

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>

Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании

А.А. Жиздюк¹, В.Н. Буйлов², С.В. Чумакова³, М.Н. Ахилбеков⁴^{1,2,3} Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; г. Саратов, Россия⁴ Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова; г. Шымкент, Казахстан¹ a.sgau@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>² buylov_62@mail.ru³ ch-sv@yandex.ru⁴ Akhilbekov@mail.ru

Аннотация. Цифровой двойник технологической машины может значительно улучшить эффективность эксплуатации и сервисного обслуживания техники в АПК. Теоретическое исследование проведено с целью выявления эффективности применения цифровых двойников технического состояния сельскохозяйственной техники. Рассмотрена возможность внедрения цифровых двойников технологических машин при их эксплуатации и сервисном обслуживании для автоматизации ремонтных инспекций, оцифровки инженерных знаний по обслуживанию и ремонту, минимизации простоев оборудования, контроля качества и безопасности работ. Приведена формула функциональной зависимости эффективности применения цифровых двойников при эксплуатации и обслуживании. Установлено, что обоснованные решения по техническому обслуживанию и ремонту техники могут приниматься только в случае моделирования цифровым двойником различных вариантов полных и частичных отказов, учета режимов эксплуатации, воздействия окружающей среды и степени износа деталей. Поэтому мы предложили установить на технику RFID-метки и терминалы мониторинга, базирующиеся на GPS, ISOBUS и современном программном обеспечении, которые в режиме реального времени анализируют информацию о соответствии показателей выполняемого процесса заданным параметрам и подают команды и управляющие воздействия оператору машины для коррекции работы трактора, рабочих органов орудий, агрегата. Исследования показали эффективность применения цифровых двойников технического состояния сельскохозяйственной техники, обусловленную снижением расходов на техническое обслуживание, устранение отказов, незапланированный простой и повышение производительности.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровой двойник технологической машины, сервисное обслуживание, ремонт, эффективность, RFID-метки

Для цитирования: Жиздюк А.А., Буйлов В.Н., Чумакова С.В., Ахилбеков М.Н. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 20-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>

ORIGINAL ARTICLE

Application of digital twins of technological farm machines during their operation and maintenance

A.A. Zhizdyuk¹, V.N. Builov², S.V. Chumakova³, M.N. Akhilbekov⁴^{1,2,3} Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; Saratov, Russia⁴ South Kazakhstan University named after M. Auezov; Shymkent, Kazakhstan¹ a.sgau@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>² buylov_62@mail.ru³ ch-sv@yandex.ru⁴ Akhilbekov@mail.ru

Abstract. The digital twin of a technological machine can significantly improve the efficiency of operation and service of farm machinery. The authors carried out theoretical studies to identify the effectiveness of using digital twins in terms of the technical condition of agricultural machinery. The article considers a possibility of using digital twins of technological machines during their operation and maintenance to automate repair inspections,

digitize engineering information on maintenance and repair, minimize equipment downtime, and ensure quality control and the safety of operation. The authors present a functional dependency formula of the efficiency of using digital twins in operation and maintenance. It is established that reasonable decisions on maintenance and repair of equipment can be made only in case of digital twin modeling of various full and partial failures, taking into account operation modes, environmental impact and the wear intensity of parts. Therefore, the authors proposed to install RFID tags and monitoring terminals based on GPS, ISOBUS and modern software. They can analyze in real time information on the compliance of the process indicators to the specified parameters, and give instructions and control actions to the machine operator to correct the operation of tractors, working tools of implements, and units. Studies have shown the effectiveness of using digital twins of agricultural machinery as they can reduce costs for maintenance, elimination of failures, and unplanned downtime, as well as increase productivity.

Keywords: digital twin, digital twins of farm machines, maintenance, repair, efficiency, RFID tags

For citation: Zhizdyuk A.A., Builov V.N., Chumakova S.V., Akhilbekov M.N. Application of digital twins of technological farm machines during their operation and maintenance. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):20-25 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>

Введение

Проект «Цифровое сельское хозяйство» (О создании национальной платформы «Цифровое сельское хозяйство»: приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 25 февраля 2020 г. № 84) разработан с целью развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

Внедрение в сельское хозяйство нововведений и IT-стартапов позволяет получать максимальную высокую урожайность и обеспечивает финансовую выгоду от инвестиций. За последние два десятилетия Россия вошла в число стран, предлагающих наибольшее количество инноваций с максимальной эффективностью [1]. Среди них – цифровые двойники.

Многие составляющие цифровых двойников уже активно используются на практике. Их интеграция в единую систему обеспечивает новый уровень продуктивности производства и дополнительную прибыль за счет применения цифровых технологий, создания сетевого взаимодействия поставщиков и партнеров, а также внедрения инновационных моделей бизнеса [2]. Цифровые модели позволяют изучать физические объекты и процессы в виртуальной среде, часто – с использованием виртуальной, дополненной и смешанной реальности. Цифровой двойник технологической машины в АПК может значительно улучшить эффективность и безопасность эксплуатации и сервисного обслуживания [3].

Цель исследований: рассмотреть роль и актуальность внедрения цифровых двойников технологических машин в АПК при их эксплуатации и сервисном обслуживании для автоматизации ремонтных инспекций, оцифровки инженерных знаний по обслуживанию и ремонту, минимизации простоев оборудования, контроля качества и безопасности работ.

Материалы и методы

Эффективность применения технологии цифровых двойников технического состояния сельскохозяйственной техники рассматривалась на основе анализа материалов о цифровых решениях в АПК.

Основные принципы применения цифровых двойников на предприятиях и в организациях изложены в ГОСТ Р 57700.22.

Результаты и их обсуждение

Четвертая индустриальная революция базируется на четырех категориях новейших технологических систем (нано-, био-, информационные, аддитивные и когнитивные технологии), взаимодействие которых приводит к возникновению новых технологий, одной из которых является цифровой двойник (ЦД) (Digital Twin). Существуют различные определения цифрового двойника. Самое общее определение дано А.А. Жиздюк¹: «Цифровой двойник технического состояния техники – это реальное отражение всех параметров эксплуатации машин и оборудования с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними» (рис.).

Предприятия и организации, используя систему управления сервисным предприятием за счет внедрения цифрового двойника, могут повысить конкурентоспособность выпускаемых изделий и ускорить их выход на рынок [4].

Применение цифровых двойников способствует увеличению энергоэффективности и снижению ресурсозатрат. Цифровые двойники могут

¹Жиздюк А.А., Журавлева Л.А., Карпов М.В. Конструирование и расчет наземных транспортно-технологических машин: Учебное пособие. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2024. 288 с. DOI: 10.12737/1977999. EDN: KGFEEC.



Рис. Модель цифрового двойника технического состояния

Fig. Model of a digital twin of the technical condition

анализировать данные, полученные от установленных на машине датчиков, и предсказывать возможные поломки или сбои, предотвращая неожиданные остановки и снижая время простоя [5], могут предлагать оптимальные графики сервисного обслуживания для снижения затрат на обслуживание и увеличение срока службы машины. Они способны также анализировать большие объемы данных в режиме реального времени и сообщать о потенциальных угрозах оператору, предотвращая несчастные случаи и травмы. Цифровой двойник на основе полученной от датчиков информации может предложить оптимальные настройки для оборудования с целью обеспечения высокого качества выпускаемых изделий, повышения производительности и сокращения потребления ресурсов. Цифровые двойники могут использоваться для удаленного управления машиной, если оператор находится на большом расстоянии от машины или не имеет возможности физически управлять ею [6].

Технологический трансфер является важным и неотъемлемым компонентом инновационного процесса. Государственные лаборатории, научно-исследовательские институты, университеты стремятся к практическому использованию своих исследований. Трансфер способствует налаживанию связей между различными научно-техническими организациями, что позволяет контролировать технологические процессы, снижать себестоимость продукции и т.д.

Для оптимизации процесса контроля за основными параметрами технологического процесса

разработан графический инструмент визуализации Дашборд (англ. *Dashboard* – «панель управления»), который подтягивает информацию из баз данных, таблиц, сервисов аналитики, социальных сетей, структурирует ее и представляет в виде графиков, диаграмм или схем оператору, находящемуся на предприятии. Данный инструмент не подходит, так как в сельском хозяйстве инженер находится в «поле». В данном случае целесообразно применить инструмент «Панель управления» и программу «История поля» (Геомир), в которую мы добавили контроль за сельскохозяйственной техникой, используя системы датчиков и RFID-метки. Контроль технического состояния осуществляется дистанционно с помощью компьютера, планшета или телефона с применением установленного программного обеспечения [3, 7].

Актуальность внедрения цифровых двойников в систему дистанционного мониторинга и контроля сельскохозяйственных угодий и техники можно описать функциональной зависимостью:

$$E^* = E^*(C, \chi), \quad (1)$$

где E^* – эффективность, %; χ – обобщенная характеристика эффективности изделия; C – коэффициент, показывающий наличие цифрового двойника для исследуемого изделия.

Зависимость (1) позволяет определить критические зоны и оптимальное количество датчиков, необходимых для сбора данных, которые будут использоваться для последующей технической эксплуатации и модернизации изделия.

Обобщенная характеристика равна совокупности ее составляющих:

$$\chi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \chi_{ij}, \quad (2)$$

где χ_{ij} – одна из характеристик изделия на всех стадиях жизненного цикла изделия; i – номер характеристики, $i = \overline{1; n}$; j – номер стадии жизненного цикла изделия, $j = \overline{1; m}$.

Коэффициент C определен следующими условиями:

$$C = \begin{cases} 0, & \text{при отсутствии цифрового двойника для } \chi_{ij} \\ k \neq 0, & \text{при существовании цифрового двойника для } \chi_{ij}, \end{cases} \quad (3)$$

где k – коэффициент, являющийся количественной характеристикой, соответствующей числу стадии жизненного цикла изделия, имеющего числовое двойника.

С учетом (1), (2) и (3) выведен коэффициент эффективности ввода цифрового двойника на той или иной стадиях жизненного цикла изделия $m_{c\chi}$:

$$m_{c\chi} = \frac{C}{\chi}. \quad (4)$$

При использовании коэффициента эффективности получена формула (5), позволяющая связать эффективность жизненного цикла изделия с применением цифровых двойников:

$$E_c^* = m_{c\chi} E^*. \quad (5)$$

Анализ данных [8], рассчитанных с помощью формул, показал эффективность снижения расходов на техническое обслуживание на 25%, устранение отказов на 70%, незапланированный простой на 35% и повышение производительности на 20%.

Формулы (1-5) позволяют подтвердить необходимость применения цифровых двойников технического состояния техники и обоснованность применения тех или иных параметров технического состояния машин и оборудования с помощью системного подхода инжиниринга с использованием предиктивной (предсказательной) аналитики полных и частичных отказов техники. Формулы помогут в создании автоматических рекомендаций применения целевых технических параметров для прогнозирования определенных состояний техники в предиктивных моделях.

Внедрение технологии цифрового двойника технического состояния техники на этапе эксплуатации машин и оборудования позволяет дистанционно осуществлять диагностику и прогнозирование неисправностей, повысить эффективность работы техники, проводить перекалибровку, выявить новые потребности клиента. Эта многофизичная точная модель позволяет учитывать и оптимизировать

взаимодействие всех элементов с учетом режимов работы и воздействий окружающей среды. Программное обеспечение с информационным интерфейсом технического состояния машин и оборудования позволит планировать применение техники в зависимости от ее функциональных характеристик и технического состояния и принимать обоснованные решения относительно ее технического обслуживания и ремонта. В качестве характеристик рекомендуется использовать экологические показатели (дымность, выбросы вредных веществ), удельный расход топлива, давление и расход масла, температуру системы охлаждения и др.

Сельскохозяйственная техника функционирует в сложных эксплуатационных и климатических условиях, что может привести к сбоям в ее работе или неполному выполнению задач [6]. Нельзя исключать и человеческий фактор, который может повлиять на точность выполнения запланированных операций. Даже небольшие отклонения от установленных норм и задержки в период посевных работ могут привести к дополнительным финансовым убыткам и потере урожая. Контроль сельскохозяйственной техники, осуществляемый с помощью установленных на ней системы датчиков, RFID-меток и терминалов мониторинга, может предотвратить перечисленные проблемы. Терминалы, базирующиеся на GPS, ISOBUS и современном программном обеспечении, в режиме реального времени анализируют информацию о соответствии показателей выполняемого процесса заданным параметрам и подают команды и управляющие воздействия оператору машины для коррекции работы трактора, рабочих органов орудий, агрегата.

Указанная технология позволит комбинировать и координировать работу машинно-тракторных агрегатов, автоматизировать настройку машин и орудий на различные технологические операции, осуществлять обмен данными между системами, находящимися в полевых условиях, и офисным компьютером сельхозпредприятия, между электронными системами различных производителей. Технология предоставляет возможность автоматического управления некоторыми функциями и компонентами трактора, оптимизации маршрутов транспорта и работы технических служб.

Из вышеизложенного следует, что применение платформ цифровых двойников технического обслуживания, ремонта и эксплуатации техники является обоснованным и необходимым. Цифровой двойник технологических машин в АПК должен обеспечивать проведение ряда операций: планирование технического обслуживания и ремонта; мониторинг

эксплуатационных характеристик; управление и моделирование ситуаций; визуализацию физических данных, получаемых через средства коммуникации; анализ экономических показателей энергоэффективности и ресурсозатрат при эксплуатации техники; получение данных по остаточным моторесурсам систем, оптимизации, последствиям работы техники в виртуальном режиме; сервисное обслуживание.

Выводы

Цифровой двойник технического обслуживания, ремонта и эксплуатации техники является инструментом, позволяющим моделировать различные варианты полных и частичных отказов, работу

устройств с учетом режимов их работы, воздействий окружающей среды и разной степени износа деталей, принимать обоснованные решения о техническом обслуживании и ремонте техники. В зависимости от технического состояния машин и оборудования цифровой двойник автоматизирует эти процессы с помощью компьютерных технологий.

Обусловлена необходимость применения цифровых двойников технического состояния техники, показана обоснованность применения параметров технического состояния машин и оборудования с помощью системного подхода инжиниринга с использованием предиктивной аналитики полных и частичных отказов техники.

Список источников

1. Абрамов В.А., Жиздюк А.А., Хитрова Н.В. Разработка рекомендаций по повышению энергообеспеченности АПК Саратовской области за счет использования возможностей вторичного рынка техники // Депонированная рукопись № 138-B2013. 16.05.2013. EDN: UYKLSL
2. Голубев И.Г., Быков В.В., Голубев М.И. и др. Возможности использования цифровых двойников в ремонтно-обслуживающем производстве // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции, р.п. Правдинский, Московская обл., 8 июня 2023 г. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. С. 773-779. EDN: BAABXE
3. Жиздюк А.А., Буйлов В.Н., Чумакова С.В. Цифровые решения для полевых работ // Вавиловские чтения-2023: Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 136-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова, г. Саратов, 23-25 ноября 2023 г. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. С. 296-303. EDN: КННРWN
4. Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Интеграция профилей цифровых двойников технологических машин в сфере эксплуатации и сопровождения // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции, р.п. Правдинский, Московская обл., 8 июня 2023 г. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. С. 84-91. EDN: BTHBCT
5. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 45-50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
6. Буйлов В.Н., Чумакова С.В., Жиздюк А.А. Математическое моделирование в исследовании структуры почвы // Вавиловские чтения-2023: Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 136-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова, г. Саратов, 23-25 ноября 2023 г. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. С. 105-111. EDN: GLKLXQ
7. Макаров С.В., Иванова А.С., Балебин Д.И. и др. Информационные технологии в управление качеством // Молодые

References

1. Abramov V.A., Zhizdyuk A.A., Khitrova N.V. Development of recommendations to improve energy supply of the agro-industrial sector of the Saratov region by using the opportunities of the secondary market of machinery. Deposit manuscript No. 138-V2013 March 16, 2013.
2. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I. et al. Possibilities of using digital twins in repair and maintenance production. *Scientific and Information Support of the Innovative Development of Agroindustrial Sector: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*, Pravdinskiy, Moscow region, June 08, 2023. Moscow, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of Agroindustrial Sector, 2023. P. 773-779.
3. Zhizdyuk A.A., Builov V.N., Chumakova S.V. Digital solutions for field work. *Vavilov Readings – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 136th anniversary of Academician N.I. Vavilov*, Saratov, November 23-25, 2023. Saratov, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 2023. P. 296-303.
4. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Integration of profiles of digital twins of technological machines in the field of operation and maintenance. *Scientific and Information Support of the Innovative Development of Agroindustrial Sector: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*, Pravdinskiy, Moscow region, June 08, 2023. Moscow, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of Agroindustrial Sector, 2023. P. 84-91.
5. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;2(102):45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
6. Builov V.N., Chumakova S.V., Zhizdyuk A.A. Mathematical modeling in the study of soil structure. *Vavilov Readings – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 136th anniversary of Academician N.I. Vavilov*, Saratov, November 23-25, 2023. Saratov, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov. P. 105-111.
7. Makarov S.V., Ivanova A.S., Balebin D.I., Gos T.O. Information technologies in quality management. *Young Scientists' Contribution to the Development of the National Technological Initiative (SEARCH)*, 2022;1:860-862.
8. Pasyuta A.P., Mukhortov. M.A., Pelymskaya I.S. Application of digital twin technology in the organization of production

ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2022. № 1. С. 860-862. EDN: MDSVLR

8. Пасюта А.П., Мухортов М.А., Пелымская И.С. Применение технологии Digital Twin в организации производства и техническом обслуживании оборудования // Российские регионы в фокусе перемен: Сборник докладов XV Международной конференции, г. Екатеринбург, 10-14 ноября 2020 г. Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2021. Т. 2. С. 401-405. EDN: HKDDRX

Информация об авторах

¹ **Жиздюк Андрей Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общеобразовательные дисциплины»; SPIN-код: 9719-8164, AuthorID: 321852; a.sgau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>

² **Буйлов Валерий Николаевич**, доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Общеобразовательные дисциплины»; SPIN-код: 8513-8703, AuthorID: 281410; buylov_62@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4553-6801>

³ **Чумакова Светлана Валентиновна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общеобразовательные дисциплины»; SPIN-код: 4454-5770, AuthorID: 713475; ch-sv@yandex.ru

⁴ **Ахилбеков Мухат Наршович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Водные ресурсы, землепользование и агротехники»; AuthorID: 264491; Akhilbekov@mail.ru

^{1,2,3} Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, Российская Федерация, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, зд.4, стр. 3.

⁴ Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова; 160012, Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5

Вклад авторов

А.А. Жиздюк – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

В.Н. Буйлов – создание черновика рукописи;

С.В. Чумакова – формальный анализ;

М.Н. Ахилбеков – концептуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 19.06.2024, после рецензирования и доработки 15.12.2024; принята к публикации 18.12.2024

and maintenance of equipment. *Russian Regions in the Focus of Change: Proceedings of the XV International Conference*, Yekaterinburg, 10-14 November 2020. Vol. 2. Yekaterinburg, ООО “Izdatelstvo UMTs UPI”, 2021. P. 401-405.

Author Information

¹ **Andrey A. Zhizdyuk**, CSc (Eng), Assistant Professor, a.sgau@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2378-9799>

² **Valery N. Builov**, DSc (Eng), Assistant Professor, buylov_62@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4553-6801>

³ **Svetlana V. Chumakova**, CSc (Eng), Assistant Professor, ch-sv@yandex.ru

⁴ **Mukhat N. Akhilbekov**, CSc (Eng), Assistant Professor, Akhilbekov@mail.ru

^{1,2,3} Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 410012, Russian Federation, Saratov, Pyotr Stolypin Ave., 4, building 3.

⁴ M. Auezov South Kazakhstan University; Kazakhstan, Shymkent, 5, Tauke Khan Ave.

Author Contribution

A.A. Zhizdyuk – writing – review and editing of the manuscript;

V.N. Builov – writing – original draft preparation;

S.V. Chumakova – formal analysis;

M.N. Akhilbekov – conceptualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 19.06.2024; Revised 15.12.2024; Accepted 18.12.2024