

УДК 620.92:621.31:621.3.05
DOI: 10.24412/2658-4255-2021-4-81-91

Для цитирования:

К.А. Змиева Интеграция зеленой и возобновляемой энергетики в интеллектуальную энергетическую систему арктических территорий посредством технологии блокчейна // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 81–91

Получена: 07.12.2021
Принята: 28.12.2021
Опубликована: 29.12.2021



Статья распространяется в полнотекстовом формате на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0

ИНТЕГРАЦИЯ ЗЕЛеной И ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНУЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ПОСРЕДСТВОМ ТЕХНОЛОГИЙ БЛОКЧЕЙНА

К.А. Змиева¹

¹ Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

kirazmieva@mail.ru

Аннотация: Сегодня Арктика характеризуется, с одной стороны, огромным объёмом разведанных запасов углеводородов (основных источников электроэнергии в мире), а с другой – серьёзными проблемами с электроснабжением региона. Самые северные районы России не включены в систему централизованного электроснабжения (по высоковольтным линиям электропередач) и традиционно снабжаются электроэнергией от устаревших дизельных электрогенераторов и небольших угольных станций [1]. Арктика сегодня остро нуждается во внедрении современных автономных возобновляемых источников энергии. Для интеграции «зелёной» энергетики в традиционную систему электроснабжения наиболее эффективно применить концепцию интеллектуальной энергетической сети (smart grid). Интеграция и координация большого количества растущих подключений может быть сложной задачей для традиционной централизованной сетевой системы. Поэтому блокчейны или распределённые бухгалтерские книги вызывают значительный интерес и у разработчиков инновационных решений для энергетического комплекса, и у компаний, занимающихся поставками энергии, а также у финансовых учреждений и правительств развитых стран.

Ключевые слова: энергетика, блокчейн, Арктика, возобновляемые источники энергии, интеллектуальная энергетическая система

INTEGRATION OF GREEN AND RENEWABLE ENERGY INTO THE INTELLIGENT ENERGY SYSTEM OF THE ARCTIC TERRITORIES THROUGH BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES

K. Zmieva¹

¹ Moscow State Technological University "STANKIN", Russia

Abstract: Today, the Arctic is characterized, on the one hand, by a huge amount of proven hydrocarbon reserves (the main sources of electricity in the world), and on the other hand, by serious problems with the region's electricity supply. The northernmost regions of Russia are not included in the centralized power supply system (via high-voltage power lines) and are traditionally supplied with electricity from outdated diesel generators and small coal-fired power plants [1]. The Arctic today is in urgent need of the introduction of modern autonomous renewable energy sources. To integrate "green" energy into the traditional power supply system, it is most effective to apply the concept of an intelligent energy network (smart grid). Integrating and coordinating a large number of growing connections can be challenging for a traditional centralized network system. Therefore, blockchains or distributed ledgers are of considerable interest

to developers of innovative solutions for the energy sector, and companies involved in energy supplies, as well as financial institutions and governments of developed countries.

Keywords: energy, blockchain, Arctic, renewable energy sources, intelligent energy system

Введение

Многочисленные источники, определяют блокчейн технологии, как обладающие потенциалом для получения значительных преимуществ. Блокчейны обещают прозрачные, защищённые от несанкционированного доступа и информационно безопасные (далее – безопасные) системы, которые могут обеспечить новые бизнес-решения, особенно в сочетании с интеллектуальными («смарт») контрактами. Следовательно, интеллектуальная сеть претерпевает трансформацию в децентрализованную топологию из её централизованной формы. С другой стороны, блокчейн обладает некоторыми отличными функциями, которые делают его перспективным приложением для парадигмы интеллектуальных сетей. В этой статье показана возможность применения перспективных блокчейн технологий для управления инновационной энергетической системой, включающей традиционные и возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

В последние несколько десятилетий традиционные централизованные энергетические системы, работающие на ископаемом топливе, столкнулись с некоторыми серьёзными проблемами, такими как передача энергии на большие расстояния, выбросы углерода, загрязнение окружающей среды и энергетический кризис. Для построения устойчивого общества необходимо решать эти проблемы путём использования ВИЭ или «зелёной» энергетики, а также повышения эффективности использования энергии.

Сегодня энергетические системы развитых стран мира претерпевают быстрые изменения, чтобы приспособиться к растущим объёмам встроенной возобновляемой генерации, такой как ветровая и солнечная фотоэлектрическая энергия. ВИЭ претерпели массовое развитие в последние годы, чему способствовали приватизация, разделение энергетического сектора и финансовое стимулирование в области энергетической политики. В 2016 году 24,6% валового потребления электроэнергии в Великобритании было произведено за счёт ВИЭ, в основном за счёт наземных и морских ветряных электростанций и солнечных фотоэлектрических установок, что составляет 44,9% и 12,5% от общей установленной мощности ВИЭ 35,7 ГВт соответственно. В Российской Арктике в силу множества причин, таких как большая удалённость потребителей, неэффективность и дороговизна включения удалённых территорий в централизованную систему энергоснабжения, высокая стоимость привозного топлива, - развитие возобновляемой энергетики является неизбежным. Но есть особенности и сложности во внедрении ВИЭ: их работу трудно предсказать, т.к. она существенно зависит от погодных условий, что порождает новые проблемы в управлении и эксплуатации электроэнергетических систем, поскольку для обеспечения безопасной эксплуатации и стабильности энергоснабжения требуются более гибкие меры. Необходимо одновременно обеспечить быстрое действие таких систем, создать оборудование

и условия для хранения энергии, а также оперативно реагировать на изменение спроса.

В последние годы концепция "умной сети" [2]– [6], которая включает в себя коммуникационные технологии, взаимосвязанную энергосистему, передовые технологии управления и интеллектуальный учёт, начала применяться и для внедрения возобновляемой энергетики. Новым этапом развития Smart Grid стал Smart Grid 2.0 или Энергетический Интернет, представляющий собой эффективную интеграцию «Умной сети» с современными интернет-технологиями. Цель этого нового, инновационного подхода состоит в том, чтобы обеспечить подключение энергии в любом месте и в любое время. Такая концепция была разработана с целью обеспечения того, чтобы все участники энергорынка имели возможность:

- тесно взаимодействовать друг с другом,
- принимать решения самостоятельно,
- обмениваться энергией и связанной с ней информацией в нескольких направлениях,
- плавного доступа к разным типам распределённых энергоресурсов,
- использовать как централизованные, так и распределённые источники энергии,
- производить, продавать, покупать и потреблять энергию в необходимых объёмах.

Поскольку возможности подключения расширяются, серьёзной проблемой является интеграция и координация большого количества подключений, таких как растущие производители распределённой энергии, их потребители, электромобили, интеллектуальные устройства и киберфизические системы в рамках традиционной централизованной сетевой системы. Централизованное управление такой постоянно растущей сетью потребует сложной и дорогостоящей информационно-коммуникационной инфраструктуры. Таким образом, децентрализация является одним из фундаментальных требований при разработке концепции Энергетического Интернета.

Однако децентрализованная интеллектуальная сетевая система с большим количеством компонентов и сложных соединений может оказаться небезопасной в части конфиденциальности информации, надёжности и доверия к самой системе. Для решения этой проблемы предлагается использовать современные технологии блокчейна, уже зарекомендовавшие себя на финансовых рынках [7]–[10].

Сегодня блокчейн открывает новые возможности для создания децентрализованных систем. Для управления блокчейном не требуется центрального доверенного органа; вместо этого несколько объектов в сети могут взаимодействовать между собой для создания, поддержки и хранения цепочки блоков. Каждая организация может проверить, что порядок цепочки и данные не были изменены. То есть такая децентрализованная система устойчива к системным сбоям и кибератакам и решает многие проблемы централизованной системы. Хотя блокчейн изначально представлен как цифровая валюта [11], благодаря своим превосходным свойствам, он привлекает огромное внимание и во многих других неденежных приложениях. В то же время, помимо цифровых валют, блокчейн также способствует реализации безопасных, сохраняющих конфиденциальность и надёжность разработок интеллектуальных сетей в направлении их децентрализации.

Хотя блокчейн в smart grid является новой областью исследований, он

уже привлёк значительное внимание. В настоящее время в разных странах мира ведутся исследования для решения проблем безопасности, конфиденциальности и доверия в интеллектуальных сетях с помощью блокчейна [12]-[15]. Обзор потенциальных преимуществ блокчейна для интеллектуальной энергетической системы представлен в [14], где обсуждаются соответствующие блокчейн-платформы и проекты.

Блокчейн в интеллектуальной сети

В этом разделе представлены потенциальные возможности применения блокчейна в smart grid. Таким образом, сначала подробно обсудим, какой будет будущая интеллектуальная сетевая система. Далее опишем функции блокчейна, а также безопасность, конфиденциальность и цели доверия, которые могут быть решены с помощью блокчейна, чтобы показать, как они в конечном итоге будут мотивировать применять блокчейн в smart grid.

Как обсуждалось во вступительном разделе, концепция smart grid была представлена новой сетевой инфраструктурой, которая использует цифровые вычислительные и коммуникационные технологии для преобразования и модернизации традиционной устаревшей сети в более точную, эффективную и интеллектуальную сеть доступа и доставки энергии. Эти преобразования и модернизация произошли из-за агрессивного изменения климата и необходимости устойчивых источников энергии. Конечной целью этих преобразований и модернизации является реформирование энергетического ландшафта путём интеграции и использования большего количества возобновляемых и распределённых энергетических ресурсов и снижения зависимости от ископаемого топлива. В то время как традиционная устаревшая сеть обслуживает потребителей по линиям передачи на большие расстояния, парадигма интеллектуальных сетей сближает производителей и потребителей друг с другом за счёт развёртывания независимых распределённых производителей возобновляемой энергии.

Совсем недавно была введена концепция энергетического Интернета (EI), которая определяется как обновлённая версия интеллектуальной сетевой системы. EI характеризуется интернет-технологиями для разработки интеллектуальных сетей следующего поколения путём интеграции информации, энергетики и экономики. EI призван предоставить прекрасную возможность для обеспечения беспрепятственной интеграции разнообразных чистых и возобновляемых источников энергии в сеть, а также обеспечить более тесное взаимодействие между различными элементами энергосистемы для создания полностью автономной и интеллектуальной энергетической сети. Ключевая идея EI заключается в том, чтобы можно было эффективно обмениваться как энергией, так и информацией, аналогично обмену данными в Интернете. Элементами подобной сети являются традиционные генераторные установки, микросети, распределённые энергетические ресурсы, генерируемые сообществом энергетические сети, устройства хранения энергии, электромобили, киберфизические системы, потребители, поставщики услуг и энергетические рынки.

Хотя интеллектуальная сеть и Энергетический Интернет призваны обеспечить возможность адаптации как распределённых, так и централизованных источников энергии, одним из ключевых недостатков этой конструкции является наличие централизованной топологии, в которой

производство энергии, сеть транспортировки и доставки и рынки как-то образом зависят от централизованных или промежуточных организаций. В этой централизованной системе элементы интеллектуальной сети взаимодействуют с централизованными объектами, которые могут отслеживать, собирать и обрабатывать данные и поддерживать все элементы соответствующими управляющими сигналами. Кроме того, передача энергии обычно осуществляется по сети на большие расстояния для доставки энергии конечным потребителям через распределительную сеть. К сожалению, из-за быстрого роста числа ВИЭ, а также постоянно растущего числа других элементов, нынешний дизайн системы smart grid вызывает некоторые опасения. Возникают проблемы масштабируемости, расширяемости, больших вычислительных и коммуникационных нагрузок, а также обеспечения безопасности.

Таким образом, трансформация в децентрализованную систему — это тенденция в smart grid, направленная на создание более динамичных, интеллектуальных и упреждающих функций. Сама сетевая инфраструктура также проходит адаптацию и переходит к полностью автоматизированной сети с децентрализованной топологией, чтобы динамично расширять взаимодействие между всеми компонентами интеллектуальных сетевых систем. Возможности подключения и доступности, которые предлагает EI, дополнительно обеспечивают более высокий уровень экономической, эффективной и надёжной работы системы интеллектуальных сетей.

Мотивы применения блокчейна в парадигме Smart Grid

Безопасность, конфиденциальность и доверие являются ключевыми проблемами для каждой системы. Современная интеллектуальная сеть должна обеспечивать:

- надёжность энергоснабжения потребителя,
- запрет получения информации несанкционированными лицами,
- надлежащие криптографические механизмы,
- доступ с правами и привилегиями,
- предоставление доказательств того, что субъект совершил конкретные действия,
- отказоустойчивость, устойчивость к атакам,
- повышение эффективности мониторинга,
- использование передовых методов сохранения конфиденциальности для защиты раскрытия информации
- повышение доверия и прозрачности.

Для традиционных энергосетей большинство решений построено на централизованных моделях, где компоненты сетей зависят либо от централизованных платформ, либо от посредников для получения таких услуг, как выставление счетов, мониторинг, торги, торговля энергией и т.д. Хотя эти решения являются зрелыми и работают правильно, с нынешней системой интеллектуальных сетей связано несколько сложных проблем. Более того, как уже упоминалось ранее, интеллектуальная сеть облегчает интеграцию большого количества электропотребителей. Таким образом, сама топология сети адаптируется и переходит от централизованной топологии к децентрализованной и полностью автоматизированной сети, чтобы обеспечить более тесное взаимодействие между компонентами. Кроме того, рынок интеллектуальных сетей трансформируется в децентрализованную интерактивную сеть для потребителей из центра-

лизованной сети управления производителями с помощью концепции энергетического интернета.

В этой связи применение блокчейна предоставляет возможность облегчить эту трансформацию благодаря следующим функциям, которые делают его подходящим для применения.

Децентрализация: Сеть блокчейна обычно поддерживается различными децентрализованными узлами с помощью согласованных протоколов. Эта сеть обычно может работать в одноранговом режиме, не доверяя централизованному доверенному органу для авторизации и обслуживания.

Масштабируемость: Узлы в сети блокчейна способны расширять сеть по мере того, как всё больше и больше узлов могут присоединяться к сети. В основном это связано с децентрализованным характером блокчейн-сети, которая поддерживается сетью одноранговых узлов.

Безопасность: Сеть блокчейна безопасна, так как узлы не зависят от какого-либо доверенного посредника для связи друг с другом, а также все записи/транзакции защищены асимметричной криптографией. В отличие от других систем, блокчейн не требует слепого доверия определенным объектам.

Неизменяемость: Поскольку технология блокчейна использует криптографические методы и поддерживает глобальную бухгалтерскую книгу, которая синхронизируется между узлами, содержимое внутри блоков не может быть изменено.

Прозрачность и проверяемость: Сеть блокчейнов очень прозрачна по своей структуре, поскольку узлы сети могут проверять подлинность записей и иметь гарантию того, что блоки не будут изменены. Более того, эта прозрачность делает блоки доступными для проверки на любом узле сети, открывая все записи для всех.

Отказоустойчивость: Технология блокчейна обеспечивает устойчивую и отказоустойчивую сеть, в которой любая ошибка или вредоносная деятельность могут быть легко идентифицированы и восстановлены. Эта отказоустойчивость обеспечивается децентрализацией архитектуры без единой точки отказа, а также сохранением всей цепочки всеми узлами в их помещениях.

Таким образом, благодаря функциям, упомянутым выше, наряду с передовыми преимуществами криптографической безопасности, блокчейн может стать многообещающей альтернативой обычным централизованным системам для повышения безопасности, конфиденциальности и доверия, помогая при этом устранить барьеры, чтобы стать более децентрализованной и устойчивой системой. **Блокчейны могут создавать локальные энергетические ориентированные на потребителя рынки или микросети, которые направлены на поддержку местного производства и потребления электроэнергии.** Однако реальную долгосрочную ценность ещё предстоит доказать, тем более что большинство инициативных групп исследователей опробовали технологию в относительно небольших проектах, которые все ещё находятся на ранней стадии разработки. В результате необходимо будет ответить на несколько вопросов, прежде чем широко внедрять блокчейны в энергетической отрасли. Блокчейны сталкиваются с дополнительными рисками, такими как возможные сбои на ранних стадиях разработки из-за отсут-

ствия опыта работы с крупномасштабными приложениями. Экосистемы блокчейна в значительной степени зависят от кодирования новых алгоритмов — процедуры, которая может быть подвержена ошибкам. Нарушения безопасности всё ещё весьма вероятны до того, как технология станет зрелой, что может привести к плохой рекламе и задержкам в принятии от потребителей. Что касается кибератак, Биткойн, старейшая реализация блокчейна, оказалась относительно устойчивой. Важно отметить, что уязвимость в части кибербезопасности часто возникают из периферийных приложений, таких как цифровые кошельки или смарт-контракты. Устойчивость к таким атакам имеет огромное значение, особенно для приложений в критически важной инфраструктуре, таких как энергетические системы. Ещё одна важная проблема заключается в том, что блокчейн-системы в настоящее время имеют высокие затраты на разработку. Блокчейны могут обеспечить значительную экономию средств за счёт обхода посредников, однако в некоторых случаях они могут не иметь конкурентного преимущества по сравнению с существующими решениями на хорошо зарекомендовавших себя рынках. Например, энергетические транзакции могут быть записаны в обычных базах данных, таких как реляционные базы данных, которые предназначены для распознавания связей между хранящимися элементами информации [16]. Эти решения уже в значительной степени доступны и в настоящее время работают быстрее и дешевле, хотя они не могут обеспечить неизменность записей или прозрачность. Для систем блокчейна может потребоваться дорогостоящая новая инфраструктура, такая как специализированное информационно-коммуникационное оборудование и программное обеспечение, затраты на которые должны быть перевешены преимуществами, достигаемыми за счёт целостности данных, повышения безопасности и устранения необходимости в надёжном посреднике.

Интеграция «зеленой» энергетики в традиционную энергетическую систему Арктики с использованием технологий блокчейн

Рассмотрим один из вариантов сценария интеллектуальной сети с использованием блокчейна для реализации в условиях удаленных арктических поселений (рис. 1).

При наличии централизованной электрической сети электроэнергия поступает к потребителю из традиционных (электростанций и проч.) и возобновляемых источников (ветровые фермы, солнечные панели, водород, атомные станции) энергии. Если отдельные населенные пункты или даже отдельные жилые дома оснащены солнечными панелями или собственными ветрогенераторами, появляется возможность накопления и торговли излишками энергии, а также совместного использования ВИЭ несколькими потребителями.

Такую концепцию возможно реализовать, оснастив единичных производителей электроэнергии интеллектуальными счетчиками и программным обеспечением для реализации блокчейна. Накопленная (например, в аккумуляторах) энергия может расходоваться для нужд домохозяйств, в т.ч. для зарядки электромобилей. А может в автоматическом режиме продаваться на специальном энергетическом рынке с помощью смарт-контрактов.

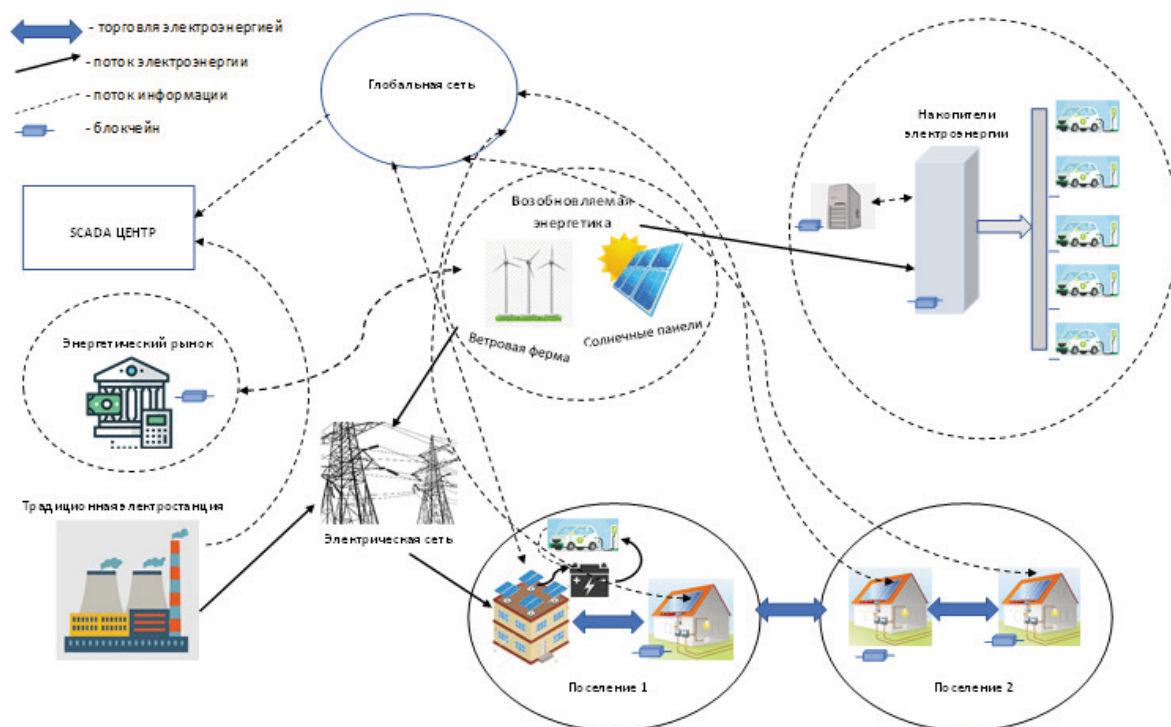


Рисунок 1 — Схема интеграции блокчейн в интеллектуальную энергетическую систему арктических поселков.

Т.о., благодаря внедрению интеллектуальной энергетической системы различные локальные потребители (домохозяйства, отдельные поселки или предприятия) смогут совместно эксплуатировать различные источники энергии, оптимизировать и планировать энергопотребление, продавать друг другу излишки, а также со временем с ростом числа и надежности ВИЭ полностью отойти от использования традиционных углеводородных видов топлива, тем самым значительно снизить экологическую нагрузку на хрупкую природу севера.

Впервые подобная концепция была реализована в США в 2018 году. Это система Brooklyn MicroGrid - основанная на блокчейне платформа P2P для торговли энергией, которой управляет партнерство Transactive Grid. Микросеть, расположенная в сообществах Гованус и Парк-Слоуп в Бруклине, штат Нью-Йорк, завершила трехмесячный пробный запуск P2P-торговли энергией между членами сообщества. Подробный анализ работы этого тематического исследования можно найти в [17]. Потребители и производители смогли продавать излишки энергии напрямую своим соседям с помощью смарт-контрактов. Первое испытание включало 5 владельцев солнечных батарей и 5 соседних потребителей и привело к первой в истории энергетической транзакции, зарегистрированной в блокчейнах по всему миру. Избыток энергии измеряется специально разработанными интеллектуальными счетчиками, которые могут обрабатывать измерения и данные физической энергии и последовательно преобразуются в эквивалентные энергетические токены, которыми можно торговать на местном рынке. Токены указывают на то, что определенное количество энергии было произведено с помощью солнечных панелей и может быть передано из кошелька смарт-счетчика продавца конечным потребителям с использованием технологии блокчейн. Токены удаляются интеллектуальным прибором учета (смарт-счетчиком) потребителя, так как купленная энергия используется в доме.

Пользователи Microgrid взаимодействуют с платформой, указывая свои

индивидуальные ценовые предпочтения в форме готовности платить или продавать электроэнергию. Платформа может отображать цены на энергоносители в зависимости от местоположения и в режиме реального времени. На начальном этапе проекта пользователи вручную запускают соглашение на платформе, условия которого записаны в блокчейне. В бухгалтерской книге записываются условия контракта, стороны, участвующие в сделке, объемы вводимой и потребляемой энергии, измеренные приборами учета, и, что особенно важно, хронологический порядок транзакций. Кроме того, платежи автоматически инициируются самостоятельно заключенными контрактами. Каждый член сообщества может иметь доступ ко всем историческим транзакциям в бухгалтерской книге и самостоятельно проверять транзакции.

После первого испытания более 300 домов и малых предприятий, в том числе около 50 владельцев фотоэлектрических систем и один небольшой генератор ветряных турбин, подписали контракт на следующий этап разработки, целью которого является достижение полностью автоматизированных транзакций. Участники Microgrid смогут в будущем не только решать, у кого покупать/продавать энергетические токены, основываясь на своих ценовых предпочтениях, но и на других критериях, отражающих их экологические или социальные ценности. Например, потребитель может указать максимальную цену, которую он готов потратить на возобновляемую энергию местного производства, но он также может указать другие предпочтения, такие как процент энергии, которую он готов приобрести у местных ВИЭ или у основной сети. Пользователи могут даже расставлять приоритеты при продаже/покупке энергии у друзей, семьи или конкретного соседа.

Механизм функционирования энергетического рынка, планируемый в будущем, аналогичен тому, как работают фондовые рынки. Платформа будет регистрировать интерес покупателей и продавцов (ставки /предложения) в книге заказов. Пользователи смогут изменять свои ценовые предпочтения в режиме реального времени. Энергия местного производства будет сначала выделена тем, кто предложит самую высокую цену. В будущем пользователи смогут собирать историческую информацию о ценах и, следовательно, изучать и адаптировать свои стратегии торгов. Проект Brooklyn MicroGrid призван служить испытательным полигоном для изучения новых бизнес-моделей, способствующих вовлечению потребителей в общественные проекты. Локализованная торговля энергией открывает потенциал для экономии затрат на электроэнергию, однако многочисленные исследовательские вопросы остаются открытыми для обсуждения. Блокчейны позволили применять экономику совместного использования в энергетическом секторе, что возможно приведет в будущем к значительной демократизации энергетики.

Заключение

В условиях Российской Арктики, где централизованная энергосистема (линии электропередач) зачастую отсутствует, а местные жители и предприятия вырабатывают электроэнергию в основном путем сжигания привозного топлива, поиск путей автономного энергообеспечения потребителей является важнейшей задачей. Сегодня топливо поставляется в Арктику в рамках так называемого «северного завоза», и в связи с высокой удаленностью регионов севера, ограниченными летним пери-

одом сроками доставки и устареванием существующих дизель-генераторов стоимость электроэнергии на них получается очень высокой, а экологическая нагрузка на природу - существенной.

Внедрение ВИЭ у локальных потребителей – задача важная, но одновременно сложная и дорогостоящая. Тем важнее является поиск путей наиболее эффективного их использования. Реализация концепции интеллектуальной энергетической сети на основе блокчейна является наиболее приемлемым решением. Благодаря внедрению такой системы различные локальные потребители (домохозяйства, отдельные поселки или предприятия) смогут совместно эксплуатировать различные источники энергии, в т.ч. ВИЭ, оптимизировать и планировать энергопотребление, продавать друг другу излишки, а также со временем полностью отойти от использования традиционных углеводородных видов топлива, тем самым значительно снизить экологическую нагрузку на хрупкую природу севера.

Список литературы:

1. К.А. Змиева Проблемы энергоснабжения арктических регионов // Российская Арктика. 2020. № 8. С. 5-14.
2. G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2589–2625, 2020.
3. S. Kakran and S. Chanana, "Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 524–535, 2018.
4. M. H. Rehmani, M. Reisslein, A. Rachedi, M. Erol-Kantarci, and M. Radenkovic, "Integrating renewable energy resources into the smart grid: Recent developments in information and communication technologies," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 2814–2825, 2018.
5. T. Dragicević, P. Siano, S. Prabakaran et al., "Future generation 5G wireless networks for smart grid: A comprehensive review," *Energies*, vol. 12, no. 11, p. 2140, 2019.
6. N. Shaukat, S. Ali, C. Mehmood, B. Khan, M. Jawad, U. Farid, Z. Ullah, S. Anwar, and M. Majid, "A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1453–1475, 2018.
7. N. Shaukat, B. Khan, S. Ali, C. Mehmood, J. Khan, U. Farid, M. Majid, S. Anwar, M. Jawad, and Z. Ullah, "A survey on electric vehicle transportation within smart grid system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1329–1349, 2018.
8. M. Z. Gunduz and R. Das, "Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions," *Computer Networks*, p. 107094, 2020.
9. P. Kumar, Y. Lin, G. Bai, A. Paverd, J. S. Dong, and A. Martin, "Smart grid metering networks: A survey on security, privacy and open research issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2886–2927, 2019.
10. A. Ghosal and M. Conti, "Key management systems for smart grid advanced metering infrastructure: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2831–2848, 2019.
11. H. Shayeghi, E. Shahryari, M. Moradzadeh, and P. Siano, "A survey on microgrid energy management considering flexible energy sources," *Energies*, vol. 12, no. 11, p. 2156, 2019.
12. S. Nakamoto et al., "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," 2008.
13. J. Wu and N. Tran, "Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview," *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3067, 2018.
14. M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, and A. Peacock, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 143–174, 2019.
15. N. U. Hassan, C. Yuen, and D. Niyato, "Blockchain technologies for smart energy systems: Fundamentals, challenges, and solutions," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 106–118, 2019.
16. Su, Y. Wang, Q. Xu, M. Fei, Y.-C. Tian, and N. Zhang, "A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4601–4613, 2018.
17. E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, C. Weinhardt Designing microgrid energy markets A case study: the Brooklyn Microgrid Appl Energy, 210 (2018), pp. 870-880.

References:

1. K. Zmieva Problemi energosnabzheniya arkticheskikh regionov // Russian Arctic. 2020. №8. P. 5-14.
2. G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2589–2625, 2020.
3. S. Kakran and S. Chanana, "Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 524–535, 2018.
4. M. H. Rehmani, M. Reisslein, A. Rachedi, M. Erol-Kantarci, and M. Radenkovic, "Integrating renewable energy resources into the smart grid: Recent developments in information and communication technologies," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 2814–2825, 2018.
5. T. Dragicević, P. Siano, S. Prabaharan et al., "Future generation 5G wireless networks for smart grid: A comprehensive review," *Energies*, vol. 12, no. 11, p. 2140, 2019.
6. N. Shaukat, S. Ali, C. Mehmood, B. Khan, M. Jawad, U. Farid, Z. Ullah, S. Anwar, and M. Majid, "A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1453–1475, 2018.
7. N. Shaukat, B. Khan, S. Ali, C. Mehmood, J. Khan, U. Farid, M. Majid, S. Anwar, M. Jawad, and Z. Ullah, "A survey on electric vehicle transportation within smart grid system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1329–1349, 2018.
8. M. Z. Gunduz and R. Das, "Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions," *Computer Networks*, p. 107094, 2020.
9. P. Kumar, Y. Lin, G. Bai, A. Paverd, J. S. Dong, and A. Martin, "Smart grid metering networks: A survey on security, privacy and open research issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2886–2927, 2019.
10. A. Ghosal and M. Conti, "Key management systems for smart grid advanced metering infrastructure: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2831–2848, 2019.
11. H. Shayeghi, E. Shahryari, M. Moradzadeh, and P. Siano, "A survey on microgrid energy management considering flexible energy sources," *Energies*, vol. 12, no. 11, p. 2156, 2019.
12. S. Nakamoto et al., "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," 2008.
13. J. Wu and N. Tran, "Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview," *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3067, 2018.
14. M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, and A. Peacock, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 143–174, 2019.
15. N. U. Hassan, C. Yuen, and D. Niyato, "Blockchain technologies for smart energy systems: Fundamentals, challenges, and solutions," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 106–118, 2019.
16. Su, Y. Wang, Q. Xu, M. Fei, Y.-C. Tian, and N. Zhang, "A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4601–4613, 2018.
17. E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, C. Weinhardt Designing microgrid energy markets A case study: the Brooklyn Microgrid *Appl Energy*, 210 (2018), pp. 870–880.