

Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра

М. В. Горбунова^а, магистрант, orcid.org/0000-0003-2186-1064, mvgorbunova@edu.hse.ru
А. Я. Омётов^б, научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-3412-1639, aleksandr.ometov@tuni.fi
М. М. Комаров^а, канд. техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-7075-0016, mkomarov@hse.ru
С. В. Беззатеев^в, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@aanet.ru
^аНациональный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Мясницкая ул., 20, Москва, 101000, РФ

^бУниверситет Тампере, Коркеакоулункату 10, Тампере, 33720, Финляндия

^вСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: в современном мире в различных сферах деятельности появляются новые проблемы, решение которых достигается использованием технологии распределенного реестра. Переход к данной технологии обусловлен тем, что централизованные системы уже не могут гарантировать требуемый уровень доступности и надежности, а распределенные общедоступные системы все еще находятся в ранней фазе развития. **Цель:** анализ применимости технологии распределенного реестра в таких отраслях, как экономика, энергетика, финансы, логистика, торговля и интернет вещей. **Результаты:** проведен систематический обзор исследований в области технологии распределенного реестра. Выявлены основные проблемы интеграции технологии в существующие отрасли: отсутствие единой системы для хранения данных, обеспечение надлежащего уровня конфиденциальности информации, интеграция в существующие системы компетенций, сложность взаимодействия распределенных систем с маломощными узлами интернета вещей, отсутствие надлежащих инструментов управления распределенными системами и, без сомнения, масштабируемость сети. Предложены потенциальные пути и технологии, применимые для решения данных проблем.

Ключевые слова – распределенный реестр, технология распределенного реестра, блокчейн, интернет вещей.

Для цитирования: Горбунова М. В., Омётов А. Я., Комаров М. М., Беззатеев С. В. Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 10–19. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

For citation: Gorbunova M. V., Ometov A. Y., Komarov M. M., Bezzateev S. V. Survey of distributed ledger technology integration challenges. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 10–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

Введение

С каждым годом количество новых сервисов и устройств на рынке растет экспоненциально [1]. Все больше функций, привычно ранее выполняемых человеком, он переносит на различные устройства с целью облегчить жизнь и более эффективно использовать время. При этом устройства не только становятся с каждым годом более энерго- и вычислительно мощными, но и получают возможность более эффективно обрабатывать информацию, а также самостоятельно принимать решения. Однако централизованная координация непрерывно растущего числа устройств уже сейчас становится проблематичной [2]. Для обеспечения эффективного взаимодействия сложно масштабируемых систем была предложена технология распределенного реестра.

Технология распределенного реестра (Distributed Ledger Technology — DLT) — это база данных активов, которая может быть распределена по сети, в разных географических зонах или ор-

ганизациях [3]. Используя разнообразные методы, DLT позволяет решать ряд сложных задач в различных отраслях, обеспечивая дополнительный защищенный уровень абстракции для прямого взаимодействия между разнородными системами. Основной компонентой DLT является технология блокчейн, которая, в свою очередь, строится на технологии результата исполнения функций свертки (хеш-цепочек и хеш-деревьев). Главная особенность технологии блокчейн в том, что каждый последующий блок основан на предыдущих, что обеспечивает неизменность всей цепочки блоков. В данной работе приводится сравнительный анализ существующих систем распределенного реестра и значительное внимание уделяется соответствующим проблемам эксплуатации DLT.

В рамках этого обзора рассмотрены перспективы применения DLT в различных сферах деятельности и особенности применения этой технологии, описываются предпосылки возникновения и предлагаются пути решения выявленных проблем.

Сферы использования DLT

В настоящее время потенциал применения технологии DLT прослеживается практически во всех сферах жизни общества, начиная со здравоохранения и заканчивая сложными информационными системами. В данном разделе обсуждаются наиболее перспективные направления развития этой технологии.

Интернет вещей

Самой популярной отраслью применения технологии распределенного реестра является интернет вещей (Internet of Things — IoT). Множество проектов были сосредоточены на этой комбинации для решения задач умного города, интеллектуальных сетей, Интернета и децентрализованных приложений, большинство из которых основано на технологии блокчейн. Работа [4] рассматривает взаимодействие технологий IoT и DLT. В этой статье основное внимание уделяется новым и более широким техническим проблемам, связанным с решениями безопасности и работы серверной платформы на основе DLT для устройств и приложений IoT. В работе [5] также рассматриваются методы взаимодействия интернета вещей и распределенного реестра. Авторы сосредоточились на аспектах связи, представляя архитектуру распределенных доверительных сетей на основе DLT, и предложили новую классификацию для упрощения синхронизации DLT в классических сетях. Исследование показало, что беспроводные системы являются серьезной проблемой стабильного функционирования протоколов синхронизации.

Технологии распределенного реестра на основе ориентированного ациклического графа (Directed Acyclic Graph — DAG) также могут применяться в ряде приложений в области IoT [6]. Распределенный реестр должен служить неизменной и необратимой записью транзакций, однако структура DAG является более сложным математическим объектом, чем его аналоги в блокчейне (а именно, позволяет ветвление дерева хешей), и, как следствие, обеспечение целостности данных становится более сложной задачей в противовес скорости работы такой системы.

Интернет вещей также часто связывают с понятием искусственного интеллекта (Artificial Intelligence — AI). Вопрос о возможности сделать AI безопасным для человека в контексте распределенных систем обсуждается в работе [7]. На данный момент не существует никаких доказательств, что полный переход на AI-системы будет приносить пользу людям, а не вредить им или, в худшем случае, не приводить к летальным исходам. В исследовании предлагается ряд компонентов, которые необходимы и достаточны

для обеспечения различных сценариев работы AI без вреда человеку. DLT является неотъемлемой частью этого предложения, например, смарт-контракты необходимы для решения проблемы развития AI, которое будет происходить слишком быстро для обеспечения оперативного вмешательства человека.

Здравоохранение

Одна из основных проблем медицинской индустрии — отсутствие единой системы для хранения данных [8]. В настоящее время для решения данной задачи применяются облачные централизованные хранилища, которые являются индивидуальными для разных сетей клиник, однако такая тенденция пока не распространяется на систему здравоохранения в целом. Это приводит к тому, что отсутствуют полная история болезни, список поставленных когда-либо диагнозов, сданных анализов, нет возможности отслеживать тенденции в показателях пациента и производить полноценную аналитику.

Существует ряд других проблем, которые рассматривают исследовательские группы по всему миру. В работе [9] предлагается распределенная система обмена данными о здоровье пациентов. Данные генерируются двумя типами устройств IoT — носимыми устройствами и стационарными датчиками. Механизм совместного использования данных обеспечивается с помощью распределенного реестра, основанного на системе под названием Tangle, которая представляет собой DAG. Для обеспечения надежной аутентификации применяется протокол потокового шифрования с маскированием (Masked Authenticated Messaging — MAM). Для обеспечения целостности данных используется дерево хешей Меркла.

Следующий проблемный аспект сферы медицинского обслуживания — это необходимость обеспечивать надежную конфиденциальность данных [10], в частности для защиты врачебной тайны. В большинстве случаев пациент не может иметь полное представление о несанкционированной обработке и передаче его медицинских данных.

В исследовании [11] также представлена система, которая позволяет осуществлять детальный персонифицированный контроль доступа третьей стороны к электронным медицинским картам пациентов, позволяющий однозначно подтвердить факт такого обращения. В ходе исследования был разработан прототип данной системы DLT, в котором приводятся записи о факте обработки информации с использованием смарт-контрактов, разработанных блокчейн-платформой на языке Solidity. На момент написания этого обзора в разработанной авторами [11] системе соответствующие данные были приведены в со-

вместимый с Ethereum байт-код и размещены в реестре.

Образование

Применение смарт-контракта Solidity позволяет заносить в DLT разнообразные данные, в том числе и профессиональные компетенции, что рассмотрено в работе [12]. В этой статье предложена процедура разработки реестра профессиональных компетенций населения и представлен алгоритм расчета ключевых компонентов индекса образования на основе Ethereum. Кроме того, разработана балльная модель для расчета этих параметров и представлена схема источника смарт-контракта Solidity, который реализует предложенный алгоритм.

Технология блокчейн позволяет создать децентрализованную среду, в которой транзакции и данные не контролируются какой-либо сторонней организацией. Основываясь на данной технологии и системе перевода и накопления кредитов (European Credit Transfer and Accumulation System — ECTS), в работе [13] предлагается создать глобальную кредитную платформу высшего образования под названием EduCTX. На основе одноранговой сети EduCTX будет обрабатывать, контролировать собственные аналогичные ECTS токены, получаемые студентами за пройденные курсы, и управлять. Университеты в данном случае выступают в роли партнеров сети.

Блокчейн можно использовать и в совокупности с другими операционными средами. В работе [14] предложена платформа TEduChain для сбора средств и управления ими студентами, получающими высшее образование. Субъектами платформы являются студенты и спонсоры. Предлагаемая платформа состоит из двух различных операционных сред: традиционной структуры, управляемой реляционной базой данных, и блокчейн-структуры на основе распределенного реестра.

Цепочки поставок

Популярной нишей DLT является отрасль формирования и отслеживания поставок продуктов питания [15]. Разработанная система позволяет предоставить защищенную с точки зрения конфиденциальности и целостности запись транзакций и связанных метаданных (происхождение, контракты, этапы процесса, изменения среды, микробиологические записи и т. п.) для последующей обработки. Способность отслеживать маршрут движения продуктов питания юридически обязательна для всех участников данной цепочки. Международные стандарты отслеживания пищевых продуктов устанавливаются с помощью совместной программы Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН и Всемирной

организации здравоохранения, а принципы возможного слежения за поставками пищевых продуктов изложены в документе о системах контроля и сертификации импорта и экспорта пищевых продуктов САС/GL 60–2006.

В работе [16] предлагается создать новый протокол под названием «Биометрический блокчейн» (Biometric Blockchain — BBC), в котором биометрические характеристики отдельных лиц явно включены в протокол BBC для однозначной идентификации пользователей системы. Такой протокол может, в частности, удовлетворить растущие потребности в обеспечении логистики продуктов питания, что особенно актуально после недавнего инцидента с неправильно маркированными продуктами питания, который привел к гибели пассажира в самолете [16]. Преимущества использования BBC в логистике продуктов питания очевидны: система позволяет не только определить, являются ли данные или этикетки подлинными, но также четко указать, кто несет ответственность.

Лицензирование

Следующей сферой деятельности, в которой используются DLT, является лицензирование. В частности, в работе [17] рассматриваются самые современные приложения на основе технологии блокчейн, которые поддерживают лицензирование и распространение интеллектуальной собственности. Сравняются как нетехнические, так и технические критерии приложений. Нетехнические критерии используют для оценки диапазона функций, которые предоставляют приложения, в то время как технические критерии помогают изучить технологию для реализации приложений. Авторами также проанализированы и классифицированы восемь различных платформ в соответствии с выбранными критериями.

В работе [18] большое внимание уделяется мерам обеспечения технической защиты (Trusted Platform Module — TPM), информации об управлении правами (Remote Method Invocation — RMI) и управлению цифровыми правами (Digital Rights Management — DRM) при разработке структуры блокчейн. Кроме того, в рамках работы выделены характеристики технологии блокчейн, которые относятся к авторскому праву, рассмотрены случаи ее использования для частного заказа и разработан интерфейс с правовой защитой DRM.

Финансы

Технология распределенного реестра может быть внедрена не только в области IoT, здравоохранения и образования, но и в самые крупные отрасли экономики государства, такие как

финансы. В 2018 г. произошел беспрецедентный сдвиг в сторону потенциального принятия инфраструктуры DLT и сделаны первые шаги в сторону признания криптовалют как нового класса активов, управляющих капиталом и инвесторами. Многие авторитетные финансовые посредники, в том числе Fidelity Investments, Ameritrade, JPMorgan Chase и Intercontinental Exchange, осознали, что они не должны оставаться равнодушными к революции DLT XXI века и ее последствиям для всей экономики.

Например, в работе [19] показано, что DLT влияет на традиционную финансовую индустрию, а также рассмотрен ряд возможных путей трансформации финансовых услуг экосистемой DLT. Принятие новой инфраструктуры, основанной на DLT, будет происходить по трем основным направлениям:

- 1) через обслуживание существующей и потенциальной клиентской базы как на розничном, так и на институциональном уровне;
- 2) через улучшение внутренних и внутриотраслевых процессов, которые остаются медленными, дорогими и подверженными ошибкам;
- 3) путем перевода как ликвидных, так и неликвидных активов к виртуальным токенам, создания новых финансовых продуктов и расширения рынка.

В целом вышеуказанные изменения откроют новые возможности для создания богатства в финансовой индустрии.

Авторы работы [20] рассматривают использование DLT для поддержания инфраструктуры рынка ценных бумаг, что обещает решить серьезные проблемы фрагментации и нарушения прав собственности, которые также препятствуют прозрачности рынка.

Энергетика

К концу 2016 г. около 25 % выработки электроэнергии во всем мире происходило из возобновляемых источников энергии, причем основными источниками энергии были энергия ветра, биоэнергетика и солнечная энергия. Существующие системы могут автоматически регулировать поглощение энергии, интеллектуально реагируя на внешние сигналы. В данном случае DLT может быть использован для передачи данных в реальном времени между множеством участников сети в целях более эффективного использования ресурсов. Предлагаемая система основана на двух ключевых концепциях: управлении передачей электроэнергии и пиринговых сетях (Peer-to-Peer — P2P) посредством DLT. В рамках работы [21] дана оценка потенциала DLT для транзитного обмена энергией на локальных рынках, описана новая инфраструктура управления, основанная на DLT, и предложен новый протокол единого

согласия, который не требует дополнительных энергозатрат.

В работе [22] также освещаются различные концепции и технологии для транзитного обмена электроэнергией с учетом DLT. Авторы заявляют, что традиционные централизованные энергетические системы уже не являются жизнеспособными. С одной стороны, одноранговые энергетические транзакции на основе DLT и установка соответствующих контроллеров на местных энергетических рынках представляют собой, по мнению авторов, наиболее вероятный шаг эволюции будущих интеллектуальных сетей. Данное утверждение подтверждается приведенными пилотными проектами. В рамках этой работы предложена и описана разработанная и реализованная инфраструктура транзакционного управления на основе технологии блокчейн и смарт-контрактов.

Концепция паутины вещей (Web of Things — WoT) является новой вехой концепции IoT, направленной на преодоление барьеров между ограниченными сетевыми средами. В WoT решена проблема совместимости путем установления взаимодействия на уровне приложения. Работа [23] расширяет видение WoT в области децентрализованных интеллектуальных сетей для создания цельной, гибкой и автономной, технически и экономически взаимосвязанной системы, представленной на интегрированной бизнес-платформе распределенных энергетических ресурсов HEILA. В частности, эта работа посвящена системе управления микросетями и демонстрирует ее архитектуру в срезе шаблонов проектирования WoT.

Основные проблемы внедрения DLT

С любой технологической революцией появляются проблемы адаптации уже сформировавшихся систем к новым процессам. Внедрение DLT также несет в себе ряд потенциальных сложностей, рассмотренных ниже.

Масштабируемость

В последние годы многие типы распределенных приложений становятся все более масштабными. Эта тенденция в первую очередь обусловлена количеством пользователей, получающих доступ к таким приложениям. В то время как базовые приложения с тысячами пользователей легко масштабируются, такие приложения, как Facebook, Twitter и eBay, имеют миллионы и сотни миллионов пользователей, а функциональность приложений также обеспечивает высокую степень взаимодействия между ними. Соответственно, такие распределенные системы

требуют высокого уровня масштабируемости. В исследовании [24] рассматриваются практические последствия обнаружения услуг в системах с большим их количеством. В ходе исследования было выявлено, что сервисы могут появляться и исчезать динамически в любое время, что негативно влияет на общее состояние системы.

Существуют и другие подходы решения проблемы масштабируемости, один из которых предложен в статье [25]. Разработчики сталкиваются с необходимостью нахождения компромисса между характеристиками DLT (например, доступностью и согласованностью), поскольку следование требованиям одной характеристики может препятствовать соблюдению других. Таким образом, если одна архитектура DLT может идеально подходить для конкретного варианта использования, ее применение для других сценариев может оказаться пагубным, что стимулирует появление разнообразных конструкций DLT (например, Ethereum, IOTA или Tezos). В статье были выявлены существующие особенности межблокчейновой интеграции (Cross Chain Technology — CCT) и представлены ее основные характеристики. Затем эти характеристики были приведены к единой системе, что позволяет легко и всесторонне их сравнивать. CCT может помочь расширить функциональность приложений, основанных на дизайне DLT (например, Hyperledger Fabric), осуществляя платежи, например, через Ethereum.

В следующем исследовании [26] продолжен анализ проблематики поиска компромиссов между характеристиками DLT. Подобные компромиссы препятствуют созданию универсального DLT-проекта, отвечающего требованиям всех приложений DLT. В работе представлен всеобъемлющий, синтезированный из литературы по DLT, набор из 49 характеристик DLT, которые авторы сочли актуальными для рассмотрения при разработке жизнеспособных приложений на DLT. Кроме того, проведен углубленный анализ зависимостей и полученных компромиссов между характеристиками DLT. Наконец, в шесть архетипов были объединены 26 идентифицированных компромиссов и объяснено их значение для приложений DLT.

Использование DLT может также стать эффективным способом решения проблем высоконагруженных систем. Например, правительство может вести реестр для хранения информации о предприятиях, включая их номер и название. Однако централизованная служба, поддерживающая реестр, является единственной точкой отказа для всей системы. В работе [27] представлен онлайн инструмент для генерации и развертывания реестров на основе смарт-контрактов с возможностью удобного доступа с использованием передачи состояния представления.

Еще один путь для решения вопроса масштабируемости — это виртуализация элементов системы [28]. В частности, в предложенной виртуализации для DLT (vDLT) основные ресурсы (например, аппаратные средства, вычисления, хранилище, сеть и т. д.) абстрагированы. Предоставляя логическое представление ресурсов, vDLT может значительно повысить производительность, облегчить изменения системы, а также упростить управление и настройку DLT. В этой статье также описаны несколько вариантов работы vDLT, включая vDLT на основе DAG и vDLT на основе блокчейна, механизмы побочных каналов в vDLT, а также отделение управления от трафика.

Дизайн DLT

Помимо масштабируемости, дизайн DLT также играет важную роль в выполнении тех или иных функций системой. Для каждой отрасли могут использоваться различные подходы к дизайну системы. Например, работа [29] предлагает использовать архитектуру R3 Corda, доступ к коду которой не является свободным. Система была спроектирована с сетевой архитектурой, отличной от существующих систем блокчейна. В ней узел может работать на личном мобильном устройстве пользователя. Это позволяет пользователям хранить свои данные и управлять ими напрямую, а также обмениваться данными с авторизованными участниками сети. Основной же проблемой при выборе дизайна DLT, по мнению авторов, является необходимость структурного сравнения конструкций.

В статье [30] подбираются и вводятся характеристики DLT для глубокого сравнения соответствующих элементов реестра. Кроме того, предлагается процесс сравнительного анализа, который позволяет структурировать проекты DLT в соответствии с требованиями приложения.

Несмотря на отсутствие примеров практического применения сравнительных характеристик DLT, авторы работы [31] утверждают, что дизайн DLT должен быть настроен на специфические контекстные требования. Успешная конфигурация DLT предполагает глубокое понимание характеристик DLT и их взаимозависимостей. В этом исследовании рассматриваются 37 характеристик DLT, которые разделены на шесть групп (максимальное использование, максимальная гибкость разработки, максимальная производительность, максимальная анонимность, максимальная безопасность, максимальная институционализация).

Доверительное управление

Технология распределенного реестра и интернет вещей всегда идут в совокупности с понятием

доверительного управления. Авторы работы [32] предлагают полностью децентрализованную архитектуру системы межмашинного взаимодействия (Machine-to-Machine — M2M), в которой услуги M2M могут быть быстро и гибко адаптированы для конкретных требований приложения. Децентрализованный характер предоставления услуг исключает единую точку отказа и повышает эффективность путем распределения ресурсов между участниками, что было уже упомянуто в других исследованиях.

В работе [33] также рассматривается использование технологии блокчейн в качестве инструмента обеспечения доверительного управления. Авторы предлагают применить теорию неформального управления как к техническому проектированию, так и к разработке ряда систем DLT, включая криптовалюты и корпоративные приложения, что приведет к применению также и в киберфизических системах (Cyber-Physical Systems — CPS). Из-за использования автономно действующих CPS возникают новые проблемы, связанные, с одной стороны, с необходимостью гибкости, функциональной совместимости, согласованности, с другой — с требованием обеспе-

чения надежности систем при взаимодействии между собой.

В исследовании [34] предлагается техническая концепция для внедрения систем производства на основании DLT и методе GAIA. Метод GAIA — это метод разработки на основе агентов, тесно связанный с объектно-ориентированными методами разработки. GAIA берет свое начало в представлении многоагентной системы (Multi-Agent System — MAS) как вычислительной системы, состоящей из узлов с различными ролями. Он нацелен на разработку MAS и фокусируется на безопасности и надежности сред CPS. В качестве варианта DLT авторами рекомендуется структура блокчейна с механизмом согласования, базированным на задаче византийских генералов.

Заключение

Проведенный обзор публикаций, посвященных современным технологиям распределенного реестра и различным областям его использования, позволил представить аналитический обобщающий результат в виде сводной таблицы.

- Основные проблемы и потенциальные пути их решения
- Main DLT integration challenges and potential solutions

Отрасль	Описание проблематики	Приложения	Потенциальные пути решения
Интернет вещей	Взаимодействие IoT и DLT требует обеспечения высокого уровня защищенности информации	DAG, IOTA, Tangle, MCMC IOTA, блокчейн, смарт-контракты	Особенные алгоритмы и протоколы Анализ негативных последствий и исправление сценариев
	Необходимость управлять безопасностью сценариев развития AI в контексте IoT		
	Отсутствие инструментов доверительного управления при взаимодействии разнородных систем	GAIA, UML, блокчейн с механизмом PBFT	Техническая концепция на основе DLT
Здравоохранение	Отсутствие единой системы для хранения данных между разными медицинскими учреждениями	DAG, IOTA, Tangle, MAM, дерево хешей Меркла, Solidity, Ethereum, смарт-контракты	Распределенная система обмена данными о здоровье пациентов Система с записями о предложениях, об участниках, которые предоставили свои данные или отклонили предложение
	Необходимость обеспечивать высокий уровень конфиденциальности информации		
	Невозможность отслеживать движение персональной информации пациентом		
Образование	Отсутствие единой системы компетенций, информации о местах обучения и образовательных возможностях соискателей	Solidity, Ethereum, блокчейн	Децентрализованная система кредитования высшего образования Система аттестации Реестр профессиональных компетенций населения
	Отсутствие единой системы аттестации		
	Отсутствие возможности спонсирования студентов		

■ Окончание таблицы

■ End of the table

Отрасль	Описание проблематики	Приложения	Потенциальные пути решения
Цепочки поставок	Отсутствие способности отслеживать поставки продуктов питания, их происхождение и перемещение	Протоколы единодушного согласия, ВВС	Система для отслеживания и опознавания личности
	Отсутствие информации о звене цепи поставок, невозможность определить ответственного за некорректный или ложный ввод данных		
Лицензирование	Отсутствие возможности лицензирования цифровых активов	Блокчейн, RMI, DRM	Приложение для лицензирования и интерфейс цифровой защиты
Финансы	Сложность отслеживания нарушения прав собственности	Все методы DLT, токенизация	Трансформация инфраструктуры финансовых услуг
	Агрегированность и непрозрачность рынка ценных бумаг		
Энергетика	Необходимость ухода от использования «сброса» электроэнергии при перегрузке сети	P2P, протоколы единодушного согласия	Распределенная система электроэнергии Разработка инфраструктуры транзакционного управления Разработка интегрированной бизнес-платформы распределенных энергетических ресурсов
	Отсутствие гибкого инструмента регулирования нагрузок на электросетях		
	Сложность обеспечения совместимости между разнородными устройствами и системами	Смарт-контракты, HEILA, WoT	
Распределенные приложения	Глобальная проблема масштабируемости системы с большим числом узлов и высокой нагрузкой на сети	Все методы DLT, DAG, vDLT	Создание приложений, где обмен данными основывается на принципах распределенного реестра
Разные отрасли	Необходимость подбора корректного дизайна DLT согласно требуемому функционалу	R3 Corda	Сравнение характеристик DLT путем их выделения и составления групп

Кроме того, для выявленных основных проблем в каждой отрасли предложены возможные способы их решения, что поможет в дальнейшем сосредоточиться на их устранении.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-41-06301).

Литература

- Lee J., Oh S., Jang J. W. A. Work in progress: Context based encryption scheme for Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 56, pp. 271–275. doi:10.1016/j.procs.2015.07.208
- Mäkitalo N., et al. Safe, secure executions at the network Edge: coordinating Cloud, Edge, and Fog Computing. *IEEE Software*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 30–37. doi:10.1109/MS.2017.4541037
- Lamberti R., et al. An open multimodal mobility platform based on Distributed Ledger Technology. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 18th International Conference NEW2AN 2018, and 11th Conference, RuSMART 2018*, Saint-Petersburg, Russia, August 26–28, 2019, Springer, 2019, pp. 41–52. doi:10.1007/978-3-030-30859-9_4
- Azaria A., et al. Medrec: Using blockchain for medical data access and permission management. *Proceedings of 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD)*, IEEE, 2016, pp. 25–30. doi:10.1109/OBD.2016.11
- Zheng X., et al. Accelerating Health data sharing: A solution based on the Internet of Things and Distributed Ledger Technologies. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, vol. 21, no. 6, p. 13583. doi:10.2196/13583
- Dubovitskaya A., et al. Secure and trustable electronic medical records sharing using blockchain. *AMIA Annual Symposium Proceedings*, 2017, vol. 2017, p. 650.

7. **Cunningham J., Ainsworth J.** Enabling patient control of personal electronic health records through Distributed Ledger Technology. *Stud. Health. Technol. Inform.*, 2018, vol. 245, pp. 45–48. doi:10.3233/978-1-61499-830-3-45
8. **Novikov S., et al.** Digital registry of professional competences of the population drawing on distributed registries and smart contracts technologies. *Information Systems and Technologies in Business*, 2019, no. 4 (46), pp. 43–53. doi:10.17323/1998-0663.2018.4.43.53
9. **Turkanović M., et al.** EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 5112–5127. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789929
10. **Rashid M. A., et al.** TEduChain: A platform for crowdsourcing tertiary education fund using blockchain technology. *arXiv preprint arXiv:1901.06327*, 2019.
11. **Pearson S., et al.** Are distributed ledger technologies the panacea for food traceability? *Global Food Security*, 2019, vol. 20, pp. 145–149. doi:10.1016/j.gfs.2019.02.002
12. **Xu B., Agbele T., Jiang R.** Biometric blockchain: A better solution for the security and trust of food logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 646, no. 1, p. 012009. doi:10.1088/1757-899x/646/1/012009
13. **Schoenhals A., et al.** Overview of licensing platforms based on distributed ledger technology. *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 4675–4684. doi:10.24251/hicss.2019.564
14. **Bodó B., Gervais D., Quintais J. P.** Blockchain and smart contracts: the missing link in copyright licensing? *International Journal of Law and Information Technology*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 311–336. doi:10.1093/ijlit/eay014
15. **Suayb S., et al.** Advancements in distributed ledger technology for Internet of Things. *IoT Journal: Elsevier*, 2019, vol. 9, pp. 1–3. doi:10.1016/j.iot.2019.100114
16. **Danzi P., et al.** Communication aspects of the integration of wireless IoT devices with distributed ledger technology. *IEEE Network*, 2020, vol. 32, no. 1, pp. 47–53. doi:10.1109/MNET.001.1900180
17. **Cullen A., et al.** Distributed ledger technology for IoT: Parasite chain attacks. *arXiv preprint arXiv:1904.00996*, 2019.
18. **Carlson K. W.** Safe Artificial General Intelligence via Distributed Ledger Technology. *Big Data and Cognitive Computing*, 2019, vol. 3, no. 40, pp. 1–24. doi:10.3390/bdcc3030040
19. **Mazur M.** Brawl at the gates: How distributed ledger technology is transforming the financial services sector. *SSRN 3400649*, 2019. <https://ssrn.com/abstract=3400649> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3400649> (дата обращения: 19.01.2020).
20. **Donald D. C., Miraz M. H.** Multilateral transparency for securities markets through DLT. *The Chinese University of Hong Kong Faculty of Law Research Paper*, 2019, no. 5. <https://ssrn.com/abstract=3352293> (дата обращения: 19.01.2020).
21. **Siano P., et al.** A survey and evaluation of the potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 97–153. doi:10.1109/JSYST.2019.2903172
22. **Cali U., Çakir O.** Energy policy instruments for Distributed Ledger Technology empowered Peer-to-Peer local energy markets. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82888–82900. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923906
23. **Mashlakov A., et al.** Uniform Web of Things based access to distributed energy resources via metadata registry, *Proceedings of 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, 2019, pp. 1–5.
24. **Braubach L., Jander K., Pokahr A.** A novel distributed registry approach for efficient and resilient service discovery in megascale distributed systems. *Computer Science & Information Systems*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 751–774. doi:10.2298/CSIS180131030B
25. **Kannengießer N., et al.** Bridges between islands: Cross-chain technology for Distributed Ledger Technology. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 5298–5307. doi:10.24251/HICSS.2020.652
26. **Kannengießer N., et al.** Mind the gap: Trade-offs between Distributed Ledger Technology characteristics. *arXiv preprint arXiv:1906.00861*, 2019.
27. **Tran A. B., et al.** Regerator: a registry generator for blockchain. *CAiSE-Forum-DC*, 2017, pp. 81–88.
28. **Yu F. R., et al.** Virtualization for Distributed Ledger Technology (vDLT). *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 25019–25028. doi:10.1109/ACCESS.2018.2829141
29. **Moon J., Kim D.** Design of a personal-led health data management framework based on distributed ledger. *The Journal of Society for e-Business Studies*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 73–86. doi:10.2196/13665
30. **Grße F., et al.** Do not be fooled: Toward a holistic comparison of Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 6297–6306. doi:10.24251/HICSS.2020.770
31. **Kannengießer N., et al.** What does not fit can be made to fit! Trade-offs in Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 7069–7078. doi:10.24251/HICSS.2019.848
32. **Shala B., et al.** Distributed Ledger Technology for trust management optimisation in M2M. *Mobile Communication Technologies and Applications*, IEEE, 2019, pp. 93–98.
33. **Howell B. E., Potgieter P. H., Sadowski B. M.** Governance of blockchain and distributed ledger technology projects. *SSRN 3365519*, 2019. <http://dx.doi.org/>

10.2139/ssrn.3365519 (дата обращения: 19.01.2020).
doi:10.2139/ssrn.3365519

34. Lebioda A., Lachenmaier J., Burkhardt D. Control of cyber-physical production systems: A concept to in-

crease the trustworthiness within multi-agent systems with distributed ledger technology. *Proc. of the 23rd Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS)*, 2019, pp. 56–62.

UDC 004.75

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

Survey of distributed ledger technology integration challenges

M. V. Gorbunova^a, Master Student, orcid.org/0000-0003-2186-1064, mvgorbunova@edu.hse.ru

A. Y. Ometov^b, Postdoctoral Research Fellow, orcid.org/0000-0003-3412-1639, aleksandr.ometov@tuni.fi

M. M. Komarov^a, PhD, Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7075-0016, mkomarov@hse.ru

S. V. Bezzateev^c, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@aanet.ru

^aNational Research University «Higher School of Economics», 20, Myasnitkaya St., 101000, Moscow, Russian Federation

^bTampere University, Korkeakoulunkatu 10, Tampere, 33720, Finland

^cSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Distributed ledger technology (DLT) is one of the most significant fields covering various aspects of modern ICT systems. Centralized systems of today can no longer guarantee the required level of availability and reliability, while broadly available distributed ones are still in the infancy. **Purpose:** Analysis of the applicability of DLT to various industries such as economics, energy, finance, logistics, and the Internet of Things. **Results:** The article outlines the main challenges of the DLT technology integration, such as the lack of a unified system for data storage, the need to ensure an appropriate level of data confidentiality, integration into the existing competency systems, the issues of a distributed system interaction with resource-constrained IoT devices, the lack of proper management tools for distributed systems, and network scalability. The main contribution of this paper is a systematic overview of the integration challenges followed by potential solutions and future perspectives.

Keywords — distributed ledger, distributed ledger technology, blockchain, Internet of Things.

For citation: Gorbunova M. V., Ometov A. Y., Komarov M. M., Bezzateev S. V. Survey of distributed ledger technology integration challenges. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 10–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

References

- Lee J., Oh S., Jang J. W. A. Work in progress: Context based encryption scheme for Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 56, pp. 271–275. doi:10.1016/j.procs.2015.07.208
- Mäkitalo N., et al. Safe, secure executions at the network Edge: coordinating Cloud, Edge, and Fog Computing. *IEEE Software*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 30–37. doi:10.1109/MS.2017.4541037
- Lamberti R., et al. An open multimodal mobility platform based on Distributed Ledger Technology. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 18th International Conference NEW2AN 2018, and 11th Conference, RuSMART 2018, Saint-Petersburg, Russia, August 26–28, 2019*, Springer, 2019, pp. 41–52. doi:10.1007/978-3-030-30859-9_4
- Azaria A., et al. Medrec: Using blockchain for medical data access and permission management. *Proceedings of 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD)*, IEEE, 2016, pp. 25–30. doi:10.1109/OBD.2016.11
- Zheng X., et al. Accelerating Health data sharing: A solution based on the Internet of Things and Distributed Ledger Technologies. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, vol. 21, no. 6, p. 13583. doi:10.2196/13583
- Dubovitskaya A., et al. Secure and trustable electronic medical records sharing using blockchain. *AMIA Annual Symposium Proceedings*, 2017, vol. 2017, p. 650.
- Cunningham J., Ainsworth J. Enabling patient control of personal electronic health records through Distributed Ledger Technology. *Stud. Health. Technol. Inform.*, 2018, vol. 245, pp. 45–48. doi:10.3233/978-1-61499-830-3-45
- Novikov S., et al. Digital registry of professional competences of the population drawing on distributed registries and smart contracts technologies. *Information Systems and Technologies in Business*, 2019, no. 4 (46), pp. 43–53. doi:10.17323/1998-0663.2018.4.43.53
- Turkanović M., et al. EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 5112–5127. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789929
- Rashid M. A., et al. TEduChain: A platform for crowdsourcing tertiary education fund using blockchain technology. *arXiv preprint arXiv:1901.06327*, 2019.
- Pearson S., et al. Are distributed ledger technologies the panacea for food traceability? *Global Food Security*, 2019, vol. 20, pp. 145–149. doi:10.1016/j.gfs.2019.02.002
- Xu B., Agbele T., Jiang R. Biometric blockchain: A better solution for the security and trust of food logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 646, no. 1, p. 012009. doi:10.1088/1757-899x/646/1/012009
- Schoenhals A., et al. Overview of licensing platforms based on distributed ledger technology. *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 4675–4684. doi:10.24251/hicss.2019.564
- Bodó B., Gervais D., Quintais J. P. Blockchain and smart contracts: the missing link in copyright licensing? *International Journal of Law and Information Technology*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 311–336. doi:10.1093/ijlit/eay014
- Suayb S., et al. Advancements in distributed ledger technology for Internet of Things. *IoT Journal: Elsevier*, 2019, vol. 9, pp. 1–3. doi:10.1016/j.iot.2019.100114
- Danzi P., et al. Communication aspects of the integration of wireless IoT devices with distributed ledger technology. *IEEE Network*, 2020, vol. 32, no. 1, pp. 47–53. doi:10.1109/MNET.001.1900180
- Cullen A., et al. Distributed ledger technology for IoT: Parasite chain attacks. *arXiv preprint arXiv:1904.00996*, 2019.
- Carlson K. W. Safe Artificial General Intelligence via Distributed Ledger Technology. *Big Data and Cognitive Com-*

- puting, 2019, vol. 3, no. 40, pp. 1–24. doi:10.3390/bdcc3030040
19. Mazur M. Brawl at the gates: How distributed ledger technology is transforming the financial services sector. *SSRN Electronic Journal* 3400649, 2019. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3400649> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3400649> (accessed 19 March 2020).
 20. Donald D. C., Miraz M. H. Multilateral transparency for securities markets through DLT. *The Chinese University of Hong Kong Faculty of Law Research Paper*, 2019, no. 5. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3352293> (accessed 19 March 2020).
 21. Siano P., et al. A survey and evaluation of the potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 97–153. doi:10.1109/JSYST.2019.2903172
 22. Cali U., Çakir O. Energy policy instruments for Distributed Ledger Technology empowered Peer-to-Peer local energy markets. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82888–82900. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923906
 23. Mashlakov A., et al. Uniform Web of Things based access to distributed energy resources via metadata registry. *Proceedings of 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, 2019, pp. 1–5.
 24. Braubach L., Jander K., Pokahr A. A novel distributed registry approach for efficient and resilient service discovery in megascale distributed systems. *Computer Science & Information Systems*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 751–774. doi:10.2298/CSIS180131030B
 25. Kannengießer N., et al. Bridges between islands: Cross-chain technology for Distributed Ledger Technology. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 5298–5307. doi:10.24251/HICSS.2020.652
 26. Kannengießer N., et al. Mind the gap: Trade-offs between Distributed Ledger Technology characteristics. *arXiv preprint arXiv:1906.00861*, 2019.
 27. Tran A. B., et al. Regerator: a registry generator for blockchain. *CAiSE-Forum-DC*, 2017, pp. 81–88.
 28. Yu F. R., et al. Virtualization for Distributed Ledger Technology (vDLT). *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 25019–25028. doi:10.1109/ACCESS.2018.2829141
 29. Moon J., Kim D. Design of a personal-led health data management framework based on distributed ledger. *The Journal of Society for e-Business Studies*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 73–86. doi:10.2196/13665
 30. Gräbe F., et al. Do not be fooled: Toward a holistic comparison of Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 6297–6306. doi:10.24251/HICSS.2020.770
 31. Kannengießer N., et al. What does not fit can be made to fit! Trade-offs in Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 7069–7078. doi:10.24251/HICSS.2019.848
 32. Shala B., et al. Distributed Ledger Technology for trust management optimisation in M2M. *Mobile Communication Technologies and Applications*, IEEE, 2019, pp. 93–98.
 33. Howell B. E., Potgieter P. H., Sadowski B. M. Governance of blockchain and distributed ledger technology projects. *SSRN Electronic Journal* 3365519, 2019. Available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3365519> (accessed 19 March 2020). doi:10.2139/ssrn.3365519
 34. Lebioda A., Lachenmaier J., Burkhardt D. Control of cyber-physical production systems: A concept to increase the trustworthiness within multi-agent systems with distributed ledger technology. *Proc. of the 23rd Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS)*, 2019, pp. 56–62.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12-ти языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>