

УДК 658.51

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВНЕДРЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ АГРЕГИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА МАШИН АРКТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Гарина И.О.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, e-mail: ir.garina@gmail.com*

В работе рассмотрена цифровая трансформация процессов жизненного цикла техники военного и специального назначения посредством внедрения цифровых двойников. Проанализированы особенности процессов жизненного цикла, специфика условий эксплуатации, ремонта и обслуживания машин арктического назначения. Обозначены проблемы производства и эксплуатации машин арктического назначения, для решения которых требуется модернизация процессов производства машин арктического назначения. Определена необходимость развития команд, инструментов и производственных процессов для цифровой трансформации процессов управления жизненным циклом. Проанализированы преимущества, получаемые от внедрения агрегированных цифровых двойников. Рассмотрены перспективы и подходы к внедрению цифровых двойников с использованием блокчейн-онтологии и смарт-контрактов в проектирование, производство и управление жизненным циклом техники военного и специального назначения, используемой в арктическом регионе. Разработан методический подход к внедрению технологий агрегированных цифровых двойников в процессы производства машин арктического назначения. Приведена схема взаимодействия инструментов внутри системы управления жизненным циклом. Разработана последовательность внедрения инструментов блокчейн-онтологии, смарт-контрактов, цифрового двойника агрегатов в машиностроительное производство. Рассмотрены этапы внедрения инструментов в производственные процессы. Приведены перспективы комплексного использования предложенных инструментов в рамках модернизации процессов управления жизненным циклом машин арктического назначения.

**Ключевые слова:** машиностроение, техника военного и специального назначения цифровой двойник, блокчейн, блокчейн-онтология, цифровая трансформация

## METHODOLOGICAL APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF AGGREGATED DIGITAL TWIN TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION PROCESSES OF MACHINES FOR ARCTIC PURPOSES

Garina I.O.

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

The paper considers the digital transformation of the life cycle processes of military and special-purpose equipment through the introduction of digital twins. The features of the life cycle processes, the specifics of the operating conditions, repair and maintenance of machines for Arctic purposes are given. The problems of production and operation of machines for Arctic purposes are outlined, for the solution of which it is necessary to modernize the production processes of machines for Arctic purposes. The need for the development of teams, tools and production processes for the digital transformation of life cycle management processes is determined. The advantages obtained from the implementation of aggregated digital twins are analyzed. Prospects and approaches to the implementation of digital twins using blockchain ontology and smart contracts in the design, production and lifecycle management of military and special-purpose equipment used in the Arctic region are considered. A methodological approach to the implementation of aggregated digital twins technologies in the production processes of machines for Arctic purposes has been developed. The scheme of interaction of tools within the life cycle management system is given. A sequence has been developed for the implementation of blockchain ontology tools, smart contracts, and a digital twin of aggregates in mechanical engineering. The stages of introducing tools into production processes are considered. Prospects for the integrated use of the proposed tools within the framework of the modernization of life cycle management processes for Arctic machines are presented.

**Keywords:** mechanical engineering, military and special-purpose machinery, digital twin, blockchain, blockchain ontology, digital transformation

Цифровизация производства – это процесс внедрения современных технологий, обеспечивающих предприятие конкурентными преимуществами с повышением качества продукции, снижением издержек и обеспечением гибкости производства. Актуальным подходом к цифровой трансформации производства является реализация концепции цифровых двойников (digital twins) промышленных изделий и процессов их создания и эксплуатации. При этом различают цифровые прототипы (Digital Twin

Prototype, DTP) на стадии проектирования изделия, цифровые экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) как двойники конкретных физических объектов на стадии эксплуатации и цифровые агрегаты (Digital Twin Aggregate, DTA) как упорядоченные совокупности цифровых двойников изделий и процессов их жизненного цикла (далее – ЖЦ).

Внедрение технологий DTA позволяет значительно улучшить процессы создания и эксплуатации машиностро-

тельной продукции, предназначенной для специфических природно-климатических условий применения, в которых ограничены возможности оперативного ремонта и содержания запасов составных частей и комплектующих. Особую актуальность рассматриваемые вопросы приобретают в контексте активного освоения арктических территорий.

*Специфика процессов жизненного цикла машин арктического назначения*

Понятие ЖЦ используется для комплексного управления изделием во время всего периода его существования – от появления потребности и первых требований до вывода из эксплуатации, замены и утилизации. Согласно ГОСТ Р 56136-2014, ЖЦ изделия – это совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [1]. ЖЦ изделий состоит из стадий, выделяемых по признакам работ на этих стадиях, и их результатов. Стадии ЖЦ, в свою очередь, делятся на этапы, выделяемые по признакам контроля характеристик проектных решений типовой конструкции и (или) физических характеристик экземпляров изделий.

К этапам ЖЦ относятся: формирование требований и обоснование разработки, разработка технического задания, проведение опытно-конструкторских работ, производство, испытания, эксплуатация, модернизация, обслуживание, утилизация. Более детально схему полного ЖЦ изделий отражает рис. 1.

Согласно рис. 1, на первом этапе ЖЦ проводятся научно-исследовательские работы, которые по своей сути могут быть фундаментальными, поисковыми или прикладными. Результатом этого этапа являются прошедшие проверку идеи, представленные открытиями или изобретениями. На втором этапе происходит формирование технического задания на основе данных, полученных после первого этапа, и с учетом требований заказчика. После того как техническое задание сформировано, начинается этап проектно-конструкторских работ, в рамках которого разрабатываются проектная документация и опытные образцы. На этапе технологической подготовки и освоения производства создаются маршрутная и подетальная технологии, необходимая специальная оснастка и оборудование. Так полностью заканчивается

процесс проектирования и начинается этап производства. Для ряда изделий выделяют шестой этап – реализацию, хранение, транспортировку, монтаж и отладку полученного изделия. Завершается ЖЦ этапами эксплуатации и утилизации изделия.

В последние годы Российская Федерация наращивает свое присутствие в Арктике. Данный регион считается перспективным из-за обилия полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа, и стратегически важным из-за проходящего там Северного морского пути и необходимости оборонять северные рубежи России [2]. Машинная техника военного и специального назначения (далее – МТВСН), используемая в данном регионе, должна быть сконструирована с учетом его особенностей, таких как:

- слабонесущие грунты;
- большое количество снега зимой и увеличение водных ресурсов летом;
- невозможность быстрого восстановления окружающей среды;
- наличие крепких мерзлотных пород.

Особенности условий эксплуатации накладывают ограничения на применение существующих технологий управления жизненным циклом (далее – УЖЦ) МТВСН. Труднодоступность региона также ограничивает обслуживание техники, из-за чего значительно возрастают затраты на ремонт и обслуживание. Хранение запасных частей является дорогостоящим, так как требует обслуживания складов при низких температурах, что приводит к необходимости минимизировать время их складирования. Для решения этой проблемы нужно реализовывать концепцию zero inventory, т.е. не хранить запасные части, которые не требуются в данный момент времени. Кроме того, необходимо максимально роботизировать складские помещения, так как количество обслуживающего персонала ограничено, и автоматизировать поставки.

Внедрение цифровых двойников может помочь решить проблемы ремонта и обслуживания техники благодаря использованию предиктивного обслуживания, что позволит реализовать концепцию zero inventory, а также улучшить качество машин, обеспечивая этапы проектирования и производства достоверными данными. Следует отметить, что их использование существенно изменит все процессы производства, а также окажет влияние на процессы УЖЦ [3]. Существующие подходы к проектированию, производству и эксплуатации техники не могут поддержать эти изменения [4].

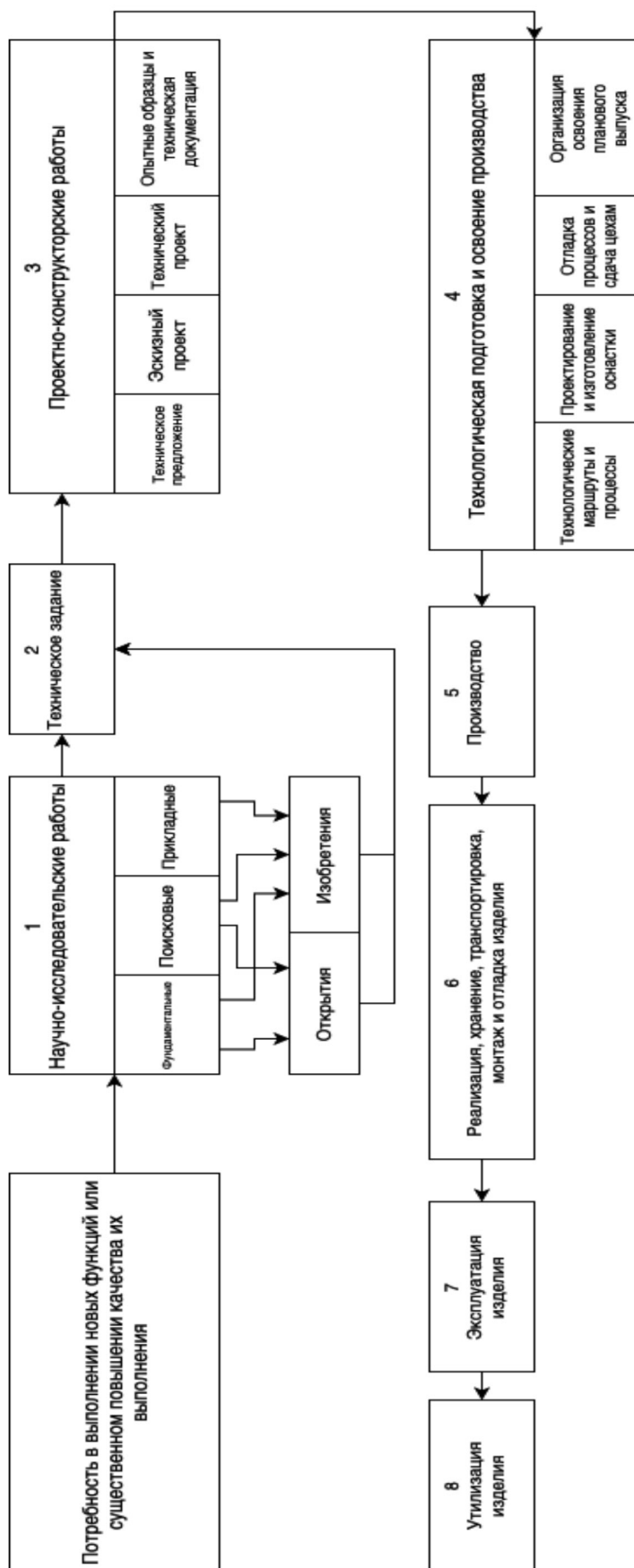


Рис. 1. Схема полного ЖЦ изделия

*Отличительные особенности и ключевые  
технологические элементы  
агрегированных цифровых двойников*

Цифровые двойники могут являться цифровым представлением как отдельной сущности, например машины, так и моделировать целые технологические процессы. Цифровые двойники позволяют решать проблемы проектирования и производства, обеспечивая инженеров достоверными данными в реальном времени, тем самым позволяя повышать качество разрабатываемой и производимой продукции. Кроме того, их использование делает возможным внедрение механизмов предиктивного обслуживания [5–7]. В свою очередь, цифровые двойники, используемые для моделирования процессов производства, могут качественно улучшать процессы УЖЦ. Их использование в совокупности с блокчейн-онтологией и смарт-контрактами окажет существенное влияние на УЖЦ изделий [8].

Рассматривая процесс проектирования, необходимо отметить, что на данный момент разрывы между стадиями приводят к распределению ролей команд внутри процесса [9]. Команды проектирования отвечают за свою часть работы и имеют слабую связь как с другими командами, так и с последующими этапами производства и эксплуатации. Внедрение цифровых двойников и блокчейн-онтологий потребует не только развития этих команд, повышения компетенций в технической части работы, но и способностей анализа использования продукта, а также понимания специфики производства. Развитие технических средств проектирования обусловит ужесточение спецификаций, повышение квалификации сотрудников и увеличение их вовлеченности в разрабатываемый продукт. Увеличение количества технической документации и развитие средств УЖЦ изделия потребуют увеличения мощностей, доступных инженерам, а также повышения устойчивости всех систем. Кроме того, процесс модернизации техники, который на данный момент основывается на анализе рынка и потребностей пользователей, изменится в сторону анализа продукта на основе данных цифровых двойников и предиктивного усовершенствования машин на основе собранной информации [10].

Графические представления схем процессов модернизации продукта до и после внедрения блокчейн-онтологий, смарт-контрактов и цифровых двойников в нотации BPMN представлены на рис. 2 и 3. До внедрения предлагаемых инструментов процессы модернизации линейные, т.е. ос-

нованы на получении задания от заказчика. С появлением цифровых двойников инженеры могут независимо анализировать данные и предлагать решения, которые позволят повысить качество продукта.

Производственные процессы также должны будут претерпеть изменения. Существующие регламенты потребуют большей стандартизации. Сбор и анализ данных с производства с использованием цифровых двойников повышают требования к качеству продукта и его составляющих. Кроме того, поставщики материалов и комплектующих также будут должны внедрять у себя необходимые технические средства, что приведет к существенному изменению в отношениях с поставщиками [11]. Возрастут требования к компетенции работников в цехах, пропадет возможность основываться на опыте сотрудников, так как вся информация должна будет быть стандартизированной и формализована.

Процессы обслуживания и ремонта техники перейдут от плановой системы к предиктивной. Данные цифровых двойников предоставляют возможность заранее определять износ техники и потребность в замене частей. Это приведет к изменениям в отношениях с потребителем, контракты должны будут заключаться с учетом необходимости вывода техники из эксплуатации не по факту выхода из строя, а при необходимости обслуживания. Кроме того, потребители техники должны будут также интегрировать системы производителя, что увеличит требования к безопасности данных, а также усложнит процесс заключения договоров с учетом пунктов о неразглашении. На рисунке 4 изображена последовательность передачи в обслуживание без и с использованием предлагаемых инструментов в нотации UML.

Этапы процесса внедрения технологий агрегированных цифровых двойников при производстве машин арктического назначения

Рассмотренные инструменты не зависят друг от друга и могут быть внедрены самостоятельно. Точечные меры способны повысить качество отдельно взятых частей производства, будь то оптимизация цепи поставок или внедрение цифрового двойника для повышения надежности продукции. Однако для полноценного шага в сторону модернизации и оптимизации процессов необходимо комплексное внедрение рассмотренных инструментов.

Для комплексного внедрения рассмотренных инструментов требуется явно описать их взаимосвязь, область применения и границы ответственности.

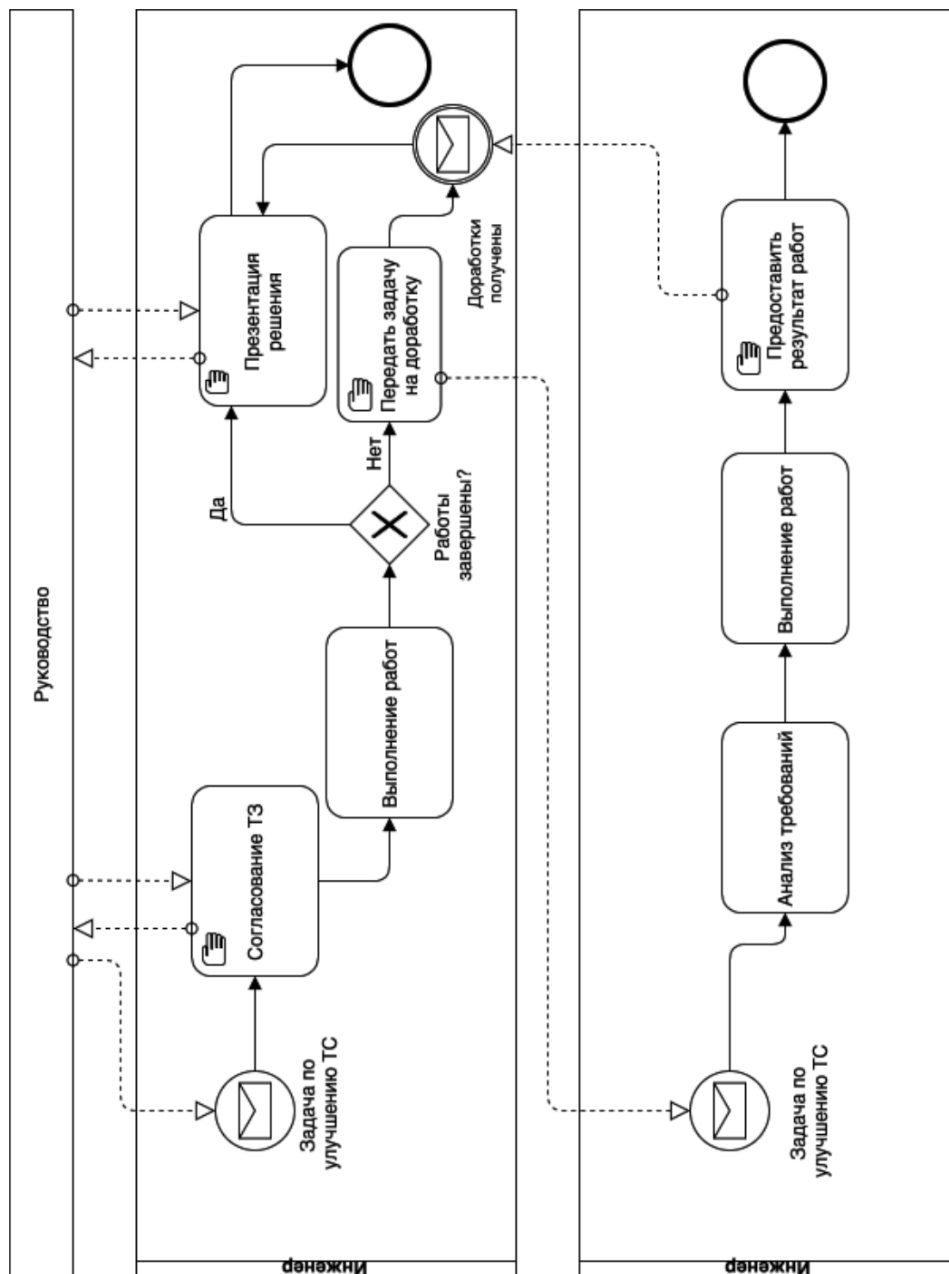


Рис. 2. Упрощенное представление процесса модернизации без использования предлагаемых инструментов в нотации BPMN

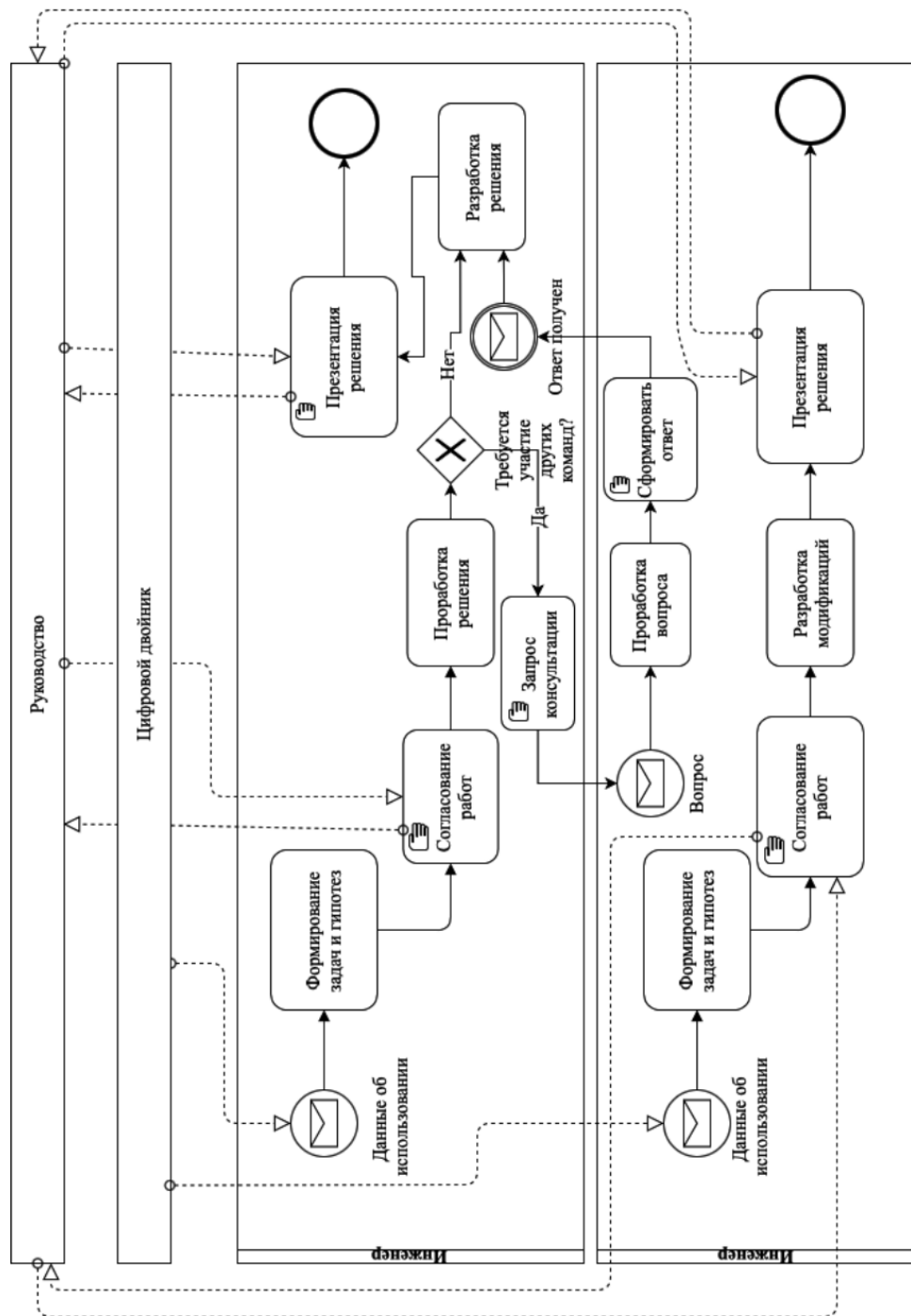


Рис. 3. Упрощенное представление процесса модернизации с использованием предлагаемых инструментов в нотации VRM

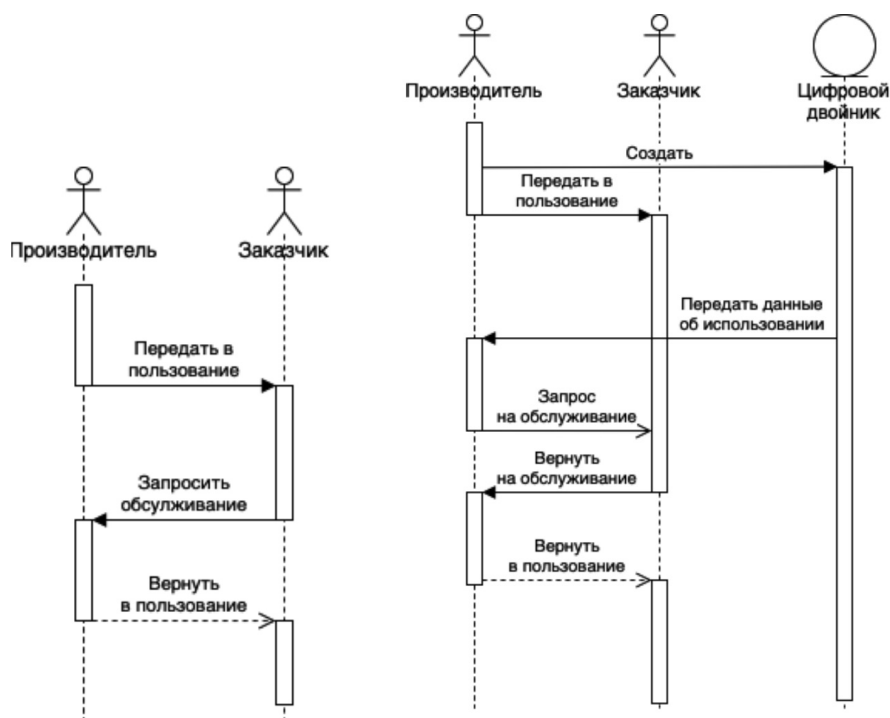


Рис. 4. Различия последовательности передачи на обслуживание в зависимости от использования предлагаемых инструментов в нотации UML

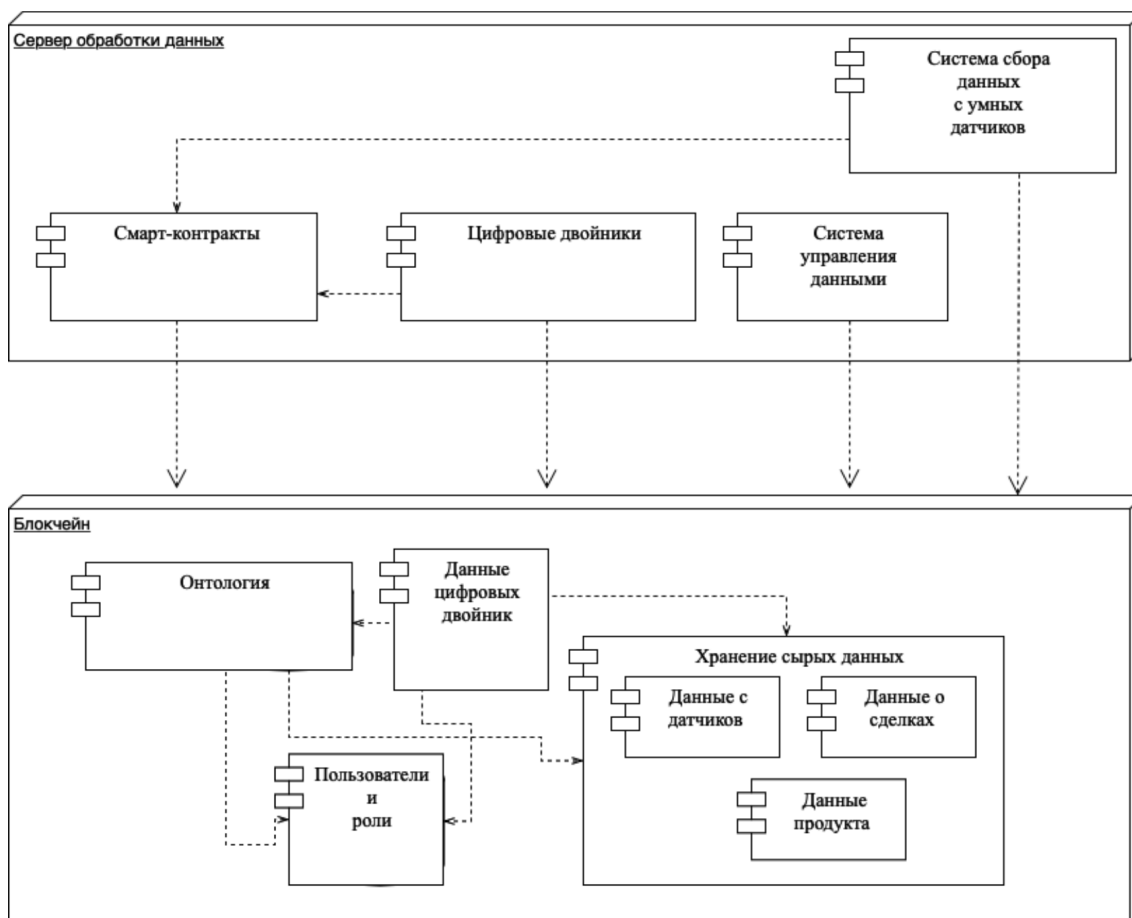


Рис. 5. Диаграмма развертывания в нотации UML разрабатываемой системы

На рис. 5 представлена упрощенная диаграмма развертывания в нотации UML рассматриваемых инструментов в рамках системы УЖЦ. Основой является система хранения данных на основе блокчейна. В нее записываются онтология, а также данные о пользователях и их ролях в системе. Кроме того, в блокчейн записываются сырые данные, полученные от цифровых двойников и в результате выполнения смарт-контрактов. Вся эта информация обрабатывается с помощью системы сбора и анализа данных, включающей в себя систему управления данными, систему сбора данных с умных датчиков, в которой развернуты цифровые двойники и смарт-контракты.

Предлагаемый методический подход к внедрению технологий агрегированных цифровых двойников в процессы производства машин арктического назначения реализуется в виде следующих основных этапов:

- внедрение блокчейн-онтологии (этап 1);
- внедрение смарт-контрактов (этап 2);
- внедрение цифровых двойников (этап 3).

На первом этапе необходимо сфокусироваться на внедрении блокчейн-онтологии, которая станет основой для последующей итерационной модернизации отдельных частей производства. Создание единой блокчейн-онтологии, к которой будут иметь доступ все участники производства – от инженеров до поставщиков, позволит упорядочить работу с данными, гарантировать их достоверность и надежность, позволит избежать утечек и потери информации. Это поможет сократить транзакционные издержки [12], обеспечивая единую систему данных, доступную всем участникам производства и актуализируемую ими. Верификация данных крайне важна при производстве арктических машин. Труднодоступность арктической зоны приводит к невозможности постоянного доступа к технике, находящейся в эксплуатации, что делает трудным оперативный доступ к ней. Достоверные данные могут помочь конструкторам принимать решения, связанные с ремонтом или доработками продукта, без доступа к самому транспорту, что позволит повысить качество обслуживания [13].

На втором этапе требуется улучшение цепи поставок с помощью внедрения смарт-контрактов. Система управления цепью поставок с использованием блокчейн-онтологии и смарт-контрактов является единой точкой входа и выхода для всех данных, связанных с доставкой товаров. Интеграция с блокчейн-онтологией позволяет получать доступ к полной информации обо всех деталях и продуктах, отслеживать полный путь товара и выстраивать прозрачные отноше-

ния со всеми участниками системы. Применение смарт-контрактов способствует уменьшению количества срывов сроков поставок [14], что критически важно при работе в арктическом регионе. Из-за труднодоступности мест дислокации машин даже минимальные задержки могут приводить к колоссальным убыткам. Возможность отслеживать путь товара повысит качество обслуживания и позволит проводить предиктивный анализ оборудования на основании данных о деталях, бывших в эксплуатации ранее.

Третьим этапом должно стать распространение моделей цифровых двойников, что позволит не только оценивать уже произошедшие в системе события, но и эффективно и достоверно моделировать поведение различных узлов с целью оптимизации процессов в будущем. Например, появится возможность заранее анализировать поведение машин в условиях арктического бездорожья. Дорожная сеть РФ в арктической зоне развита очень слабо. На территории 13,9 млн кв. км общая протяженность дорог составляет всего 200 тыс. км, из которых лишь 81 тыс. км – с твердым покрытием. Кроме того, арктическая техника должна минимально вредить грунту при пути по бездорожью. Это обуславливает возникновение специфических требований к подвеске. Предварительное моделирование ее поведения позволит снизить затраты на модернизацию и тестирование. Цифровые двойники увеличат качество получаемого продукта, сократят количество отказов, т.е. не только улучшат процессы внутри производства и экономические показатели, чего позволяли добиваться рассмотренные ранее инструменты, но и повлияют на конечного пользователя, сделав продукт более привлекательным для потребителей. Внедрение цифровых двойников увеличивает требования к безопасности и к производственным мощностям [15].

Использование цифровых двойников в совокупности с блокчейн-онтологией даст возможность обеспечить соответствие системы возросшим требованиям. Блокчейн-онтология позволит обезопасить данные, используемые цифровыми двойниками, обеспечить защиту от потерь и позволит не сомневаться в их достоверности. В случаях возникновения спорных ситуаций данные, хранящиеся в блокчейне, могут становиться вещественными аргументами одной из сторон. Децентрализация цифровых двойников даст возможность более эффективно моделировать процессы и оптимизировать использование вычислительных мощностей. Блокчейн улучшит систему



доступов к цифровым двойникам, что обеспечит возможность предоставлять данные сторонам, не участвующим в производстве, без каких-либо рисков.

### Заключение

Предложенная схема и этапы являются примером подхода к внедрению блокчейн-онтологий, смарт-контрактов и цифровых двойников в машиностроительное производство. Данная схема не ограничивает применение рассмотренных инструментов, однако может быть основой для их последующей интеграции с учетом специфик конкретного производства. Использование данных инструментов требует не только технического развития производства и продукции, но и комплексных процессных изменений УЖЦ в рамках цифровой трансформации. Кроме того, необходимо развивать и компетенции сотрудников, участвующих на каждом из этапов ЖЦ продукции. Комплексное внедрение инструментов позволит модернизировать большинство этапов ЖЦ и непосредственно сам продукт. Использование блокчейн-онтологий и смарт-контрактов даст возможность обеспечить полноту информации для цифровых двойников, так как для их разработки и анализа результатов необходимо обеспечить надежность и достоверность данных. Для МТВСН, эксплуатируемой в арктических условиях, критически важна ее надежность, на которую положительно влияют развитие этапов производства и проектирования благодаря использованию рассмотренных инструментов, и внедрение предиктивного обслуживания. Использование цифровых двойников при проектировании, производстве и эксплуатации МТВСН в арктических условиях обеспечит ее качественное улучшение и существенное снижение затрат. Внедрение цифровых двойников процессов УЖЦ также качественно улучшит выпускаемую продукцию и создаст базу для последующего внедрения моделей машинного обучения.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.

2. Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В., Галымов А.Л. Арктические ресурсы цветных и благородных металлов в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1 (17). С. 38–46.

3. Дрогвоз П.А. Концептуальное проектирование системы стратегического управления процессами военно-гражданской интеграции в высокотехнологичных отраслях машиностроения // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № S4. С. 5–19.

4. Дрогвоз П.А., Пушкарева П.П. Особенности использования метода оценки уровня готовности технологий в наукоемких отраслях: зарубежный и отечественный опыт // Экономика и предпринимательство. 2019. № 5 (106). С. 1066–1070.

5. Boschert S., Rosen R. Digital twin—the simulation aspect. *Mechatronic futures*. Springer, Cham, 2016. P. 59–74.

6. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA. 2012. P. 1818.

7. Соловьев С. Цифровые двойники в промышленности: сегодня и завтра [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iksmedia.ru/articles/5585041-Czifrovoye-dvojniki-v-promyshlennost.html> (дата обращения: 18.08.2021).

8. Kim H.M., Laskowski M. Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*. 2018. Vol. 25. № 1. P. 18–27.

9. Некрасов А.М., Некрасова М.А. Повышение роли профессионального обучения и повышения квалификации без отрыва от работы // Экономика и предпринимательство. 2021. № 4. С. 675–677.

10. Горбачёв А.С., Дрогвоз П.А. Прогнозирование как инструмент опережающего развития технологических компетенций в промышленности // Креативная экономика. 2020. Т. 14. № 12. DOI: 10.18334/ce.14.12.111455.

11. Vashlaev A.D., Kalinina O.A. Specifics of introducing PDM-systems in the space industry enterprises and new possibilities for the personnel evaluation, in XLIV Academic Space Conference, AIP Conference Proceedings 2318, 070014. 2021. DOI: 10.1063/5.0035784.

12. Van Der Maaten L., Postma E., Van den Herik J. Dimensionality reduction: a comparative. *J. Mach Learn Res*. 2009. Vol. 10. № 66–71. P. 13.

13. Гарина И.О. Методический подход к разработке блокчейн-структуры цифрового двойника изделия в машиностроении // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11–1. С. 15–20.

14. Катровский Ю.А., Полуянов М.Г. Создание единого логистического оператора для сектора В2С // Бизнес-образование в экономике знаний. 2018. № 1 (9). С. 42–44.

15. Гарина И.О. Техничко-экономические аспекты разработки и внедрения специализированной онтологии для управления жизненным циклом продукции в машиностроительной отрасли // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10. № 3. DOI: 10.18334/vines.10.3.110602.