and infrastructure monitoring. The first allows you to solve problems, reliable data storage and forecasting on the basis of them the market situation in terms of supply and demand for electricity. Thanks to the second technology, automation of the process of concluding contractual relations can be provided. All of this is part of a large data-driven network management concent

Keywords: digital transformation, blockchain, blockchain platforms, renewable energy sources, distributed generation, decentralized management, electricity consumption, energy trade

Возобновляемые источники энергии находят все большее применение по всему миру. Однако одним из ключевых их недостатков остается нестационарность генерируемых мощностей. В случае небольшого отказа высокосинхронизированной сети могут возникать каскадные сбои в поставках электроэнергии [1]. Такие технологии, как интеллектуальные сети (Smart Grid) и микросетки (microgrid) [2], являются лишь составной ее частью и не решают данной проблемы [3].

Для повышения устойчивости и уменьшения потенциальной зоны поражения в случае каскадных сбоев необходимо осуществить разбиение текущей сетевой инфраструктуры на более мелкие сегменты. Данные сегменты можно соединять посредством различного рода физических преобразователей и подключать каждый из сегментов в виде множества IP адресов, находящихся в ведении у цифрового маршрутизатора [4]. Это интеллектуальное устройство, которое содержит в себе как функции физического преобразования электроэнергии, так и функции хранения, регистрации и последующего доступа к данным в рамках цифровой сети.

Помимо умного/цифрового маршрутизатора, который регистрирует всю выработанную, переданную, сохраненную и потребленную энергию, а также такие свойства, как местоположение, время, источник питания, цена, в сети еще располагаются такие элементы, как умные/цифровые контроллеры, которые связываются с маршрутизатором и интеллектуальным счетчиком у потребителя и прогнозируют предложение и спрос на электроэнергию, и выполняют торги, покупая и продавая энергию через одноранговую сеть с использованием технологии блокчейн [5].

Цифровой маршрутизатор получает результаты торгов, запрашивая данные у контроллера и передает заказчикам желаемую электроэнергию. При этом еще одной функцией контроллера является считывание показателей интеллектуального счетчика после того, как данные о начале торгов были представлены в сеть. В случае, если обговоренное количество энергии было доставлено, то данные о сделке публикуются в блокчейн и осуществляется оплата поставки поставщику, определяемого на основе адреса, зафиксированного в данных маршрутизатора.

Все заявки должны точно выполняться автономным электрооборудованием (так называемыми автономными экономическими агентами) или автономными энергетическими ячейками. Измерения и проверки также выполняются точно и регистрируются в виде журналов аудита данных в блокчейне. Блокчейн обеспечит аутентичность, целостность и временные метки для данных ІоТ устройств в форме так называемых цифровых близнецов [6]. Цифровая валюта с токенами [5] используется для прямых финансовых транзакций между сторонами, которые ранее были неизвестны. Эти механизмы автономны, управляются программным обеспечением и связаны с данными ІоТ о физических передачах. Гибридная структура традиционных энергосистем и ячеек цифровой сети позволит улучшить системы возобновляемой энергии [7]. Проверка совпадения покупки и продажи энергии через рынок становится уравновешивающим механизмом спроса и предложения на электроэнергию, контроль исполнения и финансы с использованием технологии блокчейн могут обрабатываться единым образом.

Целью исследования, проводимого в данной работе, является описание концепции программно-управляемой архитектуры в сети P2P и потенциала ее использования для регионов PФ.

Материалы и методы исследования

Основные компоненты цифровой сети

Цифровая сеть – глобальная синхронизированная система электропитания,

которая подразделяется на системы или подсети электропитания меньшего или среднего размера. Она состоит из следующих компонентов:

Цифровые сетевые маршрутизаторы (ЦСМ). Цифровые сети подключаются асинхронным образом через цифровые сетевые маршрутизаторы (ЦСМ). Таким образом могут быть подключены различные электрические устройства, начиная от генераторов и аккумуляторов и вплоть до мелкой бытовой техники. Все они для ЦСМ представляют собой перечень ІР адресов или идентификаторов блокчейна и могут управляться с помощью цифровых сетевых контроллеров (ЦСК). Помимо данных о физической поставке и распределении энергии необходимо организовать процесс покупки и продажи электроэнергии на локальном рынке. В качестве эффективного инструментария технология блокчейн является хорошим кандидатом. Тем более что опыт внедрения данной технологии для таких приложений, как управление электропитанием, и финансовых транзакций уже существует [8].

С точки зрения физического устройства цифровой сетевой маршрутизатор (ЦСМ) представляет собой шину постоянного тока, к которой подключены двунаправленные инверторы переменного или постоянного тока (рис. 1). Эта концепция расширяет существующую модель двухсторонней связи, которая использует сторону постоянного тока двух двунаправленных инверторов переменного/постоянного тока в качестве общей шины. Основной задачей таких соединений является распределение только активной мощности в обоих направлениях. Таким образом, обмен мощностью между несколькими клеммами переменного тока возможен независимо от частоты или напряжения, обрабатывается даже постоянный ток от источников, таких как батареи или фотоэлектрические элементы питания (PV) [9].

Все инверторы/точки подключения к ЦСМ маркируются адресами в блокчейне и должны пройти первичную регистрацию для подключения к потреблению в сети. Можно говорить о том, что ЦСМ является «программно-определяемым» многоцелевым многоконтактным инвертором, который управляется программным обеспечением в специальном модуле управления. Данный модуль может быть реализован в виде отдельного тонкого клиента для обеспечения управления маршрутизацией тока в сети.

Функциями данного элемента цифровой сети является управление величиной мощности, временем и направлением поставки электроэнергии. Таким образом, используя данный функционал, можно сгруппировать

мощности постоянной величины за 15 или 30 мин как один энергопакет и рассматривать продажу электроэнергии как продажу физических продуктов. Тогда традиционную электроэнергетическую систему можно рассматривать, как высокоскоростную транспортную дорогу товаров, ведущую на различные малые базы потребления, а ячейку можно рассматривать как производственную базу и базу потребления.

Цифровой сетевой контролер (ЦСК)

Всей этой высокоскоростной логистикой необходимо управлять. Задачу такой командной башни в цифровой энергетической сети решает цифровой сетевой контролер. (ЦСК). Его схематичное устройство и связи представлены на рис. 2. ЦСК отдает приказания поглощать, потреблять и генерировать отдельные пакеты мощности, связанные с солнечной энергией, ветром, нагрузкой и накоплением энергии. В случае отправки какого-либо задания на обслуживающий ячейку маршрутизатор, создается запись в блокчейне с указанием адреса отправителя пакета мощности, периода отправки данного пакета мощности, величины пакета, источника мощности (тип генератора), а также адрес получателя.

Указание типа генератора необходимо для сети, в которой одновременно существуют разные типы генерации. Такой сценарий однозначно будет существовать ввиду нестационарности генерируемых мощностей ВИЭ. К примеру, в изолированных регионах РФ, при внедрении альтернативных источников, могут остаться дизельные энергоустановки. Эти установки необходимо каким-то образом выводить из эксплуатации. С планированием этих работ может помочь платформа на базе технологии блокчейн.

Блокчейн-платформа

Данные, которые хранятся в блокчейн, могут быть использованы для сравнения производимых объемов мощности между типами генерации за определенный временной период. Эта аналитика может быть полезна при принятии решения о сроке и стратегии, когда и как выводить устаревшие технологии генерации. Пример структуры таблицы учета передачи пакетов мощности представлен в табл. 1.

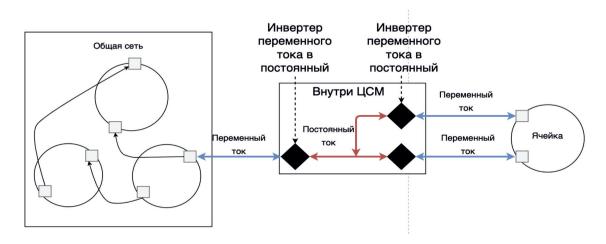


Рис. 1. Схематичное устройство цифрового сетевого маршрутизатора

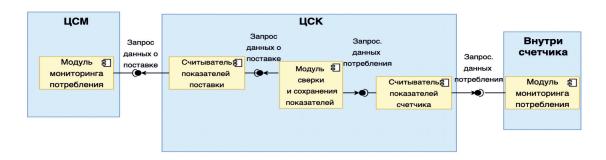


Рис. 2. Пример схемы устройства цифрового сетевого контроллера

Таблица 1 Структура таблицы учета передачи пакетов мощности

ID транзак- ции, UUID	Адрес от- правителя,	Дата/Время отправки,	Дата/Время окончания,	Объем пакета мощ-	Адрес по- лучателя,	Тип генера-	Успех, логический
	хэш-код	Дата	Дата	ности, кВт	хэш код	тора	
dsgdgshs	0xbabf9090c	11.02.2019	11.02.2019	P	0x6c9090c	PV	да
		10:00:00	10:30:00				

Таблица 2 Структура таблицы покупки/продажи пакетов мощности

Адрес отправителя	Дата/Время отправки,	ID транзакции,	Тариф,	Сумма,	Успех,
валюты, хэш код	Дата	UUID	битрубль	битрубль	логический
0xbabf9090c	11.02.2019 10:00:00	dsgdgshs	2,9	2,9P	

Для того, чтобы понять, успешной или нет была передача электроэнергии от источника, проверка условий контракта выполняется на основе опроса контролером интеллектуального счетчика, расположенного у потребителя. Если данные совпадают, то цифровой контролер принимает решение о выдаче оплаты продавцу электроэнергии на адрес отправителя, указанный в табл. 1. Финансовые транзакции записываются в блокчейн также в виде записи, содержащей столбцы, указанные в табл. 2.

Таким образом, остается цифровой след физической передачи электроэнергии и финансовой транзакции. Все записи в блокчейне проходят процесс кросс-валидации или так называемого консенсуса, который задается определенным алгоритмом на платформе. Таким образом, нивелируются риски от кибератак со стороны злоумышленников.

Эволюция энергосетей в контексте перехода на ВИЭ

Текущая архитектура энергетической сети представляет из себя *древовидную* распределительную сеть, корнем которой является главный генератор. Он подает все электричество на местные локальные участки сети через сеть передачи/распределения, подобную стволу дерева или ветви. Поток мощности является однонаправленным от генератора к источнику.

Когда начинается перевод энергосети на распределенные генераторы, такие как солнце, ветер, аккумуляторы, газовые двигатели и т.д., начинается так называемый переходный период. В таком случае распределенный источник питания установлен на конце сети распределения электроэнергии и колебания напряжения будут происходить на местном конце распределения энергии. Однако уровень напряжения должен поддерживаться в определенном диапазоне для электрических приборов клиентов. Воз-

никает проблема сложности контроля уровна напряжения.

Система энергетических ячеек (ячеистая сеть) намного привлекательнее, поскольку с помощью нее можно контролировать поток энергии по этим множественным путям. Однако и в этом подходе существуют свои недостатки. С точки зрения теории электричества [10] для маршрутизации тока можно использовать только один путь, образуя, по сути, радиальную сеть. Именно из-за электрической проблемы электрическая энергия не может образовываться в виде ячеистой сети. Хорошим решением будет наличие инверторного соединения между сетками (или листьями дерева в древовидной сети). Ток в контуре и потери тока будут контролироваться. ЦСМ использует несколько таких соединений в своей структуре и позволяет решить такого рода проблемы.

Ячеистые сети, управляемые ЦСМ, обладают гибкостью в направлении потока мощности, имеют механизм резервирования и становятся энергосистемой с высокой надежностью, даже когда вырабатывается много возобновляемой энергии. Однако возникает проблема управления такой ячеистой сетью. Нереально вручную постоянно анализировать огромное количество потоков энергии, полученных от ЦСМ, и контролировать ЦСК. Также возникают проблемы безопасности из-за геораспределенности источников данных. Данную проблему предлагается решить с использованием технологии блокчейна.

Блокчейн как средство контроля

Децентрализованная информационная технология использует одноранговые сети и позволяет хранить данные IoT в защищенном от кибератак виде, установить контрольные данные (задать рыночные правила игры), обеспечить все данные не-

изменными отметками времени, а также разрешить прямые сделки с контрагентами между ранее неизвестными сторонами без привлечения посредников. Такие сделки могут проводиться между машинами ЦСМ и ЦСК. В случае увеличения потребления в одной ячейке и возможности покрытия спроса другой ячейкой, ЦСК нуждающейся ячейки может послать запрос на соседний ЦСК о необходимости удовлетворения спроса за счет их генераторов. ЦСК, получив последние сведения о потреблении в своей ячейке, принимает решение о проведении этой сделки. Эти операции могут происходить автоматически с использованием таких технологий, как блокчейн (хранение данных), смарт-контракты (регулирование сделок) и машинное обучение (для прогнозирования будущего спроса и принятия решения о выделении ресурсов).

Встраивание блокчейна в цифровую сеть осуществляется с помощью внедрения программного модуля, который устанавливается на устройство, чтобы осуществить идентификацию и дать возможность осуществлять транзакции через сеть Р2Р. Это может быть реализовано в следующих вариантах реализации: 1) в виде микроконтроллера с крипто-чипом, хранящим уникальную пару секретных ключей; 2) легкого клиента для устройств ІоТ. (актуально для использования в интеллектуальных счетчиках); 3) полноценного клиента блокчейн. Данный клиент включает из себя полный набор функций, в том числе аналитику, построение прогнозов, инфраструктурный мониторинг и, самое главное, возможность принятия решения в зависимости от данных вручную человеком. Такой формат особенно необходим для администраторов ячеек, которые занимаются управлением и обслуживанием сети, для инвесторов, для возможности оценки объема рынка и потенциальной выгоды от инвестиций.

Для жителей региона наилучшим образом подходит сочетание тонкого клиента, располагаемого на мобильном устройстве или планшете, и микроконтроллера, установленного в счетчике. ЦСМ/ЦСК подключается либо к цифровому шлюзу, на котором работает клиент блокчейна, либо к другому устройству, на котором работает клиент блокчейна.

Благодаря достоверности и целостности данных можно создать полное цифровое представление об участниках сети. Все метаданные и данные датчиков могут храниться в так называемом *цифровом двойнике* участника физической сети, включая его репутацию/рейтинг, контрольный журнал данных и отметок времени. Еще одним важ-

ным преимуществом использования технологии блокчейна является возможность использования интеллектуальных контрактов для передачи прав собственности на объекты инфраструктуры. Это позволяет получать своего рода арендные платежи в виде комиссии со сделок (за участие в процессе подтверждения) и процента с продаж. Такое владение объектами позитивным образом может сказываться на скорости подтверждения транзакций и работы сети в целом из-за заинтересованности в участии подтверждения сделок ради получения дополнительной прибыли и потенциального увеличения рейтинга на платформе. Схематично физическое размещение можно изобразить так, как это представлено на рис. 3.

Администрирование умной сети и статистика

Условия работы смарт-контрактов, их начальные параметры могут быть заданы администратором сети, каким может являться правительство страны. Еще одним из главных преимуществ использования блокчейна в такой цифровой сети является наличие данных обо всех устройствах, подключенных к блокчейну, и их идентификация (например, входное устройство регистрируется в ЦСМ как солнечный генератор, включая его идентификатор, происхождение, модель используемых генерирующих мощностей). Данные о таких устройствах могут быть использованы для предварительных расчетов уровней надежности, прогнозного значения мощности и реальной себестоимости производства энергии.

Такие данные могут использоваться для генерации зеленого сертификата на энергию [11]. Выпуск таких инструментов позволяет поддерживать проекты по ВИЭ и получать субсидирование государства и инвестиции от частных компаний. Данные инструменты также могут быть реализованы с использованием технологии смарт-контрактов для прозрачности процессов платежей и переводов, что позволяет отслеживать процесс выполнения договоренностей и контроль независимыми организациями.

Результаты исследования и их обсуждение

Переход на использование распределенной генерации возможен при условии использования цифровых технологий и перестройке энергетических сетей в ячеистую структуру. Это поможет полностью автоматизировать существующие процессы по контролю и учету электроэнергии.

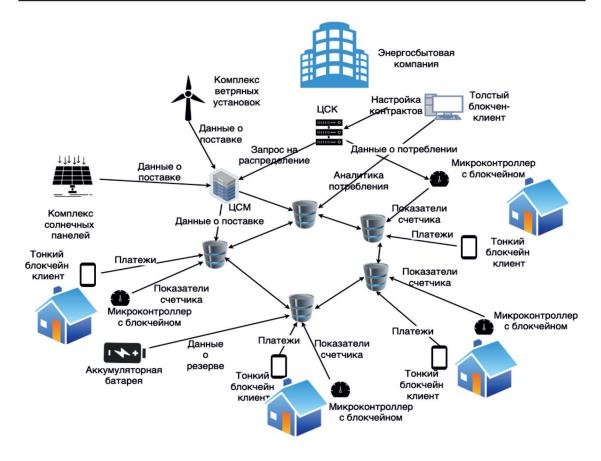


Рис. 3. Пример структуры энергетической ячейки

Еще одним важным направлением в адаптации данных технологий является нормативно-правовое регулирование, а именно закрепление на уровне законодательства новых рыночных механизмов и технологий по их обеспечению. Успешными наработками уже обладают Япония, Германия, Эстония и другие страны [12]. Также большим подспорьем является реализация проектов по зеленой сертификации для материального обеспечения реализации проектов на ВИЭ. Преимуществом для использования цифровой сети в нашей стране является наличие данных для принятия решения по выводу устаревших установок и сетевой инфраструктуры из оборудования. При этом решение может быть принято на различных уровнях и независимыми сторонами, что снижает риски принятия неправильных управленческих решений.

Заключение

В данной работе была представлена концепция инфраструктуры цифровой гетерогенной энергетической сети, основными компонентами которой являются цифровые сетевые маршрутизаторы, как средства

преобразования тока, цифровые сетевые контроллеры, как инструмент управления и распределения мощности в сети, технологии IoT и блокчейн, как инструменты поставки и хранения данных о происходящем в реальной сети.

Еще одним фундаментальным шагом является разбиение текущей инфраструктуры на энергетические ячейки с возможностью автономного распределения и генерации. Это позволяет сохранить допустимый уровень надежности сети и качество сервиса для конечного потребителя при переходе на распределенную генерацию.

Список литературы

- 1. Pahwa Sakshi, Scogli Caterina, Scala Antonio. Abruptness of Cascade Failures in Power Grids. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/259724731_Abruptness_of_Cascade_Failures_in_Power_Grids (date of access: 10.06.2020).
- 2. Aloysius Damar Pranadi. Microgrids and Smart Grids in Definition. ASEAN Centre for Energy. [Electronic resource]. URL: https://aseanenergy.org/microgrids-and-smart-grids-in-definition (date of access: 01.06.2020).
- 3. Huang Zhen, Wang Cheng, Zhu Tieying, Nayak Amiya. Cascading Failures in Smart Grid: Joint Effect of Load Propagation and Interdependence. ReserchGate. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/286384953_Cas-

- cading_Failures_in_Smart_Grid_Joint_Effect_of_Load_Propagation_and_Interdependence (date of access: 05.06.2020).
- 4. Xu Yi, Zhang Jianhua, Wang Wenye, Juneja Avik, Bhattacharya Subhashish. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet. ReserchGate. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/254011993_Energy_Router_Architectures_and_Functionalities_toward_Energy_Internet (date of access: 07.06.2020).
- 5. Melanie Swan. Blockchain. O'Reilly Media. 2015. 149 p.
- 6. Keith Shaw, Josh Fruhlinger. What is a digital twin and why it's important to IoT. Networkworld Digital. [Electronic resource]. URL: https://www.networkworld.com/article/3280225/what-is-digital-twin-technology-and-why-it-matters.html (date of access: 08.06.2020).
- 7. Zohuri Bahman. Hybrid Renewable Energy Systems. ReserchGate. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/321303215_Hybrid_Renewable_Energy_Systems (date of access: 06.06.2020).
- 8. Белкин П.А., Ростовский Н.С., Посмаков Н.П. Применение технологии блокчейн в электроэнергетике как связующей цифровой технологии при переходе на децен-

- трализованную генерацию // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 3. С. 19–24.
- 9. Abe Rikiya, Taoka Hisao, Mcquilkin David. Digital Grid: Communicative electrical grids of the future. Reserch-Gate. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/224196147_Digital_Grid_Communicative_electrical_grids_of_the_future (date of access: 10.06.2020).
- 10. Абрагам А., Беккер Р. Теория электричества. М.: ОНТИ, 1936. $281\ c$.
- 11. Verhaegen Karolien, Meeus Leonardo, Belmans. Ronnie. Towards an international tradable green certificate system The challenging example of Belgium. Reserch-Gate. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/222516482_Towards_an_international_tradable_green_certificate_system-The_challenging_example_of_Belgium (date of access: 10.06.2020).
- 12. Merlinda Andoni, Valentin Robu, D. Flynn, Simone Abram, Dale Geach, David Paul Jenkins, Peter Mccallum, Andrew Peacock. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. Reserch-Gate. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate/publication/328760651_Blockchain_technology_in_the_energy_sector_A_systematic_review_of_challenges_and_opportunities (date of access: 21.05.2020).