

Trusted Traceability and Certification of Refurbished Medical Devices Using Dynamic Composable NFTs

S. A. Gebreab, K. Salah, R. Jayaraman and J. Zemerly, "Trusted Traceability and Certification of Refurbished Medical Devices Using Dynamic Composable NFTs," in IEEE Access, vol. 11, pp. 30373-30389, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3261555.

Статья опубликована: 24 марта 2023г.

Тема статьи: Надежная отслеживаемость и сертификация восстановленных медицинских изделий с использованием динамически компонуемых NFT



МАТРЕШКА
РЕНЕССАНС

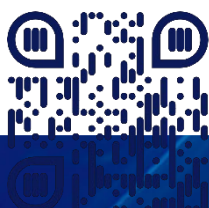
Сигнальный перевод подготовлен экспертом рабочей группы:
Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital 2023 г.

При поддержке:

FMENGINEERING

NEW REALITY

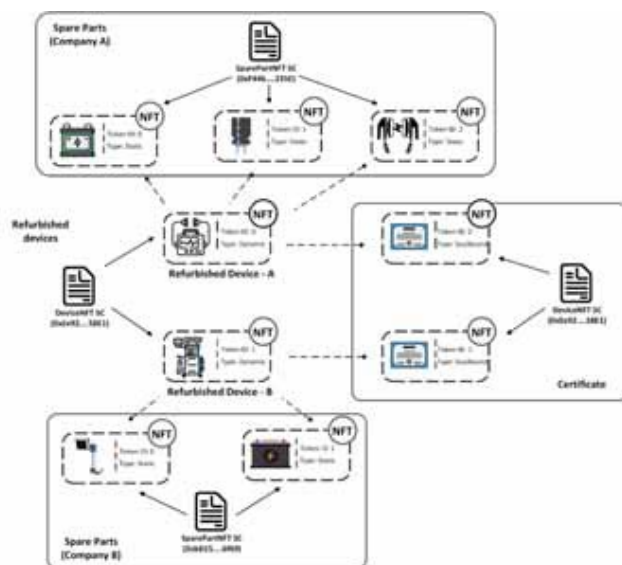
immersive technologies



Рабочая группа по сквозным цифровым технологиям
Совета по финансово-промышленной и инвестиционной политике
Торгово-промышленной палаты Российской Федерации

Абстракт:

Медицинские устройства играют решающую роль в глобальной системе здравоохранения, но их высокая стоимость привела к более широкому использованию отремонтированных медицинских устройств в качестве устойчивой альтернативы для больниц и пациентов по всему миру. Однако репозиционирование восстановленных устройств на рынке сопровождается рядом проблем, включая проблемы качества и безопасности, а также риск мошеннических действий, таких как подделка. Чтобы решить эти проблемы, мы предлагаем решение на основе NFT для управления отремонтированными медицинскими устройствами, которое создает безопасную, прозрачную и поддающуюся проверке запись процесса восстановления, чтобы гарантировать безопасность и качество этих устройств. Предлагаемое решение использует динамические компоненты NFT в качестве цифровых представлений медицинских устройств с запасными частями и сертификационными документами, встроенными в иерархию NFT «родитель-потомок», а этапы повторной обработки фиксируются и отражаются посредством эволюции динамических токенов. Это служит для аутентификации и отслеживания перемещения отремонтированных устройств, а также обеспечивает надежные средства управления отдельными устройствами и их собственностью. Кроме того, интеграция непередаваемых NFT в качестве сертификатов восстановления действует как эффективный механизм обнаружения подозрительных медицинских устройств и случаев мошеннической маркировки, тем самым повышая доверие покупателей и повышая безопасность пользователей. Мы используем Межпланетную файловую систему для хранения и отслеживания метаданных токенизированных компонентов системы. Мы представляем архитектуру системы и детали реализации с проверенными алгоритмами. Мы разрабатываем внешнее децентрализованное приложение (DApp) для взаимодействия с разработанными смарт-контрактами и демонстрации их функций. Мы также проводим анализ безопасности, чтобы продемонстрировать устойчивость нашей системы к распространенным уязвимостям и эксплойтам. Код смарт-контракта доступен на GitHub.



Обзор возможности компоновки NFT для представления отремонтированных медицинских устройств.

РАЗДЕЛ I. Введение

Медицинские устройства являются неотъемлемой частью отрасли здравоохранения, предоставляя пациентам необходимые диагностические и терапевтические услуги. Согласно исследовательскому отчету Market Research Future, объем рынка медицинского оборудования оценивается в 964,90 миллиарда долларов к 2030 году при совокупном годовом темпе роста (CAGR) 6,99% в течение прогнозируемого периода 2022–2030 годов [1]. Хотя это свидетельствует о растущем спросе на медицинские устройства, высокая стоимость приобретения новых медицинских устройств, которая еще больше усугубляется ростом стоимости материалов и нехваткой компонентов в 2022 году, может стать значительным экономическим бременем для организаций здравоохранения, особенно для организаций с низким уровнем доходов. страны со средним уровнем дохода. В качестве устойчивого решения этой проблемы наблюдается растущая тенденция к использованию восстановленных медицинских устройств, которые ранее использовались, но прошли очистку, тестирование, восстановление и ремонт для соответствия тем же стандартам производительности и безопасности, что и оригинальное оборудование. производителя (OEM) без изменения его целевого использования.

Помимо обеспечения экономически эффективной альтернативы покупке новых устройств, использование отремонтированных медицинских устройств имеет преимущества с экологической точки зрения, поскольку это более экологичное решение, приводящее к сокращению отходов медицинского оборудования. Согласно отчету Ассоциации переработчиков медицинского оборудования (AMDR), в 2020 году переработка медицинского оборудования в США помогла вывести со свалок 12 миллионов фунтов медицинских отходов. Это привело к экономии средств в размере 372 миллионов долларов в больницах США [2]. Анализ, предоставленный AMDR, также показывает, что только больницы в США могут сэкономить 2,28 миллиарда долларов за счет максимального использования переработанных одноразовых медицинских устройств. Продлив срок службы этих устройств за счет восстановления и переработки, можно сократить количество отходов медицинского оборудования и связанные с этим экологические и экономические последствия.

Создание и управление процессом восстановления медицинского оборудования включает в себя ряд эксплуатационных и нормативных требований. Эти требования гарантируют, что отремонтированные устройства соответствуют характеристикам оригинального производителя. соответствуют техническим требованиям и безопасны для использования. Как видно на рисунке 1, процесс восстановления включает очистку, стерилизацию, тестирование и ремонт устройства, что также может включать замену изношенных или поврежденных компонентов. Крайне важно, чтобы все операции по восстановлению регистрировались отслеживаемым образом, чтобы обеспечить прозрачность и подотчетность. Кроме того, с нормативной точки зрения предприятия по восстановлению должны соблюдать установленные стандарты, такие как ISO 1385:2016, в которых изложена система управления качеством для ремонта медицинских устройств [3]. Обеспечение целостности данных, связанных с процессом восстановления, и предоставление доступа к этой информации соответствующим сторонам имеет решающее значение. Это не только помогает

продемонстрировать соответствие нормативным стандартам, но также устанавливает доверие между заинтересованными сторонами путем проверки процесса восстановления.

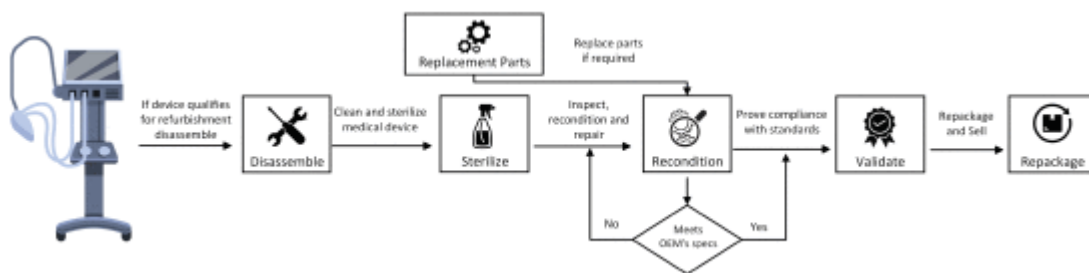


РИСУНОК 1. – Обзор технологического процесса ремонта медицинского оборудования.

Блокчейн — это технология, которая предлагает большие преимущества для удовлетворения требований отслеживаемости и прозрачности. Блокчейн — это неизменяемый и распределенный реестр, который был впервые представлен в 2008 году в качестве базовой технологии сети Биткойн [4]. Технология блокчейн позволяет осуществлять одноранговые транзакции без необходимости использования посредников. Его структура состоит из серии последовательно добавляемых криптографически защищенных блоков данных, имеющих временные метки и неизменяемых. Каждый блок содержит хэш предыдущего блока, что делает цепочку безопасной и защищенной от несанкционированного доступа. Неотъемлемые характеристики блокчейна обеспечивают происхождение, отслеживаемость, прозрачность, аутентифицированные и непроверяемые журналы, а также защищенные от несанкционированного доступа записи [5], [6].

Блокчейн позволяет токенизировать цифровые и физические активы в сети. Невзаимозаменяемые токены (NFT) — это тип цифрового актива, который представляет собой право собственности на уникальный неделимый предмет [7]. В последние годы NFT привлекли широкое внимание благодаря их использованию для представления и торговли цифровым искусством, предметами коллекционирования и другими виртуальными активами [8], [9]. Однако их уникальные свойства, такие как уникальность, проверяемость и отслеживаемость, делают их хорошо подходящими для решения проблем, связанных с процессом восстановления медицинских устройств. В этом случае использование NFT гарантирует, что любое медицинское устройство, прошедшее ремонт, будет четко идентифицировано, а все действия по восстановлению будут зарегистрированы и доступны для целей валидации, проверки соответствия и сертификации. Это обеспечит безопасный и прозрачный способ управления процессом восстановления, гарантируя, что больницы и пациенты смогут доверять безопасности и качеству отремонтированных медицинских устройств. Таким образом, в этом документе предлагается решение на основе блокчейна, которое использует составные динамические NFT для представления и управления отремонтированными медицинскими устройствами, принимая во внимание необходимые эксплуатационные и нормативные требования. Основные положения данной статьи заключаются в следующем:

Мы предлагаем решение на основе NFT для создания надежной системы отслеживания, сертификации и управления собственностью на переработанные медицинские устройства на протяжении всего процесса восстановления и продажи.

Мы вводим составные и динамические NFT для отремонтированных медицинских устройств, где медицинское устройство и запасные части представлены как токены в иерархии NFT «родитель-потомок», а любые изменения или модификации, внесенные в восстановленное устройство, виртуально отражаются через динамический характер реализованного устройства. жетоны. Кроме того, мы реализуем непередаваемые (индивидуальные) NFT для представления сертификатов восстановления, которые постоянно связаны с соответствующим NFT медицинского устройства.

Мы интегрируем Межпланетную файловую систему (IPFS), децентрализованную систему хранения вне цепочки, с нашим решением на основе NFT, чтобы хранить файлы метаданных каждого NFT и избегать высоких затрат на хранение больших файлов в цепочке.

Мы представляем архитектуру системы и диаграммы последовательности, описывающие взаимодействие между участниками. Кроме того, мы предоставляем подробное описание реализации, включая алгоритмы, управляющие функционированием предлагаемого нами решения.

Мы оцениваем эффективность предлагаемого нами решения посредством анализа затрат, безопасности и конкуренции.

Остальная часть документа организована следующим образом: в разделе II представлена справочная информация, в разделе III описаны соответствующие работы, в разделе IV подробно объяснено предлагаемое нами решение на основе NFT, в разделе V предлагаются и обсуждаются детали реализации, в разделе VI представлены тестирование и проверка. В разделе VII представлен анализ предлагаемого решения, а в разделе VIII подведены итоги нашего вклада.

РАЗДЕЛ II. Справочная информация

В этом разделе мы предоставляем соответствующую справочную информацию о повторном использовании медицинских устройств и его предпосылках, а также о концепции невзаимозаменяемых токенов в блокчейне.

A. Повторное использование медицинских изделий

Медицинские изделия можно классифицировать как множественные устройства электронного или одноразового использования. Многократные или многоразовые устройства относятся к медицинскому оборудованию, которое, как правило, долговечно и может быть повторно использовано для нескольких пациентов с простым требованием очистки или дезинфекции после процедур. С другой стороны, одноразовые устройства предназначены для использования у одного пациента во время одной процедуры. Однако несколько

исследований показали, что повторное использование одноразовых устройств, таких как кардиостимуляторы и имплантируемые дефибрилляторы, может обеспечить экономическую выгоду без увеличения риска заражения или смертности [10], [11], [12]. Правила переработки одноразовых медицинских изделий различаются в зависимости от страны или региона. В США FDA имеет регламентированный список из 70 одноразовых устройств, которые можно перерабатывать для повторного использования [13]. Кроме того, Закон о сборе за использование медицинских устройств и модернизации от 2002 года требует, чтобы сторонние переработчики предоставляли данные проверки для многих типов медицинских устройств, которые проходят повторную обработку, и они несут ответственность за первоначальный производитель [14]. Также требуется, чтобы все одноразовые устройства, подлежащие повторной обработке, были маркированы соответствующим образом с указанием на этикетке названия восстановителя. В Европейском Союзе каждая страна несет ответственность за определение собственных правил и положений, регулирующих переработку одноразовых медицинских изделий. В Африке, на Ближнем Востоке и в Азии повторное использование медицинских изделий не регулируется. Независимо от действующих правил, очевидно, крайне важно, чтобы различные задачи по повторной обработке, связанные с практикой восстановления, выполнялись проверенным и стандартизированным образом.

В. Невзаимозаменяемые токены

NFT — это категория токенов, которые используются для представления цифровых или физических активов в блокчейне. Токены можно разделить на две категории в зависимости от их взаимозаменяемости: взаимозаменяемые токены и невзаимозаменяемые токены (NFT). Взаимозаменяемость означает свойство актива быть обмененным или замененным другим активом того же типа. Таким образом, взаимозаменяемый токен — это токен, который можно легко обменять на другой токен равной стоимости. Их можно разделить на более мелкие единицы и обменять без ущерба для их стоимости. NFT, с другой стороны, представляют собой уникальные, невзаимозаменяемые и неделимые токены. NFT обладают отличительными характеристиками, такими как уникальность, возможность передачи, проверяемость, отслеживаемость и прозрачность, которые делают их пригодными для управления владением активами.

NFT реализованы на основе запроса на комментарии Ethereum (ERC) 721, стандарта для невзаимозаменяемых токенов в блокчейне Ethereum [15]. В этой статье обсуждаются три типа NFT: динамические, составные и персональные. Динамические NFT — это токены, которые могут меняться со временем, например виртуальная недвижимость, которую можно модернизировать, или виртуальное искусство, которое может изменять владелец. Составные NFT — это токены, которые можно комбинировать с другими NFT для создания новых, более ценных или более репрезентативных токенов. Впервые они были представлены как расширение ERC-721, позволяющее комбинировать и связывать токены нисходящим или восходящим подходом [16]. Soulbound NFT — это токены, которые привязаны к конкретному пользователю или учетной записи и не могут быть переданы или проданы другому пользователю, например, индивидуальные учетные данные или внутриигровые трофеи и достижения, привязанные к учетной записи конкретного игрока [17].

РАЗДЕЛ III. Сопутствующая работа

В этом разделе мы представляем существующую литературу по решениям на основе блокчейна, связанным с управлением различными продуктами и приложениями NFT.

A. На основе блокчейна

Технология блокчейн может революционизировать способы управления и отслеживания продуктов здравоохранения. Используя технологию распределенного реестра, можно создать безопасную и защищенную от несанкционированного доступа запись жизненного цикла продуктов здравоохранения: от производства до распространения конечным пользователям. Это имеет серьезные последствия для управления цепочками поставок, соблюдения нормативных требований и безопасности пациентов.

В [18] Садри и др. исследовал использование блокчейна для отслеживания данных в цепочке поставок донорства крови. Предлагаемое решение призвано обеспечить надежное отслеживание важной информации и данных, генерируемых на каждом этапе кровоснабжения, обеспечивая при этом конфиденциальность участников. Пинто и др. [19] предлагают систему отслеживания и владения данными о здоровье с использованием технологии блокчейн. Предлагаемый подход основан на Hyperledger Fabric и обеспечивает хранение и безопасный доступ к хронологически организованной и неизменяемой записи медицинских данных, сохраняя при этом необходимую анонимность медицинской информации. Аналогичным образом, Мадин и др. [20] представляют решение на основе блокчейна, позволяющее децентрализованно предоставлять пациентам контроль над данными о своем здоровье. Для управления медицинскими данными они используют систему хранения IPFS и оракулы на основе репутации. В [21] Джейман и Урови предложили структуру обмена данными с моделью согласия на основе блокчейна для контроля доступа к записям данных о здоровье пользователей. Авторы используют смарт-контракты для создания персонализированного и динамического представления согласия. r каждого поставщика данных и сопоставьте его с запросами от запрашивающих данные.

В ряде исследований изучалось использование блокчейна для отслеживания и управления медицинской продукцией в цепочке поставок здравоохранения. Мусами и др. [22] предлагают систему на основе блокчейна, использующую смарт-контракты и автономное децентрализованное хранилище для отслеживания медицинских препаратов в цепочке поставок здравоохранения. Они подчеркивают преимущества использования блокчейна для улучшения прозрачности цепочки поставок и улучшения отслеживаемости. Другое решение по отслеживанию лекарств представлено в [23], где Jamil et al. предложить структуру медицинского блокчейна с использованием структуры Hyperledger для безопасного управления записями цепочки поставок. В статье авторы демонстрируют повышенную эффективность своего решения с точки зрения минимизации задержки транзакций и меньшего использования ресурсов. Хуанг и др. [24] предлагают практически ориентированную блокчейн-систему отслеживания и регулирования лекарств, которая гарантирует конфиденциальность и подлинность данных отслеживания без ущерба для устойчивости

системы. Рабочий процесс системы основан на расширенной структуре данных УТХО для завершения логических механизмов, включая упаковку, переупаковку и распаковку. FarmaTrust — это действующий проект, использующий технологию блокчейна для улучшения отслеживания и безопасности цепочки поставок фармацевтической продукции. Его цель – создать неизменяемую децентрализованную запись движения фармацевтической продукции от точки производства до точки отпуска [25]. Авторы в [26] предлагают структуру, которая автоматизирует операции прямой цепочки поставок медицинского оборудования для борьбы с COVID-19, а также процесс обработки отходов с использованием блокчейна. Они представляют проект системы с полной реализацией, чтобы продемонстрировать свое решение.

В. На основе NFT

Растет интерес к использованию NFT в качестве средства отслеживания и проверки владения как цифровыми, так и физическими активами. Авторы в [27] представили потенциальные преимущества и проблемы технологии NFT. Они оценивают и обсуждают различные способы, которыми NFT может способствовать различным областям, включая их использование в качестве изображения персонажей в играх, в качестве билетов на мероприятия, в качестве цифровых предметов коллекционирования и в качестве доказательства права собственности на виртуальные активы в Метавселенной. Элмей и др. [28] используют NFT для отслеживания грузовых контейнеров в морской цепочке поставок с целью устранения неэффективности процесса доставки и создания системы аукционов по продаже брошенных грузов. Предлагаемое решение использует уникальную и неизменяемую природу NFT для создания безопасного и прозрачного учета прав собственности и перемещения морских контейнеров и грузов, что потенциально может повысить эффективность цепочки поставок и снизить затраты.

Авторы в [29] рассматривают потенциальное использование NFT для улучшения обмена и управления данными о здоровье. Согласно документу, NFT могут обеспечить безопасную и неизменяемую запись медицинской информации, повышая эффективность и точность обмена данными, одновременно защищая конфиденциальность. Каннингем и др. [30] предложили приложение на основе NFT для представления, обмена и отслеживания записей о согласии пациентов на использование медицинских данных. Предлагаемое решение использует NFT для создания поддающихся проверке и аудиту записей о согласии субъектов данных с определенной целью использования, а также для обеспечения безопасных и конфиденциальных средств передачи согласия потребителям данных. Кьяккио и др. [31] исследуют использование NFT в качестве решения для сериализации в цепочке фармацевтических поставок. В предлагаемом решении NFT используются в качестве защищенного от несанкционированного доступа представления уникальных идентификаторов, присвоенных серийным товарам в цепочке поставок. Гебреаб и др. [32] предлагают решение на основе NFT для улучшения отслеживания и управления владением медицинскими устройствами. В рамках этого решения NFT используются в качестве цифровых аналогов физических медицинских устройств для облегчения отслеживания, отслеживания и аутентификации этих устройств в цепочке поставок и на рынке. Этот подход направлен на

борьбу с подделками и обеспечение безопасного и надежного метода торговли медицинскими устройствами.

Насколько нам известно, ни в одном из предыдущих исследований не было предложено и внедрено решение на основе NFT для обеспечения прослеживаемости, управления данными, проверки, сертификации и ведения учета восстановленных медицинских устройств. Помимо разработки такой системы, мы полностью реализовали как интерфейсные, так и серверные компоненты решения, чтобы обеспечить его эффективность. Мы также провели тестирование и проверку функциональности разработанных смарт-контрактов. Наконец, мы обсудим, как наше предлагаемое решение можно обобщить, чтобы оно соответствовало потребностям приложений в других отраслях.

РАЗДЕЛ IV. Предлагаемая модель системы

В этом разделе мы представляем и обсуждаем детали конструкции нашего решения на основе NFT для отслеживания и управления отремонтированными медицинскими устройствами. Наше решение направлено на обеспечение целостности и подлинности отремонтированных медицинских изделий путем установления безопасную и поддающуюся проверке систему отслеживания, а также обеспечивая механизм управления собственностью и сертификации медицинских изделий на протяжении всего процесса восстановления.

A. Компоненты системы

Рисунок 2 иллюстрирует высокоуровневую системную архитектуру предлагаемой системы, которая состоит из пяти основных компонентов: участников, DApp, автономной системы хранения, платформы блокчейна и смарт-контрактов.

Действующие лица: Основными действующими лицами в предлагаемом решении являются поставщик услуг по восстановлению медицинского оборудования, поставщик сертификации восстановленных устройств и покупатель подержанных устройств. Все участники системы должны быть зарегистрированы. Субъектом, выполняющим ремонт медицинского изделия, может быть первоначальный производитель устройства или третья сторона. Поставщик сертификации — это организация, которая предоставляет сертификацию отремонтированному устройству.

DApp: децентрализованное приложение облегчает взаимодействие между пользователями системы и уровнем блокчейна. Он имеет внешний вид, который служит пользовательским интерфейсом. Внешний вид реализуется с использованием кода HTML, CSS и JavaScript, который отображает визуальные элементы, с которыми пользователи взаимодействуют через свои веб-браузеры. Кроме того, DApp использует решения для кошельков, такие как MetaMask, для подписи транзакций и управления закрытыми ключами пользователей. DApp также включает в себя внутренний уровень, который включает в себя провайдера, такого как Infura или QuickNode, для подключения внешнего интерфейса к блокчейну.

Внесетевое хранилище. Наше решение зависит от автономного хранилища для хранения метаданных, связанных с NFT. Децентрализованные системы хранения, такие как Межпланетная файловая система (IPFS), Swarm и Storgi, могут быть интегрированы для хранения и размещения больших файлов метаданных вне блокчейна. Используя такие одноранговые сети хранения, все данные, относящиеся к конкретному устройству, становятся доступными безопасным и распределенным способом, одновременно обеспечивая их доступность. Более того, это помогает значительно снизить затраты, связанные с хранением больших данных в блокчейне, что является очень дорогостоящей операцией, препятствующей быстрому росту реестра. Уникальный хеш сохраненных данных, известный как идентификатор контента или CID, используется для доступа, в нашем случае, к метаданным NFT из смарт-контракта.

Блокчейн Ethereum: Ethereum — это децентрализованная блокчейн-платформа второго поколения, которая позволяет децентрализованно выполнять код и определяемые пользователем операции [33]. Блокчейн Ethereum состоит из двух типов учетных записей: внешние учетные записи (EOA) и контрактные учетные записи (CA). EOA — это учетные записи пользователей, управляемые закрытым ключом и адресом пользователя, а CA — это учетные записи смарт-контрактов. В предлагаемой системе детали выпущенного невзаимозаменяемого токена (NFT) и всех связанных с ним транзакций записываются в блокчейне Ethereum.

Смарт-контракты. Смарт-контракты — это самоисполняющиеся программы, работающие на блокчейне [34]. Эти контракты хранятся по определенному адресу в блокчейне и после развертывания не могут быть изменены, что обеспечивает целостность соглашений. Встроенный код в смарт-контрактах обеспечивает автономную работу и удаленный вызов без необходимости вмешательства человека. Это позволяет оптимизировать рабочий процесс, который можно полностью автоматизировать.

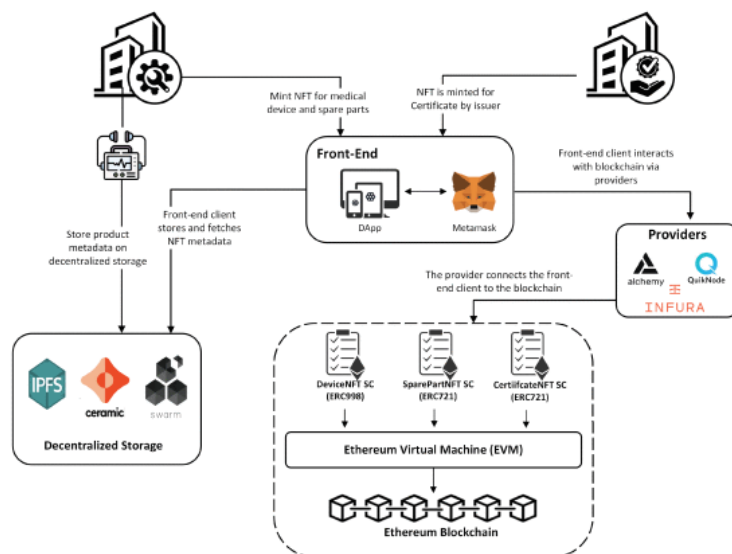


РИСУНОК 2. – Обзор архитектуры, показывающий компоненты системы в предлагаемом решении.

В. Токенизация

Токенизация является центральным элементом предлагаемого нами решения для управления отремонтированными медицинскими устройствами. Представляя физические и цифровые активы в виде невзаимозаменяемых токенов (NFT), мы можем безопасно и эффективно отслеживать и проверять статус и историю этих активов в блокчейне.

Токенизация отремонтированных медицинских устройств предполагает создание цифрового представления устройства и сохранение его в блокчейне в виде NFT. Это цифровое представление включает подробную информацию об устройстве, изображениях и соответствующих документах, а также информацию о выполненных процедурах восстановления/ремонта. Чтобы точно отразить запасные части отремонтированного устройства в его токенизированном цифровом аналоге, мы реализовали возможность компоновки в NFT, связанном с медицинским устройством, как показано на рисунке 3. Это позволяет отслеживать конкретные детали, которые были заменены в отремонтированном устройстве. и для поддержания актуальной записи текущего состояния устройства. Кроме того, NFT спроектирован так, чтобы быть динамичным, что позволяет получать обновления в случае будущих услуг по восстановлению.

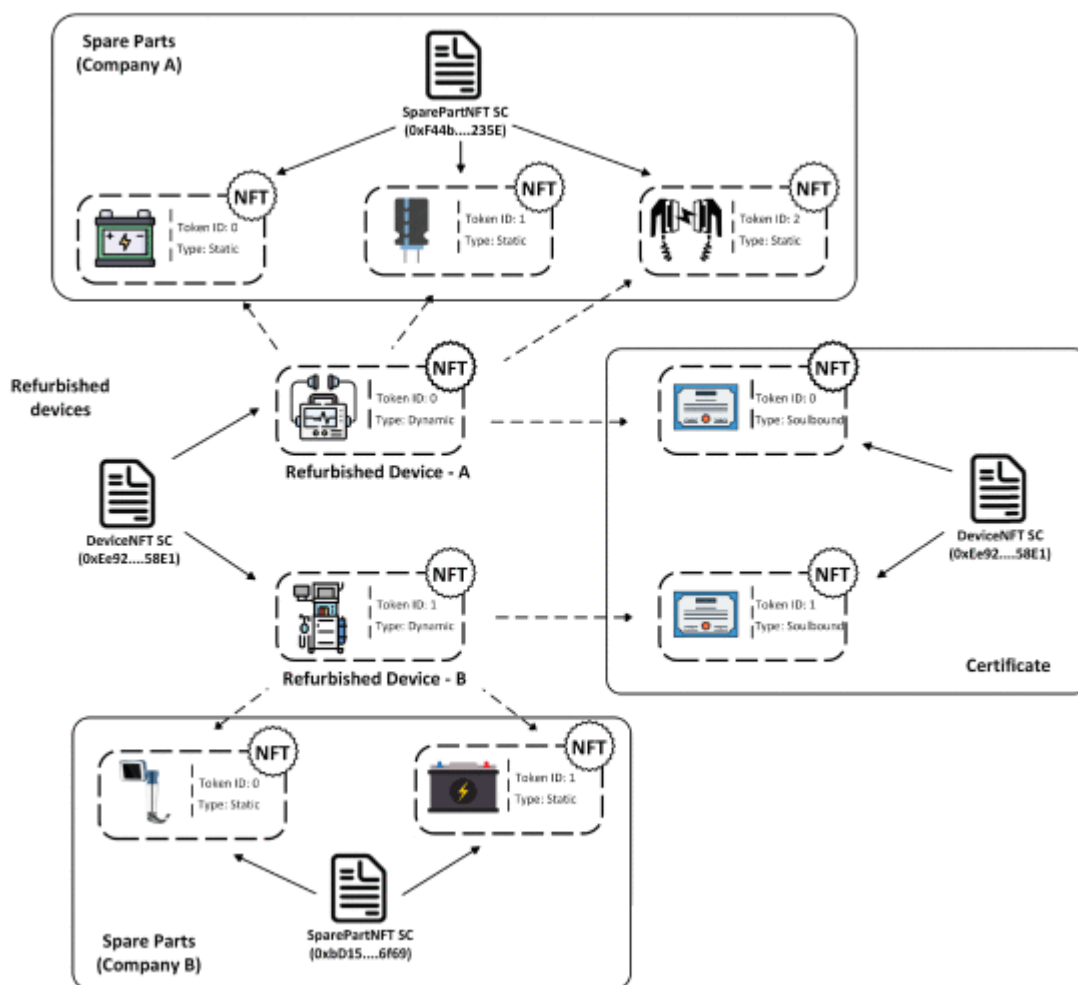


РИСУНОК 3. – Обзор возможности компоновки NFT для представления восстановленных медицинских устройств.

Кроме того, мы используем персональные NFT для представления сертификатов восстановления, подтверждающих процесс восстановления, которому подверглось медицинское устройство. Эти сертификаты NFT, отчеканенные и прикрепленные к конкретному медицинскому устройству NFT, не могут быть перенесены или удалены. Метаданные, содержащиеся в каждом NFT, хранятся в Межпланетной файловой системе (IPFS), при этом в блокчейне хранится только хэш файла вместе с идентификатором токена и адресом Ethereum владельца. Это обеспечивает постоянство доказательств и целостность процесса восстановления.

C. Разработка смарт-контрактов

Для реализации процессов, изложенных в предлагаемом нами решении, мы разработали три смарт-контракта. Во-первых, смарт-контракт DeviceNFT — это составной контракт, основанный на EIP-998, расширении стандарта ERC 721. Он следует принципу «сверху вниз», что позволяет отслеживать и владеть дочерними токенами. Смарт-контракт DeviceNFT используется для создания NFT, который содержит в своих метаданных информацию и документы восстановленного медицинского устройства. Этот NFT связан родителем-дочерним отношением с другими NFT, связанными с запасными частями, используемыми в процессе восстановления. Второй смарт-контракт, контракт ERC-721, называется Smart Contract SparePartNFT. Он используется для создания NFT для запасных компонентов в тех случаях, когда они не поставляются в комплекте с компонентами от соответствующих производителей. Эти NFT запасных частей прикрепляются к медицинскому устройству NFT, когда их физические аналоги устанавливаются во время ремонта. Последний смарт-контракт, Смарт-контракт CertificateNFT, используется для токенизации и управления сертификатом, выданным признанным органом по сертификации для отремонтированного медицинского устройства. После того, как медицинское устройство было восстановлено и компания, занимающаяся восстановлением, продемонстрировала безопасность отремонтированного устройства и подтвердила соответствие конкретному применимому стандарту, на восстановленное сертификационный знак или этикетку можно прикрепить. Этот сертификат вместе с датой выдачи и цифровой подписью сертифициатора преобразуется в NFT посредством смарт-контракта сертификата. Этот NFT привязан к токенизированному медицинскому устройству, а это означает, что после выпуска его нельзя передать или отсоединить от NFT, представляющего восстановленное медицинское устройство, тем самым уменьшая любые попытки ложной продажи устройства как нового.

D. Взаимодействие между участниками системы

На рисунке 4 показано взаимодействие между участниками системы и смарт-контрактами для сценария, когда медицинское устройство не поставляется с уже привязанным к нему NFT. Предполагается, что все пользователи системы зарегистрированы и им присвоен уникальный адрес Ethereum, по которому их можно идентифицировать. На первом этапе, после получения медицинского устройства для восстановления, восстановитель, которым может быть OEM-производитель или третья сторона, собирает и компилирует всю соответствующую информацию о продукте и цифровые документы, загружая их в Межпланетную файловую систему (IPFS). Возвращенный CID, указывающий на загруженные метаданные устройства, затем передается в смарт-контракт DeviceNFT, где он сохраняется как универсальный

идентификатор ресурса токена (URI). На следующем этапе восстановитель повторяет этот процесс для запасных частей, у которых нет NFT от производителя, используя смарт-контракт SpareParts NFT для создания NFT для каждой использованной запасной детали. После этого создается родительский NFT, представляющий отремонтированное медицинское устройство в целом, содержащий как метаданные устройства, так и NFT запасных частей. Этот NFT, поверх метаданных устройства, содержит NFT запасных частей. Наконец, на последнем этапе, после проверки процедур восстановления и обеспечения соответствия стандартам и безопасности устройства, орган по сертификации может выдать сертификат восстановления и загрузить его в IPFS. Смарт-контракт CertificateNFT используется для токенизации цифрового двойника сертификата, а созданный непередаваемый персональный NFT интегрируется в NFT основного устройства.

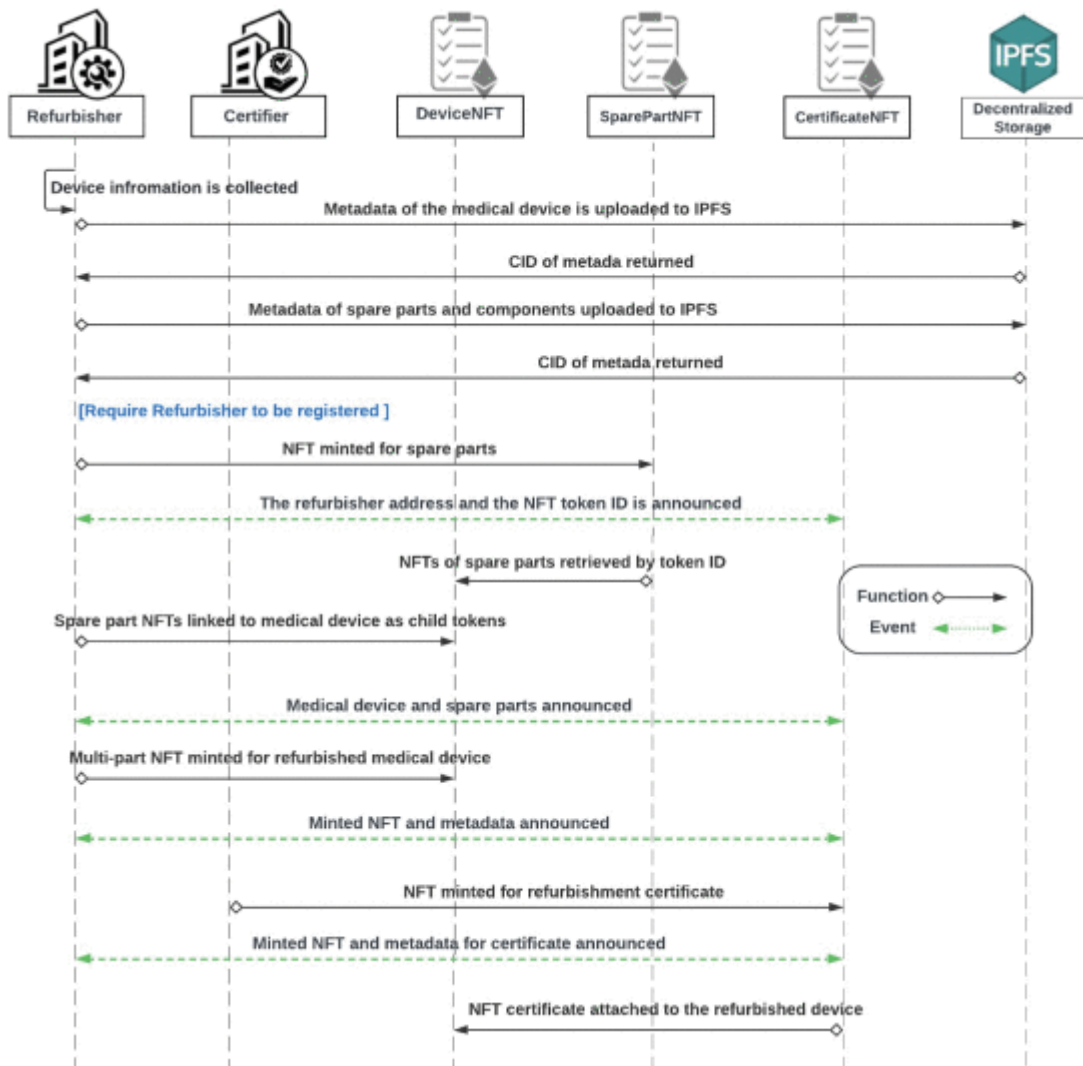


РИСУНОК 4. – Диаграмма последовательности, показывающая процесс чеканки и объединения NFT, а также сертификации.

Между тем, на рисунке 5 показано взаимодействие участников со смарт-контрактами, когда и медицинское устройство, и запасные части уже имеют связанные с ними NFT до начала процесса восстановления. Во-первых, право собственности NFT на медицинское устройство и запасные части, которые будут использоваться, передается восстановителю. Затем обновленная версия метаданных NFT, связанных с медицинским устройством, содержащая подробную информацию о процессе восстановления, загружается в IPFS. URI токена NFT обновляется, чтобы указать на новые метаданные, и генерируется событие для записи изменений, внесенных в NFT. Для ведения полной истории версий обновленные метаданные

также включают ссылку на предыдущую версию метаданных, создавая связанный список всех версий NFT. Затем детские NFT, связанные с установленными запасными частями, прикрепляются к отремонтированному NFT медицинского устройства. Наконец, сертифицирующий орган выпускает сертификат NFT и навсегда прикрепляет его к NFT родительского устройства.

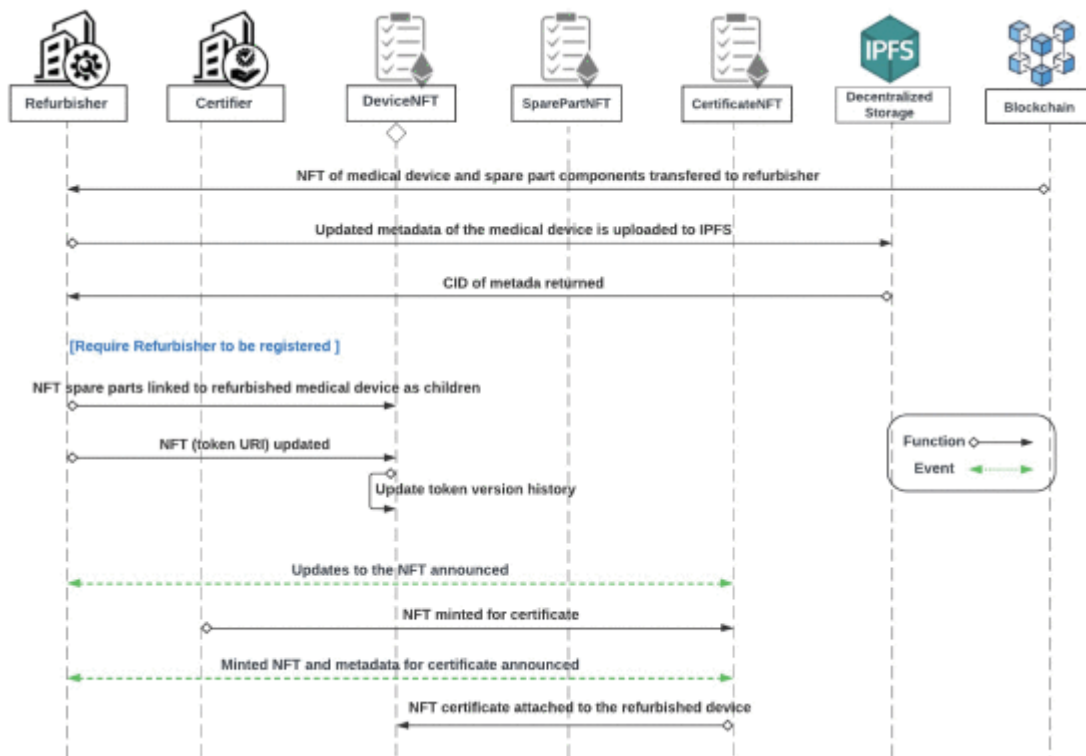


РИСУНОК 5. – Диаграмма последовательности, иллюстрирующая процесс обновления NFT и сертификации восстановленных медицинских изделий с использованием NFT, отечественных производителем.

РАЗДЕЛ V. Детали реализации

В этом разделе описаны детали реализации предлагаемого решения. Предлагаемое решение построено на частной или публичной цепочке блоков, и пользователи должны зарегистрироваться, чтобы стать пользователями в системе. Смарт-контракты, представленные в решении, написаны на Solidity, а разработанный код был скомпилирован и протестирован с использованием Remix IDE и Hardhat — среды разработки для компиляции и тестирования смарт-контрактов. Интерфейс DApp был разработан с использованием ReactJS, библиотеки интерфейса JavaScript с открытым исходным кодом. Код смарт-контракта доступен на GitHub.1.

А. Алгоритмы

Смарт-контракты, реализованные в нашей системе, предназначены для облегчения различных функций системы. Чтобы провести подробный анализ логики этих смарт-контрактов, мы разработали алгоритмы, описывающие основные процессы.

1) Процесс чеканки NFT

Алгоритм 1 описывает основные этапы процесса токенизации медицинского устройства, компонента замены или сертификата восстановления с использованием NFT. Процесс начинается с загрузки метаданных, представляющих элемент, в IPFS в формате файла JSON. Некоторые из ключевых полей, содержащихся в файле метаданных, включают:

Название: Название актива, который представляет NFT.

Тип: тип актива, с которым связан NFT.

Идентификатор версии: номер версии динамического NFT. Это применимо только к NFT, представляющим отремонтированное медицинское устройство.

Предыдущая версия: URI IPFS, указывающий на версию метаданных NFT до последнего обновления.

Изображения: изображения актива (URI IPFS).

Процессы восстановления: список этапов восстановления, выполняемых на медицинском устройстве.

Документы: Документы, связанные с процессом восстановления.

Input : *caller_EA, UDI, metadata_URI*

Output : Emit NFTminted Event

```
1 caller_EA is the Ethereum address of the function
  caller
2 UDI is the unique device identifier for the refurbished
  medical device
3 metadata_URI is the URI pointing to the metadata
  uploaded on IPFS
4 if (bytes32(bytes(UDI))  $\notin$ 
  tokenizedDevices)  $\wedge$  (token_URI is valid) then
5   | Increment tokenID
6   | Mint NFT defined by the current tokenID
7   | Assign caller_EA to be the owner of the NFT
8   | Set the tokenURI for the minted NFT to
  metadata_URI
9   | Add UDI to tokenizedDevices mapping
10  | Emit event announcing the successful NFT
  minting with tokenID, NFT owner EA and
  tokenURI
11 end
12 else
13  | Device is already tokenized
14  | Revert contract state
15 end
```

Алгоритм 1 — майнинг NFT

Поскольку создаваемый NFT будет динамическим, метаданные включают свойство «предыдущая версия» для отслеживания любых будущих обновлений NFT. После загрузки метаданных в IPFS возвращается уникальный хэш контента, известный как идентификатор контента (CID), который используется для доступа к контенту. На основе CID генерируется URI токена, чтобы связать запись NFT в блокчейне с цифровым двойником элемента, хранящегося вне цепочки. Текущий идентификатор токена затем увеличивается и присваивается создаваемому NFT. После завершения процесса чеканки URI токена прикрепляется к NFT, и генерируется событие, объявляющее подробности о вновь созданном NFT, включая его идентификатор токена, адрес владельца и URI метаданных.

2) Процесс внедрения NFT

Алгоритм 2 подробно описывает процесс включения NFT, представляющих запасные части/компоненты, в NFT-версию отремонтированного медицинского устройства в качестве дочерних токенов. Чтобы установить родительско-дочерние отношения между NFT, связанными с запасными частями, и токенизированным восстановленным устройством, необходимо, чтобы смарт-контракт DeviceNFT был одобрен в смарт-контракте SparePartNFT. Затем адрес Ethereum смарт-контракта SparePartNFT и идентификаторы токенов соответствующих запасных частей передаются для запуска процесса внедрения. Функция getChild впоследствии вызывается в смарт-контракте DeviceNFT, который основан на стандарте ERC-998 и включает модификации некоторых унаследованных функций. Если смарт-контракт DeviceNFT получил одобрение и вызывающий функцию getChild является владельцем запасных частей NFT, идентифицированных представленными идентификаторами токенов, указанные NFT подключаются к восстановленному NFT медицинскому устройству. NFT, связанный с восстановленным медицинским устройством, выступает в качестве родительского NFT и занимает корневую позицию в установленной иерархии. Смарт-контракт DeviceNFT удерживает техническое право собственности на SparePartNFT, поэтому право передавать право собственности предоставляется исключительно владельцу родительского NFT.

```
Input : childContract, childTokenOwner,  
         childTokenId, deviceTokenId,  
         parentContract  
Output : Emit AttachedChildNFT Event  
1 childContract is the Ethereum address of the  
   ERC-721 contract for the spare parts  
2 childTokenOwner is the Ethereum address of the child  
   token owner  
3 childTokenId is the Ethereum address of the child  
   NFT representing a spare part  
4 deviceTokenId is the token ID of the refurbished  
   medical device that will be the parent NFT  
5 parentContract is the Ethereum address of the parent  
   smart contract  
6 if childTokenId  $\notin$   
   embeddedSpareParts(deviceTokenId) ^ caller ==  
   childTokenOwner ^  
   ERC721(childContract).isApproved(parentContract)  
   then  
7   Add childTokenId to the list of child tokens  
   connected to deviceTokenId in the  
   embeddedSpareParts mapping  
8   Connect NFT of the spare part as child of the  
   parent NFT  
9   Transfer ownership of the NFT to the deviceNFT  
   smart contract  
10  Emit event announcing the embedding of the child  
   token with sparePartTokenId, deviceTokenId and  
   function_caller  
11 end  
12 else  
13 | Revert contract state  
14 end
```

Алгоритм 2 — Процесс внедрения NFT — инициируется из родительского контракта

Процесс внедрения NFT, привязанного к запасным частям (компонентам замены), в составной NFT восстановленного медицинского изделия также можно инициировать из смарт-контракта SparePartNFT, как показано в алгоритме 3. Для инициации интеграции на объекте вызывается функция TransferOwnership. NFT, представляющие запасные части, с адресом получателя, установленным на адрес Ethereum смарт-контракта DeviceNFT. Значение данных типа байт, содержащее идентификатор токена родительского составного NFT, который представляет медицинское устройство, передается в качестве аргумента во время вызова функции. При подтверждении того, что получателем является контракт DeviceNFT, передается право собственности на указанные токены и вызывается функция onERC721Received. d, чтобы завершить процесс привязки. Эта функция срабатывает всякий раз, когда инициируется передача права собственности для NFT, соответствующего стандарту ERC-721, что указывает на успешное завершение процесса передачи. В этом случае функция onERC721Received служит для завершения интеграции NFT запасных частей в иерархию NFT восстановленного медицинского устройства, при этом смарт-контракт DeviceNFT выступает в качестве родительского NFT. Идентификатор токена NFT запасных частей включен в качестве параметра в функцию onERC721Received в виде закодированных данных, что позволяет функции идентифицировать конкретный передаваемый NFT и правильно обновлять иерархию NFT восстановленного устройства.

```

Input : from, childTokenId, receiver, encodedData
Output : Emit AttachedChildNFT Event
1 from is the Ethereum address of the child token's
  current owner
2 childTokenId is the Ethereum address of the child
  NFT representing a spare part
3 deviceTokenId is the token ID of the refurbished
  medical device that will be the parent NFT
4 receiver is the Ethereum address of the parent smart
  contract
5 encodedData is a bytes data that contains the parent
  token Id up to the first 32 bytes
  /* Embedding of child token into the
  device NFT is initiated from the
  child contract */
6 if exists(childTokenId) == true ^ caller ==
  childTokenOwner ^ isContract(receiver) ==
  true ^ receiver ==
  parentContract ^ encodedData.length == 32 then
7   Transfer ownership of the NFT to the receiver
  which is the parent smart contract
8   Call onERC721Received() function from the
  receiver contract
9   Emit event announcing the transfer of the child
  token with childTokenId, receiver address, and
  the encodedData
10 end
11 else
12   Revert contract state
13 end
  /* Child tokens are attached to the
  parent NFT after
  onERC721Received() function is
  executed in the parent smart
  contract. */
14 if caller == childContract ^ encodedData.length >
  0 ^ owner(childTokenId) == receiver then
15   Extract parent token Id from encodedData using
  abi.decode
16   Add childTokenId to the list of child tokens
  connected to deviceTokenId in the
  embeddedSpareParts mapping
17   Emit event announcing the embedding of the child
  token in the parent composable NFT heirarchy
  childTokenId, parenTokenId, from, receiver
18 end
19 else
20   Revert contract state
21 end

```

Алгоритм 3 — Процесс внедрения NFT — инициируется из дочернего контракта

3) Процесс сертификации

После того как отремонтированное медицинское устройство было успешно токенизировано и все запасные части NFT подключены, необходимо подтвердить завершение процесса восстановления. Алгоритм 4 описывает шаги, необходимые для создания индивидуального сертификата NFT и прикрепления его к устройству NFT. Сертификат NFT служит цифровой записью процесса восстановления и уникален для конкретного медицинского устройства, к которому он относится. Чтобы обеспечить целостность процесса сертификации, выданный сертификат NFT не подлежит передаче. Для создания сертификата NFT из смарт-контракта `certificateNFT` вызывается функция `SafeMint`. Метаданные сертификата, включающие информацию о процессе восстановления и медицинском устройстве, передаются как URI, указывающий на контент, хранящийся в Межпланетной файловой системе (IPFS). Для привязки сертификата NFT к восстановленному устройству вызывается функция `binNFTto`, которая получает в качестве параметров адрес Ethereum смарт-контракта устройства NFT, идентификатор токена NFT, связанного с медицинским устройством, и идентификатор токена отчеканенного сертификата. Эта функция служит для установления постоянной родительско-дочерней связи между сертификатом NFT и NFT устройства, гарантируя, что сертификат NFT однозначно привязан к конкретному медицинскому устройству, которое он сертифицирует. После завершения процесса привязки сертификат NFT становится привязанным к NFT устройства, что делает его непередаваемым. Это обеспечивает подлинность и целостность процесса сертификации ремонта.

```
Input : deviceTokenId, UDI, deviceContract_EA,  
         metadata_URI  
Output : Emit NFTCertificateEmbedded Event  
1 deviceTokenId is the token ID of the parent NFT  
2 UDI is the unique device identifier for the refurbished  
   medical device  
3 deviceContract_EA is the Ethereum address of the  
   ERC721 contract for the refurbished medical devices  
   which is also the parent smart contract  
4 metadata_URI is the URI pointing to the certificate  
   metadata uploaded on IPFS  
5 if (bytes32(bytes(UDI))  $\notin$   
   certifiedDevices)  $\wedge$  (metadata_URI is valid) then  
6   Increment tokenId  
7   Mint NFT certificate defined by the current  
   tokenId  
8   Assign deviceContract_EA to be the owner of the  
   NFT  
9   Make token untransferrable (soulbound)  
10  Set the tokenURI for the minted NFT to  
   metadata_URI  
11  Add UDI to certifiedDevices mapping  
12  Call onERC721Received() function from the  
   device (parent) contract  
13  Emit event announcing the successful NFT  
   certificate minting with tokenId, NFT owner EA  
   and tokenURI  
14 end  
15 else  
16   Device is already certified  
17   Revert contract state  
18 end
```

Алгоритм 4. Процесс создания и привязки сертификата NFT

4) Процесс обновления версии NFT

Алгоритм 5 представляет шаги по обновлению динамического NFT после внесения изменений, что может быть необходимо в тех случаях, когда медицинское устройство уже имеет связанный с ним NFT и требует обновления после восстановления. Обновленная версия метаданных сначала загружается в Межпланетную файловую систему (IPFS). Затем вызывается функция `updateNFT` в смарт-контракте `DeviceNFT`, в которой передается идентификатор токена NFT, который необходимо обновить, и возвращенный идентификатор контента (CID) для последних метаданных. URI токена указанного NFT обновляется до новой ссылки IPFS, указывающей на обновленные метаданные. Обратите внимание, что функция `updateNFT` может быть успешно вызвана только текущим владельцем NFT. После завершения процесса обновления генерируется событие, объявляющее об обновлении NFT, включая идентификатор токена NFT и новую ссылку IPFS. Этот процесс позволяет поддерживать и обновлять динамические NFT, гарантируя, что метаданные NFT точно отражают текущее состояние связанного актива.

```
Input : callerEA, token_ID, metadataUpdated  
1 callerEA is the Ethereum address of the function  
   caller token_ID is the token ID of the NFT  
   being updated metadataUpdated is the URI  
   to the updated version of the metadata  
Output : Emit NFTupdated Event  
2 if (callerEA ==  
   owner(token_ID))  $\wedge$  (device(deviceTokenID)  $\in$   
   tokenizedDevices)  $\wedge$  (metadataUpdated is valid)  
   then  
3   | Set token URI to metadataUpdated  
4   | Update NFT version history record  
5   | Emit event announcing the updating of the  
   | specified NFT with old_metadata,  
   | metadataUpdated and callerEA  
6 end  
7 else  
8   | NFT does not exist  
9   | Revert contract state  
10 end
```

Алгоритм 5 — Обновление версии NFT

В. Интерфейс децентрализованного приложения

На рис. 6 показан пользовательский интерфейс для токенизации и листинга продуктов. Чтобы создать NFT, пользователь должен выбрать тип предмета, которым может быть

медицинское изделие, запасная часть или сертификат, загрузить изображение предмета, указать название, указать производителя и предоставить сведения о переработке и восстановлении. деятельность. Эти входные данные будут автоматически анализироваться и использоваться интерфейсом для создания и составления списка NFT. Транзакции подписываются и передаются в блокчейн с помощью MetaMask.



The screenshot shows the 'Create NFT' form in the NFT-RMD application. The form is titled 'Image' and contains the following fields:

- Image:** A file selection button labeled 'Choose File' with the filename 'HamiltonG5_Ventilator.png' displayed.
- Name:** A text input field containing 'Hamilton-G5 Ventilator'.
- Item Type:** A dropdown menu with 'Refurbished Medical Device' selected.
- Manufacturer:** A text input field containing 'Hamilton Medical'.
- Reprocessing:** A text area containing the following text:
Disinfection - YES
Repair - YES
Replacement of Parts - YES
Testing - YES

At the bottom of the form is a blue button labeled 'Create NFT'.

РИСУНОК 6. — Внешний вид чеканки NFT для отремонтированного медицинского устройства.

На рис. 7 показана интерфейсная страница, на которой просматриваются NFT, созданные из токенизированных элементов. Метаданные для каждого NFT, хранящиеся в IPFS, используются для представления изображения, имени, производителя и номера версии NFT, если он имеет динамический тип. Это позволяет пользователю легко просматривать доступные NFT. Как видно на рисунке, у пользователя есть возможность обновить NFT, встроить другие дочерние NFT, а также перенести NFT.

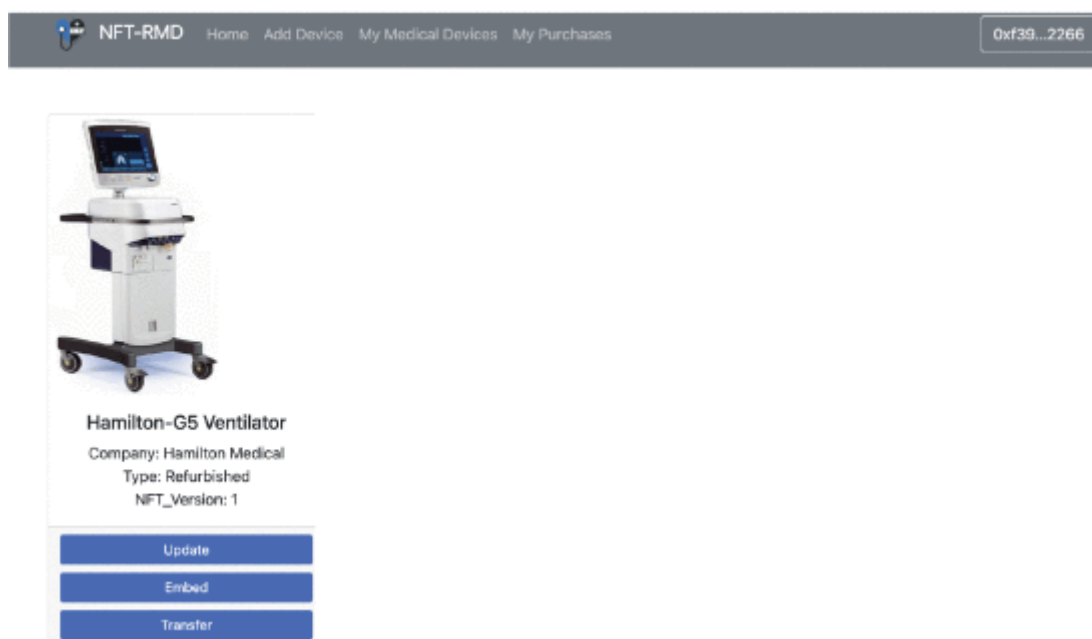


РИСУНОК 7. — Вид указанного устройства спереди.

На рисунках 8 и 9 показана страница «Мои медицинские устройства», которая отображается, когда пользователь нажимает на определенный NFT, чтобы просматривать его детали, встроенные NFT, которые представляют собой установленные запасные части, а также историю транзакций. В этом режиме пользователь может увидеть и проверить подробную информацию о восстановленном медицинском устройстве и всех действиях по его переработке.

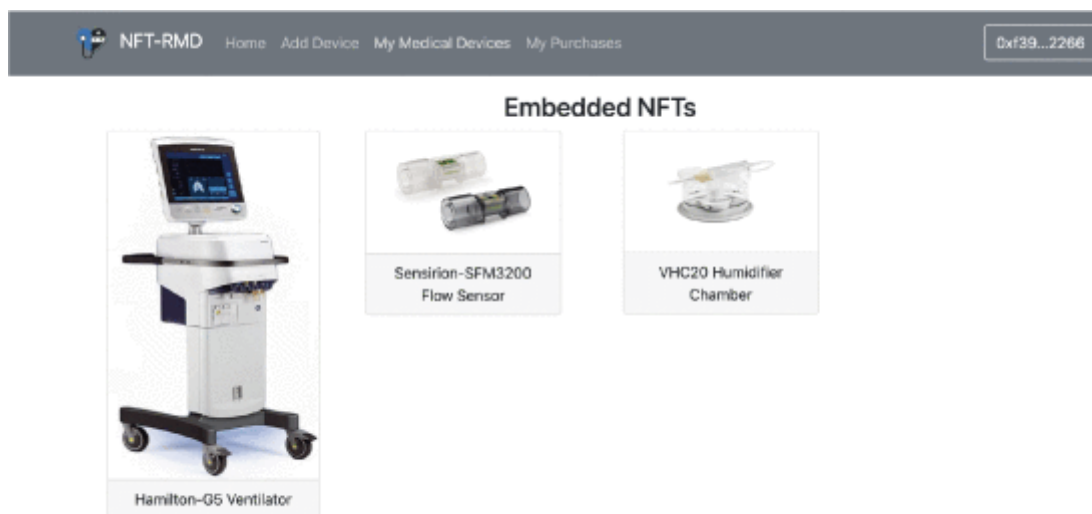
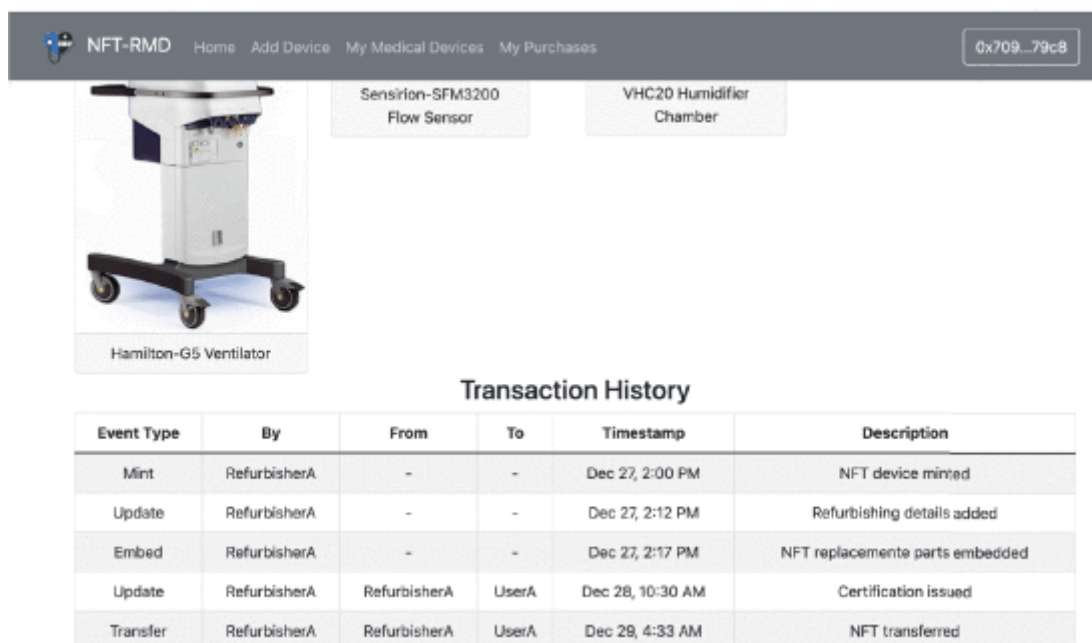


РИСУНОК 8. — Вид спереди на восстановленное NFT медицинское устройство со встроенными запасными частями NFT.

РИСУНОК 9. — Внешний вид истории транзакций, связанных с восстановленным медицинским устройством NFT.



РАЗДЕЛ VI. Тестирование и валидация

В этом разделе представлено тестирование и проверка всех смарт-контрактов, которые используются для управления предлагаемой системой. Все функции, содержащиеся в смарт-контрактах, были тщательно протестированы, чтобы убедиться, что определенные правила и функциональные возможности смарт-контрактов не были нарушены при практическом выполнении процесса. Модификаторы используются для того, чтобы гарантировать, что

только авторизованным объектам или пользователям системы разрешено выполнять функцию. Кроме того, реализовано несколько событий для отслеживания и проверки журналов выполненных транзакций. Все заинтересованные стороны и смарт-контракты идентифицируются по уникально присвоенному адресу Ethereum. В таблице 1 представлены пользователи системы и соответствующие им адреса Ethereum.

ТАБЛИЦА 1 Ethereum-адреса участников системы

| Name | Ethereum Addresses |
|----------------------|--|
| Refurbisher | 0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4 |
| Certification entity | 0xAb8483F64d9C6d1EcF9b849Ae677dD3315835cb2 |

А. Создание NFT для предметов

Процесс создания NFT был протестирован путем передачи образца подробной информации о медицинском устройстве и URL-адреса метаданных. Отправленный URL-адрес метаданных сначала проверяется, чтобы убедиться, что он содержит действительный идентификатор контента (CID), который указывает на информацию, хранящуюся в межпланетной файловой системе (IPFS). Если CID действителен, счетчик идентификаторов токенов увеличивается и создается NFT. Значением Token-URI является URL-адрес метаданных. На рисунке 10 показан журнал вывода после успешного создания NFT для медицинского устройства. Как показано на рисунке, адрес Ethereum восстановителя, который является единственной организацией, уполномоченной чеканить NFT для медицинских устройств, записывается как адрес владельца. Этот вопрос решается позже при продаже медицинского устройства. После процесса чеканки генерируется событие, объявляющее идентификатор токена отчеканенного NFT и адрес владельца. Процесс аналогичен чеканке NFT для запасных частей.

```
[
  {
    "from": "0xd9145CCE52D386f254917e481eB44e9943F39138",
    "topic": "0xddf252ad1be2c89b69c2b068fc378daa952ba7f163c4a11628f55a4df523b3ef",
    "event": "Transfer",
    "args": {
      "0": "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
      "1": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "2": "1",
      "from": "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
      "to": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "tokenId": "1"
    }
  },
  {
    "from": "0xd9145CCE52D386f254917e481eB44e9943F39138",
    "topic": "0x8dcfd396a98293b6a9198af8100e759b1546ae6490e9af7e38565662a5a1c705",
    "event": "DeviceNFTMinted",
    "args": {
      "0": "1",
      "1": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "2":
        "https://ipfs.io/ipfs/Qme7ss3ARBgxv6rXqVPiikMJ8u2NLgmgszql3pYrDKEoiu",
      "_tokenId": "1",
      "_owner": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "_tokenURI":
        "https://ipfs.io/ipfs/Qme7ss3ARBgxv6rXqVPiikMJ8u2NLgmgszql3pYrDKEoiu"
    }
  }
]
```

РИСУНОК 10. — Журналы, показывающие успешное создание составного NFT для отремонтированного медицинского устройства.

Б. Встраивание дочерних Nfts

После того, как медицинское устройство NFT было отчеканено, запасные части, которые были установлены в процессе восстановления, привязываются к медицинскому устройству путем встраивания соответствующих NFT в составное медицинское устройство NFT. Этот процесс инициируется восстановителем и может быть выполнен из родительского смарт-контракта, ответственного за создание медицинского устройства NFT, или дочернего смарт-контракта, отвечающего за создание токенизированных запасных частей. Как показано на рисунке 11, право собственности на запасную часть NFT передается на адрес DeviceNFT SC, который является адресом родительского смарт-контракта, прежде чем он будет прикреплен к конкретному родительскому медицинскому устройству NFT. После завершения передачи NFT дочерний токен связывается с родительским NFT, и объявляется событие.

```
{
  {
    "from": "0xd9145CCE52D386f254917e481eB44e9943F39138",
    "topic": "0x6c062bd0d2c75cb8047b8bbb9fb7dfdfc4102b14c87dc24a782f74b8aa01747a",
    "event": "AttachedChild",
    "args": {
      "0": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "1": "1",
      "2": "0xD7ACd2a9FD159E69Bb102A1ca21C9a3e3A5F771B",
      "3": "1",
      "_from": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "_tokenId": "1",
      "_childContract": "0xD7ACd2a9FD159E69Bb102A1ca21C9a3e3A5F771B",
      "_childTokenId": "1"
    }
  },
  {
    "from": "0xD7ACd2a9FD159E69Bb102A1ca21C9a3e3A5F771B",
    "topic": "0xddf252ad1be2c89b69c2b068fc378daa952ba7f163c4a11628f55a4df523b3ef",
    "event": "Transfer",
    "args": {
      "0": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "1": "0xd9145CCE52D386f254917e481eB44e9943F39138",
      "2": "1",
      "from": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "to": "0xd9145CCE52D386f254917e481eB44e9943F39138",
      "tokenId": "1"
    }
  }
}
```

РИСУНОК 11. — Журналы, показывающие внедрение дочернего NFT, инициированного из родительского контракта.

На рисунке 12 показаны выходные данные успешного внедрения дочернего NFT в составной родительский NFT, инициированного из дочернего смарт-контракта. Как только право собственности передается родительскому смарт-контракту, функция `onERC721Received` вызывается удаленно из дочернего контракта для завершения упаковки дочернего токена с помощью составного NFT. Чтобы подтвердить успешное завершение процесса внедрения, значение селектора функции, которое представляет собой первые 4 байта сигнатуры функции, возвращается из функции `onERC721Received` родительского контракта. Как только это значение получено в дочернем контракте, генерируется событие, указывающее идентификатор токена дочернего NFT, родительского NFT и адрес родительского смарт-контракта.


```

[
  {
    "from": "0x540d7E428D5207B30EE03F2551Cbb5751D3c7569",
    "topic": "0xddf252ad1be2c89b69c2b068fc378daa952ba7f163c4a11628f55a4df523b3ef",
    "event": "Transfer",
    "args": {
      "0": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "1": "0xcD6a42782d230D7c13A74ddec5dD140e55499Df9",
      "2": "1",
      "from": "0x5B38Da6a701c568545dCfcB03FcB875f56beddC4",
      "to": "0xcD6a42782d230D7c13A74ddec5dD140e55499Df9",
      "tokenId": "1"
    }
  },
  {
    "from": "0x540d7E428D5207B30EE03F2551Cbb5751D3c7569",
    "topic": "0xb79b6fd0d9c19ded5a6a6f6cb282562735a874490c42af7f686efe517413286f",
    "event": "Retval",
    "args": {
      "0": "0x150b7a02",
      "retval": "0x150b7a02"
    }
  },
  {
    "from": "0x540d7E428D5207B30EE03F2551Cbb5751D3c7569",
    "topic": "0xb59336d7ab9b3d7fee516d8cc6f57e7157278b81d6780fc472226b0c70f50637",
    "event": "TokenTransferredToParentNFT",
    "args": {
      "0": "1",
      "1": "0xcD6a42782d230D7c13A74ddec5dD140e55499Df9",
      "2": "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000001",
      "_childTokenId": "1",
      "_parentContract": "0xcD6a42782d230D7c13A74ddec5dD140e55499Df9",
      "_encodedData":
      "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000001"
    }
  }
]

```

РИСУНОК 12. — Журналы, показывающие внедрение дочернего NFT, инициированного из дочернего контракта.

С. Выдача сертификата на восстановленное устройство

Чеканка NFT для сертификата на восстановление аналогична процессу токенизации запасных частей или медицинского устройства. После того как орган по сертификации проверит процесс восстановления и подтвердит соответствие определенному стандарту качества и безопасности, выдается сертификат, который загружается в IPFS. Адрес ссылки на метаданные отправлен, и начинается процесс чеканки. После чеканки сертификат NFT прикрепляется к медицинскому устройству NFT аналогично запасным частям NFT. Выпущенный сертификат NFT является персональным, что означает, что его нельзя передать или отсоединить после того, как он перенесен в действующий смарт-контракт ERC721 и завернут в составной родительский NFT. На рис. 13 показано сообщение об ошибке возврата после того, как восстановитель или любой другой владелец медицинского устройства NFT пытается передать или отсоединить привязанный сертификат NFT от его родительского токена.

```
[vm] from: 0x5B3...eddC4
to: CertificatetNFT.safeTransferFrom(address,address,uint256)
0xEc2...cF142
value: 0 wei data: 0x428...00002 logs: 0 hash: 0xb02...814f7
transact to CertificatetNFT.safeTransferFrom errored: VM error: revert.

revert
The transaction has been reverted to the initial state.
Reason provided by the contract: "You cannot transfer this token".
Debug the transaction to get more information.
```

РИСУНОК 13. — Журналы, показывающие неудачную попытку передачи индивидуального сертификата NFT.

D. Обновление версии NFT

Динамический характер медицинских устройств NFT позволяет авторизованному восстановителю, который также является текущим владельцем NFT, обновлять сведения об устройстве и метаданные, связанные с NFT. Это особенно полезно в тех случаях, когда медицинское устройство, доставленное на ремонт, уже поставляется со связанным NFT, выданным его производителем, или проходит очередной этап восстановления и требует обновленной информации. Чтобы обновить NFT, восстановителю необходимо ввести текущие метаданные. Последняя версия метаданных связана с предыдущей версией, создавая хронологическую цепочку файлов метаданных для целей отслеживания версий. На рис. 14 показаны выходные данные после успешного обновления NFT восстановленного медицинского устройства. Он показывает обновленный номер версии NFT, а также адреса текущего и предыдущего содержимого метаданных.

```
{
  "from": "0x38cB7800C3Fddb8dda074C1c650A155154924C73",
  "topic": "0x8e26f807d262464ddaf6f10e05alcb5846c8411bd8410f41509a823dd47875b4",
  "event": "NFTUpdated",
  "args": {
    "0": "1",
    "1": "2",
    "2":
      "ipfs://bafybeidi4xixphrxar6humruz4mn6ul7nzmres7j4triakpfabiez114ti/0001_v1.json",
    "3":
      "ipfs://bafybeic3ui7dj5dzsvqeiqbxjgg3fjmfmiinb3iyd2trixj2voe4jtefgq/0001_v2.json",
      "_tokenID": "1",
      "_version": "2",
      "_previousMetadata":
        "ipfs://bafybeidi4xixphrxar6humruz4mn6ul7nzmres7j4triakpfabiez114ti/0001_v1.json",
      "_updatedMetadata":
        "ipfs://bafybeic3ui7dj5dzsvqeiqbxjgg3fjmfmiinb3iyd2trixj2voe4jtefgq/0001_v2.json"
  }
}
```

РИСУНОК 14. Журналы, показывающие успешное обновление динамического NFT, представляющего отремонтированное медицинское устройство.

РАЗДЕЛ VII. Обсуждение

В этом разделе мы оцениваем экономическую эффективность предлагаемого нами решения и проводим анализ безопасности разработанных смарт-контрактов. Кроме того, мы сравниваем наше решение с другими существующими решениями в литературе. Наконец, мы демонстрируем, как наш подход можно обобщить и распространить на другие приложения.

A. Анализ затрат

Чтобы оценить производительность нашего решения, мы провели анализ затрат на основе газа, потребляемого во время выполнения функций смарт-контракта. Наш анализ включал сравнение затрат, связанных с различными алгоритмами, используемыми в нашем решении. Стоимость газа отражает временную и пространственную сложность функциональных задач и операций, выполняемых виртуальной машиной Ethereum (EVM) [35], [36]. Чтобы определить предполагаемый верхний предел использования газа всеми функциями в наших смарт-контрактах, мы провели смоделированные тесты, выдавая повторяющиеся запросы транзакций Ethereum в среде Remix IDE, которая обеспечивает оценку использования газа транзакциями на уровне байт-кода [37]. [38]. В таблице 2 представлены алгоритмы и стоимость их выполнения в эфире. Как показано в таблице, алгоритм выдачи сертификатов NFT требует более высоких затрат из-за необходимости выполнения нескольких транзакций, включая создание NFT, передачу NFT в родительский смарт-контракт и прикрепление его к родительскому NFT. Аналогичным образом, внедрение дочерних NFT также предполагает передачу NFT между адресами смарт-контракта и выполнение функций из другого контракта, что приводит к более высоким затратам. С другой стороны, функция обновления NFT имеет меньшую стоимость благодаря более простой операции изменения значения URI токена и генерации событий. В целом, потребление газа для этих функций велико, а использование публичного блокчейна, такого как Mainnet Ethereum, влечет за собой расходы в Ether, которые могут быть непредсказуемыми. Таким образом, этот анализ показывает, что частный блокчейн будет более подходящим вариантом для нашего решения, чем публичный блокчейн.

ТАБЛИЦА 2. Анализ затрат на реализованные алгоритмы и исполняемые функции в смарт-контрактах

| Process | Functions | Gas Usage (Gas) | Cost in Ether | |
|--------------------------------------|---|-----------------|-------------------|--------------------|
| | | | Public Blockchain | Private Blockchain |
| NFT Minting | Mint NFT (Medical Device or Replacement Part) | 207,566 | 0.0029682 | None |
| NFT Embedding - From Parent Contract | Get Child NFT | 210,949 | 0.0030166 | None |
| | Attach Child NFT | | | |
| NFT Embedding - From Child Contract | Receive Child NFT | 193,851 | 0.0027721 | None |
| | Attach Child NFT | | | |
| NFT Certificate Issuing | Mint NFT Certificate | 244,934 | 0.0035026 | None |
| | Transfer NFT | | | |
| | Bind NFT | | | |
| NFT Updating | Update NFT | 56,693 | 0.0008107 | None |

B. Анализ безопасности смарт-контрактов

Безопасность смарт-контрактов является важнейшим аспектом нашего решения, поскольку для правильного функционирования система полагается на целостность и надежность контрактов [39]. Поэтому мы провели анализ безопасности наших смарт-контрактов с помощью Slither, чтобы выявить любые потенциальные уязвимости или эксплойты. Slither —

это платформа статического анализа смарт-контрактов [40]. Он запускает набор детекторов, позволяющих быстро и точно проверять и анализировать код целостности для обнаружения уязвимостей.

На рисунках 15, 16 и 17 представлена сводка уязвимостей, выявленных инструментом Slither в наших смарт-контрактах. Отчет об анализе выявил одну проблему средней серьезности во всех трех смарт-контрактах. Эта проблема связана с неиспользуемым возвращаемым значением в контракте ERC-721 из библиотеки OpenZeppelin, используемой в нашем коде, и не считается уязвимостью, которую можно использовать. Кроме того, были выявлены проблемы низкой степени серьезности, связанные с контрактами OpenZeppelin, выполняющими внешние вызовы функций для других контрактов в той же библиотеке. Такие внешние звонки потенциально может привести к повторной атаке, при которой недоверенный контракт выполняет рекурсивный обратный вызов к исходному контракту в попытке истощить средства. Однако в нашем случае это не проблема, поскольку внешние вызовы выполняются внутри доверенной библиотеки OpenZeppelin. Полный список всех затронутых уязвимостей и их описание можно найти в [41].

```
Compiled with solc
Number of lines: 1311 (+ 0 in dependencies, + 0 in tests)
Number of assembly lines: 0
Number of contracts: 13 (+ 0 in dependencies, + 0 tests)

Number of optimization issues: 0
Number of informational issues: 0
Number of low issues: 4
Number of medium issues: 1
Number of high issues: 0

ERCs: ERC165, ERC721

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Name | # functions | ERCs | ERC20 info | Complex code | Features |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| DeviceFactory | 0 | | | No | |
| DeviceNFT | 61 | ERC165,ERC721 | | No | Tokens interaction |
| | | | | | Assembly |
| Address | 11 | | | No | Send ETH |
| | | | | | Delegatecall |
| | | | | | Assembly |
| Strings | 4 | | | Yes | |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
./contracts/DeviceNFT.sol analyzed (13 contracts)
```

РИСУНОК 15. — Отчет об анализе безопасности от Slither — смарт-контракт DeviceNFT.

```

Compiled with solc
Number of lines: 1163 (+ 0 in dependencies, + 0 in tests)
Number of assembly lines: 0
Number of contracts: 12 (+ 0 in dependencies, + 0 tests)

Number of optimization issues: 0
Number of informational issues: 0
Number of low issues: 5
Number of medium issues: 1
Number of high issues: 0

ERCs: ERC721, ERC165

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Name | # functions | ERCs | ERC20 info | Complex code | Features |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| IDeviceNFT | 1 | | | No | |
| SparePartNFT | 54 | ERC165,ERC721 | | No | Assembly |
| IERC721Receiver | 1 | | | No | |
| Address | 11 | | | No | Send ETH |
| | | | | | Delegatecall |
| | | | | | Assembly |
| Strings | 4 | | | Yes | |
+-----+-----+-----+-----+-----+
./contracts/SparePartNFT.sol analyzed (12 contracts)

```

РИСУНОК 16. — Отчет об анализе безопасности от Slither — смарт-контракт SparePartNFT.

```

Compiled with solc
Number of lines: 1166 (+ 0 in dependencies, + 0 in tests)
Number of assembly lines: 0
Number of contracts: 12 (+ 0 in dependencies, + 0 tests)

Number of optimization issues: 0
Number of informational issues: 0
Number of low issues: 5
Number of medium issues: 1
Number of high issues: 0

ERCs: ERC721, ERC165

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Name | # functions | ERCs | ERC20 info | Complex code | Features |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| IDeviceNFT | 1 | | | No | |
| CertificatetNFT | 55 | ERC165,ERC721 | | No | Assembly |
| IERC721Receiver | 1 | | | No | |
| Address | 11 | | | No | Send ETH |
| | | | | | Delegatecall |
| | | | | | Assembly |
| Strings | 4 | | | Yes | |
+-----+-----+-----+-----+-----+
./contracts/CertificateNFT.sol analyzed (12 contracts)

```

РИСУНОК 17. — Отчет об анализе безопасности от Slither — смарт-контракт CertificateNFT.

Наша система использует преимущества встроенных функций безопасности, присущих технологии блокчейн, обеспечивая безопасный, надежный и защищенный от несанкционированного доступа метод управления данными и информацией [39], [42]. Целостность данных — ключевая функция безопасности, встроенная в нашу систему, поскольку она является критически важным требованием для многих приложений. Криптографические функции, реализованные в сети блокчейн, делают транзакции неизменными, что особенно важно в отрасли здравоохранения, где манипулирование данными и подделка устройств могут иметь пагубные последствия. Наша система записывает прошлые транзакции и передачу прав собственности в блокчейн, обеспечивая доступность данных о происхождении и безопасную, защищенную от несанкционированного доступа историю медицинского устройства, пока оно проходит процесс восстановления и сертификации.

Децентрализованный характер сети блокчейн также обеспечивает высокий уровень доступности, гарантируя, что наши смарт-контракты всегда доступны всем пользователям системы и заинтересованным сторонам. Эта надежность особенно важна для предлагаемого применения в сфере здравоохранения. Кроме того, тот факт, что все транзакции записываются в блокчейн, означает, что ни одна участвующая организация не может отрицать свои действия, обеспечивая функцию безопасности, не допускающую отказа. Адреса Ethereum для всех заинтересованных сторон регистрируются, а вызовы функций, сделанные объектом, записываются и добавляются в неизменяемый журнал транзакций, каждая из которых подписывается вызывающей стороной.

Уровни авторизации также назначаются зарегистрированным заинтересованным сторонам, предоставляя различные уровни доступа к функциям смарт-контрактов. Роли помогают предоставлять полномочия, и все функции, определенные в смарт-контрактах, могут вызываться только уполномоченными лицами. Если заинтересованное лицо пытается инициировать вызов функции, для которого он не авторизован, отображается сообщение об ошибке «отказано в доступе», и все состояния возвращаются.

С. Сравнение систем

В Таблице 3 представлено сравнение предлагаемого нами решения с существующими решениями на основе блокчейна, а также с поддержкой NFT для отрасли здравоохранения. Сравнение основано на нескольких критериях, включая тип используемой блокчейн-платформы, токенизацию элементов, возможности отслеживания и отслеживания, использование автономного хранилища, сертификацию и разработку DApp.

ТАБЛИЦА 3. Сравнение нашей системы с другими существующими решениями в отрасли здравоохранения

| Comparison Criteria | Our Solution | [18] | [19] | [23] | [24] | [26] | [31] |
|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Blockchain Platform | Ethereum | Ethereum | Hyperledger Fabric | Hyperledger Fabric | Dragonledger | Ethereum | VeChainThor |
| Permission | Private and Public | Private | Private | Private | Private | Private | Private |
| Application | Refurbished Medical Device Management | Blood Donation Supply Chain | Health Data Traceability | Drug Supply Chain Management | Drug Traceability and Regulation | COVID-19 Vaccine Where | Pharmaceutical Supply Chain |
| Items Tokenization (NFTs) | Yes | No | No | No | No | No | Yes |
| Traceability | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| Items Tracking | Yes | No | No | No | Yes | No | Yes |
| Extended Certification | Yes | No | No | No | No | No | No |
| DB-Chain Storage | IPFS | None | None | None | None | IPFS | None |
| DApp | Yes | No | No | No | No | No | No |

Предлагаемое нами решение, наряду с [18] и [26], использует сеть блокчейна Ethereum, в то время как [19] и [23] используют Hyperledger Fabric, [24] реализует пользовательскую сеть, а [31] использует VeChainThor. Наше решение, наряду с [26], также включает в себя автономное децентрализованное хранилище, которого нет в других решениях. Что отличает предлагаемое нами решение от других, так это использование составных NFT для создания полного цифрового представления отремонтированных медицинских устройств. Это позволит предложить лучшее решение для управления и организации данных, более простую и интуитивно понятную торговую систему, а также надежную проверку восстановления с использованием токенизированных сертификатов. Для сравнения, [31] также использует NFT для отслеживания фармацевтических продуктов. Однако предлагаемое нами решение отличается тем, что оно использует динамические NFT, которые можно обновлять, для записи и отражения изменений, внесенных в медицинское устройство в процессе восстановления.

Кроме того, возможность компоновки токенов, реализованная в нашем решении, позволяет точно представить отремонтированное устройство и его замененные части. Токенизация и интеграция сертификатов восстановления в форме индивидуальных NFT еще больше укрепляет предлагаемую нами систему как надежное решение для сертификации и проверки безопасности и качества восстановленных медицинских устройств.

D. Обобщение

Наше решение предлагает надежную систему управления процессом восстановления медицинского оборудования, его сертификацией и владением. Это позволяет отслеживать и проверять восстановленные медицинские устройства по мере их повторного размещения на рынке. Это решение также можно адаптировать для использования в другие отрасли путем модификации смарт-контрактов в соответствии с конкретными требованиями и потребностями нового приложения. Такая универсальность позволяет потенциально расширить наше решение в различных секторах за пределами здравоохранения.

С точки зрения алгоритмов, этап листинга может быть изменен для поддержки аукциона восстановленного медицинского устройства. Таким образом, владелец NFT может установить временное окно аукциона и позволить покупателям отправлять свои предложения, в течение которых в конце временного окна аукциона владелец может принять самую высокую ставку или отклонить все.

Кроме того, поскольку наши смарт-контракты предназначены для создания динамических NFT, метаданные которых можно обновлять и изменять, датчики и устройства Интернета вещей (IoT) могут быть интегрированы в процесс восстановления или в медицинское устройство для записи информации в реальном времени. Любое изменение соответствующей информации, полученной датчиками Интернета вещей, может быть отражено в NFT. Однако вместо использования IPFS для автономного хранения данных Ceramic Data Network является лучшим вариантом хранения для записи потока данных или информации с сохранением журнала истории метаданных.

Персональный тип NFT, реализованный в нашем решении, также может быть расширен за пределы сертификатов с точки зрения их использования. Эти непередаваемые NFT могут использоваться для представления цифровой идентификации пользователей или заинтересованных сторон. Каждому участнику будет выдан персональный NFT, чтобы его можно было легко идентифицировать при каждой транзакции в системе.

Помимо здравоохранения, наше решение можно адаптировать к другим отраслям, где продукты состоят из составных частей или подкомпонентов. С помощью наших смарт-контрактов ERC-998 можно токенизировать и соединить несколько продуктов для создания NFT с более высокой стоимостью. Например, в сфере недвижимости дом может быть представлен как составной NFT, где земля и другие части дома токенизированы и объединены вместе, чтобы представлять весь дом.

РАЗДЕЛ VIII. Заключение

В этой статье мы предложили решение на основе NFT для обеспечения достоверности отслеживания и сертификации процесса восстановления медицинских устройств безопасным, прозрачным и проверяемым способом. Мы использовали составные NFT для создания полного представления отремонтированных медицинских устройств с замененными частями и разработки системы, которая может эффективно отслеживать, отслеживать и проверять восстановленные медицинские устройства во время и после процесса восстановления. Мы добавили возможность обновлять метаданные составных NFT, добавляя динамизм и возможность развития, чтобы точно отражать любые изменения, внесенные в физическое устройство во время восстановления. Кроме того, мы использовали жетоны Soulbound для сертификации работ по восстановлению и обеспечения безопасности и качества отремонтированных устройств. Мы использовали децентрализованное хранилище IPFS для хранения и записи метаданных NFT. Мы разработали и протестировали смарт-контракты, которые позволяют создавать, внедрять, привязывать и передавать NFT. Мы представили тест-кейсы для демонстрации функциональности нашей системы. Мы разработали DApp, чтобы продемонстрировать не только интуитивность нашего решения, но и его потенциал предложить надежный способ обеспечения безопасности и качества отремонтированных медицинских устройств. Мы провели анализ безопасности смарт-контракта, чтобы показать, что наш код смарт-контракта не содержит известных уязвимостей, которые можно использовать. Мы показали уникальные особенности нашего решения, проведя сравнительный анализ с существующими решениями. Наконец, мы обсудили, как наше решение можно адаптировать и обобщить для других приложений. В будущем мы планируем развернуть нашу систему и ее смарт-контракты в основной сети Ethereum.

References

1.
Medical Device Market Research Report—Global Forecast Till 2030, Dec. 2022, [online] Available: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/medical-devices-market-2869>.
Show in Context [Google Scholar](#)
2.
J. Colletti, New AMDR Report Strengthens Case for Single-Use Medical Device Reprocessing, [online] Available: <https://www.ormanager.com/new-amdr-report-strengthens-case-for-single-use-medical-device-reprocessing/>.
Show in Context [Google Scholar](#)
3.
B. Kelechava, Good Refurbishment Practices for Medical Imaging Equipment, [online] Available: <https://blog.ansi.org/refurbishment-medical-imaging-equipment-iec-63077/#gref>.
Show in Context [Google Scholar](#)
4.
S. Nakamoto, Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, 2009, [online] Available: <https://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
Show in Context [Google Scholar](#)
-
5.
Z. Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen and H. Wang, "An overview of blockchain technology: Architecture consensus and future trends", Proc. IEEE Int. Congr. Big Data (BigData Congress), pp. 557-564, Jun. 2017.
Show in Context [View Article](#)
[Google Scholar](#)
6.
I. Yaqoob, K. Salah, R. Jayaraman and Y. Al-Hammadi, "Blockchain for healthcare data management: Opportunities challenges and future recommendations", Neural Comput. Appl., vol. 34, no. 14, pp. 11475-11490, Jul. 2022.
Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)
-
7.
A. Park, J. Kietzmann, L. Pitt and A. Dabirian, "The evolution of nonfungible tokens: Complexity and novelty of NFT use-cases", IT Prof., vol. 24, no. 1, pp. 9-14, Jan. 2022.
Show in Context [View Article](#)
[Google Scholar](#)
8.
M. Nadini, L. Alessandretti, F. Di Giacinto, M. Martino, L. M. Aiello and A. Baronchelli, "Mapping the NFT revolution: Market trends trade networks and visual features", Sci. Rep., vol. 11, no. 1, Oct. 2021.
Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)
9.
S. M. H. Bamakan, N. Nezhadsistani, O. Bodaghi and Q. Qu, "Patents and intellectual property assets as non-fungible tokens; key technologies and challenges", Sci. Rep., vol. 12, no. 1, pp. 2178, Feb. 2022.
Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)
- 10.

S. Nava, J. L. Morales, M. F. Márquez, F. Barrera, J. Gómez, L. Colín, et al., "Reuse of pacemakers: Comparison of short and long-term performance", *Circulation*, vol. 127, no. 11, pp. 1177-1183, Mar. 2013.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

11.

R. Selvaraj, R. Sakthivel, S. Satheesh, A. A. Pillai, P. Sagnol, X. Jouven, et al., "Reuse of pacemakers defibrillators and cardiac resynchronisation devices", *Heart Asia*, vol. 9, no. 1, pp. 59-62, 2017.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

12.

E. M. Psaltikidis, E. A. M. Costa and K. U. Graziano, "Reuse of pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators: Systematic review meta-analysis and quality assessment of the body of evidence", *Expert Rev. Med. Devices*, vol. 18, no. 6, pp. 553-567, 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

13.

Medical Devices; Reprocessed Single-Use Devices; Termination of Exemptions From Premarket Notification; Requirement for Submission of Validation Data, 2005, [online] Available: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2005-09-29/pdf/05-19510.pdf>.

Show in Context [Google Scholar](#)

14.

Summary of the Medical Device User Fee and Modernization Act of 2002 Including Changes Made by the Medical Devices Technical Corrections Act (April 1 2004), 2004, [online] Available: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2005-09-29/pdf/05-19510.pdf>.

Show in Context [Google Scholar](#)

15.

W. Entriken, D. Shirley, J. Evans and N. Sachs, Non-Fungible Token Standard EIP-721, 2018, [online] Available: <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>.

Show in Context [Google Scholar](#)

16.

M. Lockyer, N. Mudge and J. Schalm, ERC-998 Composable Non-Fungible Token Standard [Draft] Standard EIP-998, 2018, [online] Available: <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-998>.

Show in Context [Google Scholar](#)

17.

E. G. Weyl, P. Ohlhaber and V. Buterin, Decentralized Society: Finding Web3's Soul 1, 2022, [online] Available: <https://ssrn.com/abstract=4105763>.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

18.

S. Sadri, A. Shahzad and K. Zhang, "Blockchain traceability in healthcare: Blood donation supply chain", *Proc. 23rd Int. Conf. Adv. Commun. Technol. (ICACT)*, pp. 1-8, Feb. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

19.

R. P. Pinto, B. M. C. Silva and P. R. M. Inacio, "A system for the promotion of traceability and ownership of health data using blockchain", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 92760-92773, 2022.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

20.

M. M. Madine, A. A. Battah, I. Yaqoob, K. Salah, R. Jayaraman, Y. Al-Hammadi, et al., "Blockchain for giving patients control over their medical records", IEEE Access, vol. 8, pp. 193102-193115, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



21.

V. Jaiman and V. Urovi, "A consent model for blockchain-based health data sharing platforms", IEEE Access, vol. 8, pp. 143734-143745, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



22.

A. Musamih, K. Salah, R. Jayaraman, J. Arshad, M. Debe, Y. Al-Hammadi, et al., "A blockchain-based approach for drug traceability in healthcare supply chain", IEEE Access, vol. 9, pp. 9728-9743, 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

23.

F. Jamil, L. Hang, K. Kim and D. Kim, "A novel medical blockchain model for drug supply chain integrity management in a smart hospital", Electronics, vol. 8, no. 5, pp. 505, May 2019, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/5/505>.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



24.

Y. Huang, J. Wu and C. Long, "Drugledger: A practical blockchain system for drug traceability and regulation", Proc. IEEE Int. Conf. Internet Things (iThings) IEEE Green Comput. Commun. (GreenCom) IEEE Cyber Phys. Social Comput. (CPSCom) IEEE Smart Data (SmartData), pp. 1137-1144, Jul. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

25.

Farmatrust Whitepaper V2.0, Dec. 2022, [online] Available: <https://neuronix.io/ico-rating/farmatrust/white-paper>.

Show in Context [Google Scholar](#)



26.

R. W. Ahmad, K. Salah, R. Jayaraman, I. Yaqoob, M. Omar and S. Ellahham, "Blockchain-based forward supply chain and waste management for COVID-19 medical equipment and supplies", IEEE Access, vol. 9, pp. 44905-44927, 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

27.

Q. Wang, R. Li, Q. Wang and S. Chen, "Non-fungible token (NFT): Overview evaluation opportunities and challenges", arXiv:2105.07447, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)



28.

F. K. Elmay, K. Salah, R. Jayaraman and I. A. Omar, "Using NFTs and blockchain for traceability and auctioning of shipping containers and cargo in maritime industry", IEEE Access, vol. 10, pp. 124507-124522, 2022.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

29.

K. Kostick-Quenet, K. D. Mandl, T. Minssen, I. G. Cohen, U. Gasser, I. Kohane, et al., "How NFTs could transform health information exchange", *Science*, vol. 375, no. 6580, pp. 500-502, Feb. 2022.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

30.

J. Cunningham, N. Davies, S. Devaney, S. Holm, M. Harding, V. Neumann, et al., "Non-fungible tokens as a mechanism for representing patient consent", *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 294, pp. 382-386, May 2022.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

31.

F. Chiacchio, D. D'Urso, L. M. Oliveri, A. Spitaleri, C. Spampinato and D. Giordano, "A non-fungible token solution for the track and trace of pharmaceutical supply chain", *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 8, pp. 4019, Apr. 2022.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

32.

S. A. Gebreab, H. R. Hasan, K. Salah and R. Jayaraman, "NFT-based traceability and ownership management of medical devices", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 126394-126411, 2022.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

33.

D. Vujcic, D. Jagodic and S. Randic, "Blockchain technology Bitcoin and Ethereum: A brief overview", *Proc. 17th Int. Symp. INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, pp. 1-6, Mar. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

34.

N. Szabo, "Formalizing and securing relationships on public networks", *First Monday*, vol. 2, no. 9, 1997.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

35.

G. Wood, "Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger", *Ethereum Project Yellow Paper*, vol. 151, pp. 1-32, 2014, [online] Available:

<https://pdfs.semanticscholar.org/ac15/ea808ef3b17ad754f91d3a00fedc8f96b929.pdf>.

Show in Context [Google Scholar](#)

36.

E. Albert, J. Correas, P. Gordillo, G. Román-Díez and A. Rubio, "GASOL: Gas analysis and optimization for Ethereum smart contracts", *Proc. Int. Conf. Tools Algorithms Construct. Anal. Syst.*, pp. 118-125, Apr. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

37.

A. A. Zarir, G. A. Oliva, Z. M. Jiang and A. E. Hassan, "Developing cost-effective blockchain-powered applications: A case study of the gas usage of smart contract transactions in the Ethereum blockchain platform", *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 30, no. 3, pp. 1-38, Jul. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

38.

W. Zou, D. Lo, P. S. Kochhar, X.-B. D. Le, X. Xia, Y. Feng, et al., "Smart contract development: Challenges and opportunities", *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 47, no. 10, pp. 2084-2106, Oct. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



39.

I. Homoliak, S. Venugopalan, D. Reijnsbergen, Q. Hum, R. Schumi and P. Szalachowski, "The security reference architecture for blockchains: Toward a standardized model for studying vulnerabilities threats and defenses", IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 23, no. 1, pp. 341-390, 1st Quart. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



40.

J. Feist, G. Grieco and A. Groce, "Slither: A static analysis framework for smart contracts", Proc. IEEE/ACM 2nd Int. Workshop Emerg. Trends Softw. Eng. Blockchain (WETSEB), pp. 8-15, May 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

41.

Slither: The Solidity Source Analyzer, Dec. 2022, [online] Available: <https://github.com/crytic/slither>.

Show in Context [Google Scholar](#)

42.

H. Chen, M. Pendleton, L. Njilla and S. Xu, "A survey on Ethereum systems security: Vulnerabilities attacks and defenses", arXiv:1908.04507, 2019.

Show in Context [Google Scholar](#)