

УДК 658.51

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ БЛОКЧЕЙН-СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИЗДЕЛИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Гарина И.О.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, e-mail: ir.garina@gmail.com*

Описаны изменения, вызванные развитием и распространением киберфизических систем. Рассмотрена концепция цифрового двойника в рамках жизненного цикла изделия в машиностроении. Приведена специфика и сформулированы основные требования к цифровым двойникам машиностроительной продукции и процессов ее производства. Сформулированы требования к безопасности, проанализирована возможность использования технологии блокчейн. Обоснован подход к реализации концепции цифрового двойника в машиностроении с использованием децентрализованных хранилищ данных и смарт-контрактов на основе технологии блокчейн. Рассмотрен зарубежный опыт развития технологии цифровых двойников с использованием блокчейн и их внедрения в производственные процессы. Предложены организационные и технические решения по разработке блокчейн-структуры цифрового двойника изделия в машиностроении. Приведен поэтапный процесс создания цифрового двойника от сбора требований и их анализа, проектирования до сборки и тестирования и последующего предоставления для использования. Рассмотрены роли участников процессов жизненного цикла цифрового двойника и их основные функции. Описаны компоненты предлагаемого решения, обоснована их применимость. Предложен подход, позволяющий добиться повышения достоверности и отслеживаемости данных, а также повышения качества и эффективности управления жизненным циклом на всех стадиях.

Ключевые слова: машиностроение, цифровой двойник, блокчейн, управление жизненным циклом, оптимизация, надежность

METHODICAL APPROACH THE DEVELOPMENT OF BLOCKCHAIN STRUCTURED DIGITAL TWIN IN MACHINE-BUILDING

Garina I.O.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: ir.garina@gmail.com

The changes caused by the development and spread of cyber-physical systems are described. The concept of a digital twin within the life cycle of a product in mechanical engineering is considered. The specifics are given and the basic requirements for digital twins of mechanical engineering products and their production processes are formulated. Security requirements have been formulated, the possibility of using blockchain technology has been analyzed. An approach to the implementation of the concept of a digital twin in mechanical engineering using decentralized data storages and smart contracts based on blockchain technology has been substantiated. The foreign experience in the development of digital twins technology using blockchain and their implementation into production processes is considered. Organizational and technical solutions for the development of a blockchain structure for a digital twin of a product in mechanical engineering are proposed. A step-by-step process for creating a digital twin from collecting requirements and analyzing them, designing to assembling and testing and then providing them for use is presented. The roles of participants in the digital twin life cycle processes and their main functions are considered. The components of the proposed solution are described, and their applicability is substantiated. An approach is proposed to improve the reliability and traceability of data, as well as improve the quality and efficiency of life cycle management at all stages.

Keywords: mechanical engineering, digital twin, blockchain, lifecycle management, optimization, reliability

С распространением киберфизических систем, продвинутой аналитики данных и высокопроизводительных вычислительных технологий Индустрия 4.0 привнесла значительные изменения в промышленные операции [1]. Объединение физических и виртуальных цифровых элементов привело к созданию концепции цифрового двойника (от лат. digital twin). Цифровой двойник стал компонентом производства в машиностроительной отрасли, являясь виртуальным представлением физического объекта, процесса и/или системы [2]. Цифровой двойник нацелен на оптимизацию производственных операций, поддержание физических активов и производственных процессов. Цифровые двойники работают

в цифровом мире так же, как их физические представления в реальном физическом мире, ликвидируя разрыв между реальным и виртуальным миром. Интеграция цифрового и физического представления с использованием потоков данных, генерируемых сенсорными устройствами, актуальна для предприятий машиностроительной отрасли как с точки зрения проактивного обслуживания в течение всего жизненного цикла (далее – ЖЦ) изделия, так и с точки зрения использования прогностических имитационных моделей [3]. Кроме того, возможность оптимизации производительности является одним из главных преимуществ в промышленности, которое может быть достигнуто путем создания цифровых

двойников [4]. Видение цифрового двойника изображается как «всеобъемлющее физическое и функциональное описание компонента, продукта или системы, которое включает в себя всю информацию, полезную на протяжении жизненного цикла – на текущем и последующих этапах» [5].

Концепция цифрового двойника была впервые представлена как концептуальный идеал для управления жизненным циклом (далее – УЖЦ) в презентации Мичиганского университета в 2002 г. Элементы цифрового двойника были определены как объединение реального и виртуального пространств за счет потоков данных из реального пространства в виртуальное и связь для потоков информации и процессов из виртуального пространства в реальное.

На практике концепция цифрового двойника была введена НАСА, чтобы находить эффективные способы решения проблем, связанных с миссией Apollo 12. В отечественной аэрокосмической промышленности также одновременно с космическим аппаратом производили его точную копию, которая оставалась на Земле, чтобы позволить инженерам отслеживать и тестировать экстренно требующиеся решения, пробовать альтернативы и использовать его для обучения. Еще одним примером аппаратного двойника является так называемая «железная птица» Airbus, которая базируется на земле и используется для оценки и проверки физических интеграций электрических и гидравлических авиационных систем. Через виртуальную кабину можно управлять «железной птицей», то есть виртуально управлять компьютерами, имитирующими необходимую среду и, следовательно, генерирующими аппаратного двойника без полной функциональности. Потребность работать на таких системах, не находясь физически вместе, привела к созданию виртуальной модели процесса или услуги, которая обладает характеристиками, аналогичными физическому объекту. Расширение и интеграция виртуального и реального миров создаются с использованием методов моделирования, Интернета вещей, искусственного интеллекта и анализа непрерывных потоков данных, собираемых с сенсорных элементов. Ожидается, что половина крупных промышленных компаний начнут использовать цифровых двойников к 2021 г., а их рынок достигнет 15,66 млрд долл. к 2023 г. [6].

Цифровых двойников можно разделить на две основные категории, а именно статические и динамические. Прежний тип оцифрованных моделей, с которых началось развитие концепции, не изменялся по форме

и не был подвержен влиянию потоков информации. С развитием технологий появился динамический тип цифровых двойников, постоянно изменяющийся под влиянием обновляемых потоков данных. Таким образом, динамические двойники всегда отражают состояние их физических оригиналов и могут быть мгновенно обновлены посредством регулярного обмена информацией.

Производственная структура цифрового двойника описана ISO 23247 [7] и представлена в четырех частях:

– часть 1 «Обзор и общие принципы» предоставляет обзор производства и описывает общие принципы и руководства для разработки структуры производства цифрового двойника;

– часть 2 «Эталонная архитектура» обеспечивает цели и задачи эталонной архитектуры, эталонную модель и эталонные архитектурные виды;

– часть 3 «Цифровое представление производственных элементов» определяет элементы производственной структуры цифрового двойника, которые должны быть представлены в цифровых моделях;

– часть 4 «Обмен информацией» идентифицирует технологии, такие как сетевые протоколы, API, языки описания и т.д., для синхронизации информации, обмена и управления цифровыми производственными двойниками.

Обоснование применения технологии блокчейн для разработки цифровых двойников изделий в машиностроении

В связи с тем, что цифровой двойник затрагивает все стадии ЖЦ изделия, в его создании участвуют междисциплинарные группы и взаимодействие между такими командами, а также рабочими процессами и прогрессом должно контролироваться надлежащим образом. Каждое совместное действие, которое происходит между различными поставщиками, инженерами и менеджерами, должно быть задокументировано таким образом, чтобы обеспечить прозрачный мониторинг истории, отслеживаемость, конфиденциальность, доверие и безопасность. Это может быть достигнуто с помощью использования технологии блокчейн [8]. Блокчейн также обеспечивает отслеживание данных о происхождении и предоставляет возможность для достижения других важных свойств, таких как подотчетность, целостность и неизменность данных, что делает его идеальным решением для мониторинга процесса создания цифрового двойника. Блокчейн позволяет обмениваться событиями и уведомлениями, которые постоянно хранятся в подтвержде-

денной и защищенной от взлома бухгалтерской книге. В целом интеграция цифрового двойника с блокчейном обеспечивает безопасное, эффективное, децентрализованное и надежное создание виртуальных моделей.

Блокчейн позволит получить ряд преимуществ, критически важных для машиностроительной отрасли и для цифровых двойников в целом:

- безопасность – конкуренция в машиностроительной отрасли находится на высоком уровне, получение доступа к цифровым двойникам, информации о процессах и самой продукции третьими лицами является критической уязвимостью для предприятий. Внедрение блокчейн позволяет значительным образом повышать безопасность систем, в том числе цифровых двойников;

- достоверность истории изменений – в процессе разработки и использования цифровых двойников принципиально важной является возможность отслеживания изменений с целью быстрого реагирования на возникающие ошибки, а также моделирования и тестирования альтернативных сценариев. Использование блокчейн позволит иметь достоверную историю внесенных изменений, что обеспечит возможность оперативно находить причину возникших неполадок и их источник, что в результате значительно повысит надежность системы;

- надежность хранения данных – децентрализация хранения информации с помощью блокчейн позволит обеспечить устойчивость цифровых двойников к отказам, предоставляя возможность системе бесперебойно функционировать даже в случае отказа каких-либо ее частей;

- масштабируемость решения – внедрение технологии блокчейн позволит безболезненно увеличивать количество потребителей данных от цифровых двойников, повышая качество процессов разработки и проектирования продукции. За счет безопасности и достоверности эти данные могут быть использованы в качестве истины при принятии тех или иных проектных решений.

Зарубежный опыт доказывает перспективность развития технологии цифровых двойников с использованием блокчейн и их внедрения в производственные процессы. Так, General Electric начали процесс внедрения еще в 2016 г., а к 2018 г. количество используемых цифровых двойников достигло 1,2 млн экз. Крупнейшие автомобильные гиганты, такие как Ford, BMW и General Motors, объявили о создании в сотрудничестве с IBM консорциума, задачей которого будет исследование применения блокчейн с целью создания развития отрасли. Кон-

церн Daimler внедрил блокчейн в свои системы управления поставками. Renault в сотрудничестве с Microsoft создали цифровые двойники своих автомобилей с использованием блокчейн. В России также начинается процесс активного исследования данных технологий. Так, КамАЗ в сотрудничестве с Siemens начал процесс цифровизации и подготовки к развитию технологии цифровых двойников, а РЖД использует цифровые двойники с целью сбора и анализа данных в рамках обслуживания поездов «Ласточка».

Проведенный анализ доказывает актуальность рассматриваемой темы и позволяет сформулировать цель данной статьи: формирование подхода к разработке цифрового двойника на основе блокчейна для повышения достоверности и отслеживаемости данных, а также повышения качества и эффективности УЖЦ на всех стадиях.

Организационные и технические решения по разработке блокчейн-структуры цифрового двойника изделия в машиностроении

Процесс создания цифрового двойника обычно включает в себя четыре этапа, а именно, этап проектирования, этап производства, тестирования и предоставления для использования. Начало каждого этапа зависит от завершения предыдущего. Текущие процессы создания цифровых двойников в основном построены на простых инструментах, поэтому используются централизованные решения, которые уязвимы для одной точки отказа. Авторы [9] анализируют проблемы, которые мешают успешному и безопасному созданию цифрового двойника. Во-первых, совместимость между различными сотрудниками рассматривается как распространенная проблема. Во-вторых, хранение и анализ данных – это трудности, которые необходимо учитывать. В-третьих, обеспечение прозрачности коммуникации между участниками в режиме реального времени является крайне важной задачей, которая должна быть включена в процесс создания цифрового двойника.

Исследование, проведенное в [10], представляет важные характеристики (например, отслеживание происхождения данных, прослеживаемость, прозрачность и защищенные от несанкционированного доступа журналы) блокчейна, которые доказывают его эффективность. Данные характеристики делают блокчейн аналогом высокозащищенной распределенной бухгалтерской книги, используемой на протяжении всего сквозного процесса создания цифрового двойника. Блокчейн является единым слоем, объеди-

няющим все транзакции и взаимодействия заинтересованных сторон в прозрачную и прослеживаемую структуру. Авторы [11] представили концепцию использования цифрового двойника для аддитивного производства в авиационной промышленности, а также предложили теоретическое решение, которое подчеркивает важность блокчейна для защиты данных, связанных с авиационной промышленностью.

Компоненты предлагаемого решения представлены на рисунке. Участники цифрового двойника, то есть менеджеры процессов, менеджеры фаз и владельцы, взаимодействуют со смарт-контрактом через интерфейс с использованием прикладных программных интерфейсов (API). Внешнее децентрализованное приложение может использовать любой из интерфейсов, таких как RestHTTP, Web3 или JSON RPC, для подключения заинтересованных сторон к смарт-контракту или серверам IPFS, как показано на рисунке. Взаимодействие со смарт-контрактом обеспечивают безопасные ресурсы в сети, будучи отслеживаемыми и защищенными от подделки.

Участники процесса уполномочены вызывать определенные функции в зависимости от состояния цифрового двойника. Они могут получать доступ к ресурсам, находящимся в цепочке, таким как данные о происхождении и сведения о цифровом двойнике, для отслеживания его состояния, истории и информации журналов.

Для децентрализованного хранения необходимых деталей цифрового двойника

и форм соглашений используется IPFS-хранилище (от англ. InterPlanetary File System – межпланетная файловая система), обеспечивающее целостность данных с помощью хэша, который уникальным образом генерируется для каждого файла. Вся информация и данные процесса создания цифрового двойника хранятся в IPFS, а их уникальный хэш хранится в смарт-контракте. Если кто-либо попытается изменить информацию на серверах IPFS, вновь созданный хэш файла не будет соответствовать хэшу, сохраненному в смарт-контракте. Следовательно, хранение данных в IPFS обеспечивает надежное хранение данных.

Концепция смарт-контракта Ethereum вводится для управления процессом создания цифрового двойника. Смарт-контрактом обеспечивается отслеживание логистики и управление историей транзакций [8]. Смарт-контракт также использует хэш, который хранит доступ к информации цифрового двойника на серверах IPFS. Поскольку все этапы создания процесса отслеживаются с их помощью, создается большое количество журналов транзакций. Хранение такой информации в цепочке создает важный ресурс для обнаружения и отслеживания, а также повышает ответственность за свои действия всех заинтересованных сторон. Ресурсы сети также обрабатывают определенные типы информации цифрового двойника, такие как метка времени, владелец, зарегистрированные владельцы, состояние, хэш IPFS и сертификаты.

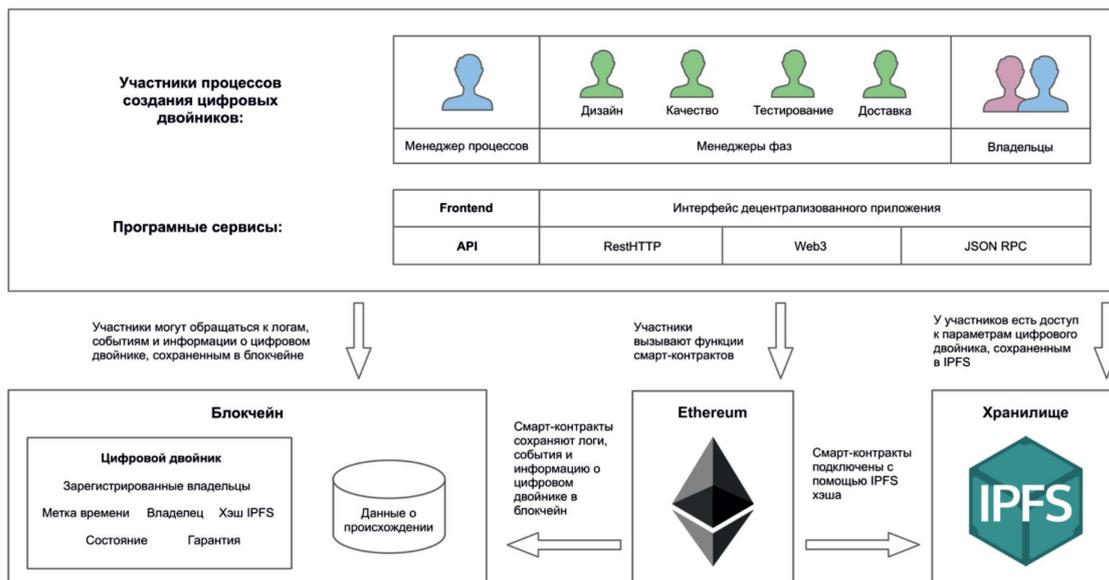


Схема реализации процессов создания цифровых двойников

Первым этапом создания цифрового двойника является сбор требований и их анализ, определение основных данных и формирование сценариев их использования, а также изучение передового опыта.

Вторым этапом является проектирование: используя средства автоматизированного проектирования (CAD), инженеры-проектировщики применяют методы моделирования и анализируют цифровые данные. Цель состоит в том, чтобы захватить цели абстрактной модели и преобразовать ее в виртуальную копию реального продукта.

Следующим этапом является сборка: виртуальный дизайн превращается в реальную модель с использованием сенсорных данных. Это критический этап, когда модель постоянно обновляется на основе собранных данных и отправляет обратную связь с аналитической информацией. Важно обеспечить качественную работу модели сборки в реальной среде, будь то в отрасли цепочки поставок или в любых других крайне сложных условиях, связанных с данными.

После сборки модели цифрового двойника необходимо тестирование. Когда модель построена успешно, она тестируется с использованием тестового стенда, чтобы исключить любые логические или возможные конструктивные дефекты в модели цифрового двойника. Валидация и соответствие стандартам сертификации являются обязательными шагами для соблюдения стандартов обеспечения качества и контроля.

Финальным этапом разработки цифрового двойника является предоставление для использования: после успешного тестирования и проверки модель цифрового двойника готова к развертыванию. Потенциальные владельцы могут зарегистрироваться, и права собственности передаются им текущим владельцем цифрового двойника. В этом предлагаемом дизайне все владельцы доступны в блокчейне.

Следует рассмотреть роли участников процессов и некоторые особенности реализации цифровых двойников. Менеджер процесса отвечает за инициирование процесса создания цифрового двойника. Следовательно, менеджер процесса является владельцем смарт-контракта. Процесс начинается после запуска события, которое уведомляет всех других менеджеров (участующих субъектов). Это событие запускает поток вызовов функций, который начинается с менеджера проекта и заканчивается менеджером по предоставлению. Все эти вызовы регистрируются, и все транзакции могут быть отслежены при необходимости.

Каждый вызов функции создает событие, и каждая фаза имеет начало и конец.

Модификаторы используются для ограничения доступа тех, кто может выполнять вызовы функций. Это делается с использованием адресов Ethereum участвующих сторон, поэтому только авторизованные адреса Ethereum могут выполнять вызовы функций. Если по какой-либо причине неавторизованный объект пытается выполнить функцию, состояние контракта возвращается в исходное состояние.

Каждый из выделенных выше этапов имеет две основные функции. Один отвечает за начало нового этапа, а другой – за утверждение его результатов. Цифровой двойник может быть изменен в этапе между этими двумя вызовами функций по мере необходимости. Изменения между двумя вызовами функций не фиксируются в цепочке. Однако, если определенный вариант использования требует регистрации изменений во время начатого этапа, можно добавить новую функцию. Текущая реализация является общей и может быть изменена в зависимости от требований и вариантов использования. Состояние цифрового двойника постоянно меняется по мере продвижения этапов и при вызове функций. Как только все необходимые этапы закончены, менеджер этапа выполняет последний вызов функции, который изменит состояние цифрового двойника и завершит текущий этап. Состояния и роли используются для обеспечения правильного потока вызовов функций, который определяет последовательность процессов.

Когда цифровой двойник готов к развертыванию, менеджер передачи в эксплуатацию освобождает ресурс для развертывания, и новый владелец регистрируется менеджером доставки. Затем менеджер процесса, которому в настоящее время принадлежит цифровой двойник, передает права собственности новому зарегистрированному владельцу. Позже зарегистрированный владелец может объявить, что цифровой двойник доступен для выпуска новому владельцу. Все Ethereum адреса владельцев цифрового двойника могут быть обнаружены и отслежены с использованием событий, доступных в журналах. Однако подробная информация о модели цифрового двойника и данных хранится децентрализованно с использованием серверов IPFS [12], поскольку хранение в блокчейне является очень затратным. Кроме того, все участвующие организации соглашаются выполнять свои функции в соответствии с условиями, положениями и правилами компании. Эта форма соглашения также сохраняется на сервере IPFS.

Заключение

Цифровой двойник призван уменьшить количество ошибок, допущенных при проектировании и эксплуатации машин, что позволит снизить издержки и повысить качество продукции, а также сократить время на диагностику и создать механизмы предиктивного обслуживания на основе моделирования поведения реального объекта. Распространение использования блокчейн в качестве механизма сквозного проектирования и хранения информации позволит увеличить стабильность и достоверность данных на всех этапах производства и обслуживания, что позволит снизить время, затрачиваемое на оптимизацию процессов производства и ремонта техники [13]. В результате предложенный подход позволит добиться повышения достоверности и отслеживаемости данных [14, 15], а также повышения качества и эффективности УЖЦ на всех стадиях. Развитие разработанного подхода и применение его в максимально доступном количестве этапов разработки и этапах ЖЦ продукции позволит получить конкурентные преимущества компаниям машиностроительной отрасли.

Список литературы

1. Дроговоз П.А. Концептуальное проектирование системы стратегического управления процессами военно-гражданской интеграции в высокотехнологичных отраслях машиностроения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № S4. С. 5–19.
2. Mohammadi N., Taylor J. E. Smart city digital twins. Proc. IEEE Symp. Ser. Comput. Intell. (SSCI). 2017. P. 1–5.
3. Дроговоз П.А., Пасхина О.М. Национальные инновационные системы в машиностроении: зарубежный опыт // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № S4. С. 45–59.
4. Сапрыкина А.К., Дадонов В.А. Анализ факторов повышения конкурентоспособности России на международном рынке // Гуманитарный вестник МГТУ им. Н.Э. Ба-

умана. 2016. № 7. [Электронный ресурс]. URL: <http://hmbul.ru/catalog/ecoleg/econom/375.html> (дата обращения: 13.10.2020).

5. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. Mechatronic Futures – Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers / Hehenberger P., Bradley D. Springer, Int. Pub. Switzerland. 2016. P. 59–74.

6. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy & Utilities, Oil & Gas), and Geography – Global Forecast to 2025. [Electronic resource]. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (date of access: 13.10.2020).

7. ISO/TC 184/SC 4. Industrial data. [Electronic resource]. URL: <https://www.iso.org/committee/54158.html> (date of access: 21.10.2020).

8. Дроговоз П.А., Кошкин М.В. Проекты внедрения технологий блокчейн и интернета вещей в трансграничных цепочках поставок // Управление научно-техническими проектами: сб. материалов III междунар. науч.-техн. конференции. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 153–156.

9. Datta S.P.A. Emergence of digital twins. [Electronic resource]. URL: <https://arxiv.org/abs/1610.06467> (date of access: 12.10.2020).

10. Kim H.M., Laskowski M. Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance. Intell. Syst. Accounting, Finance Manage. 2018. Vol. 25. No. 1. P. 18–27.

11. Mandolla C., Petruzzelli A.M., Percoco G., Urbinati A. Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry. Comput. Ind. 2019. Vol. 109. P. 134–152.

12. IPFS is the Distributed Web. [Electronic resource]. URL: <https://ipfs.io/> (date of access: 08.10.2020).

13. Попович Л.Г., Дроговоз П.А., Калачанов В.Г. Управление инновационно-инвестиционной деятельностью предприятия оборонно-промышленного комплекса в условиях диверсификации: монография. М.: Ваш формат, 2018. 228 с.

14. Дроговоз П.А., Садовская Т.Г., Шиболденков В.А., Попович А.Л. Разработка нейросетевых инструментов интеллектуального анализа экономических показателей // Аудит и финансовый анализ. 2015. № 3. С. 431–440.

15. Дроговоз П.А., Кашеварова Н.А. Ноу-хау как альтернативный инструмент защиты интеллектуальной собственности в условиях патентных войн // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 3 (27). [Электронный ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/articles/1213/1213.pdf> (дата обращения: 10.10.2020).