

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:004.65

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-33-42

**Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства****Никитченко Сергей Леонидович**[✉], канд. техн. наук, доцент^{1,2}binom_a@rambler.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315**Лесник Наталья Александровна**, канд. техн. наук, преподаватель³

nat-matvien@mail.ru

Смыков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, ассистент⁴

serg161rus@mail.ru

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения; 344038, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2² Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1³ Зерноградский техникум агротехнологий; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, Зерноградский район, г. Зерноград, ул. Мира, 2⁴ Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, Зерноградский район, г. Зерноград, ул. Ленина, 21

Аннотация. Техническое обслуживание отечественной сельскохозяйственной техники осуществляется преимущественно с помощью бумажного документооборота, что приводит к увеличению затрат времени на управленческие операции. Сельскохозяйственные предприятия остаются за гранью автоматизации и цифровизации управления техническим сервисом машин. Низкая адаптация существующих программных продуктов к специфике отечественного сельскохозяйственного производства не позволяет применять автоматизированные CMMS и EAM-системы, используемые в других отраслях для управления надёжностью эксплуатируемого оборудования. Авторами предложено программное обеспечение с набором функций, аналогичных функционалу известных CMMS-систем. Программное обеспечение включает в себя программу «Агрокомплекс «АСУТО»» в сочетании с ранее разработанными программами складского учёта «Агрокомплекс «Ресурсы»» и программой учёта работы и потребления топлива машинно-тракторным парком «Агрокомплекс «МТП»». Разработанная модель данных автоматизированной системы адаптирована под потребности инженерных работников, отвечающих за работоспособность сельскохозяйственной техники. Практическая проверка автоматизированной системы осуществлялась на сельскохозяйственном предприятии с парком 25 тракторов. Выявлено положительное влияние внедрённого в производство программного обеспечения на надёжность машин. Полученные результаты показали повышение эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники и снижение трудоёмкости управления сервисными процессами при автоматизации инженерной деятельности. Применение автоматизированной системы позволило снизить затраты времени на управление техническим обслуживанием на 35...38% и вероятность пребывания тракторов в простое по техническим причинам на 26%, увеличив при этом вероятность пребывания техники в работоспособном состоянии на 1,81%. Исследования могут быть полезными для разработчиков EAM-систем управления техническим обслуживанием и ремонтом сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, надёжность, техническое обслуживание, автоматизация, цифровизация, CMMS-система, EAM-система

Формат цитирования: Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 33-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>.

© Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Management of agricultural machinery maintenance under the automation and digitalization of production

Sergei L. Nikitchenko[✉], CSc (Eng), Lead Research Engineer, Associate Professor^{1,2}

binom_a@rambler.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315

Natalia A. Lesnik, CSc (Eng), Lecturer³

nat-matvien@mail.ru

Sergey V. Smykov, CSc (Eng), Assistan Professor⁴

serg161rus@mail.ru

¹ Rostov State Transport University, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

² Don State Technical University, 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

³ Zernograd College of Agricultural Technologies, 2 Mira Str., Zernograd, Rostov region, 347740, Russian Federation

⁴ Azov-Black Sea Engineering Institute, Branch of Don State Agrarian University, 21 Lenina Str., Zernograd, Rostov region, 347740, Russian Federation

Abstract. When organizing maintenance activities for domestic agricultural machinery, paper workflow continues to dominate, which negatively affects the performance indicators and the level of operational reliability of machines. The engineering services of domestic agricultural enterprises remain beyond automation and digitalization in matters of managing the technical service of machines. The low adaptation of existing software products to the specifics of domestic agricultural production prevents the adoption of automated CMMS and EAM systems used in other sectors to manage the reliability of equipment in operation. The authors developed software with a set of functions similar to the functionality of well-known CMMS systems. The software includes Agrokompleks ASUTO in combination with the previously developed Agrokompleks Resursy warehouse management software and Agrokompleks MTP fuel management software. The automated system data model is adapted to the needs of engineering workers responsible for the performance of agricultural machinery. A practical test of the system was carried out at an agricultural enterprise with a fleet of 25 tractors. The results obtained confirm the hypothesis that the automation of engineering activities contributes to an increase in the operational reliability of agricultural machinery and a decrease in the labor intensity of managing service processes. The use of the automated system resulted in a decrease in the time spent on maintenance management by 35 to 38%, the probability of tractors having operational failure – by 26%. At the same time, the probability of tractors being in working condition increased by 1.8%. The research could be useful for the developers of EAM systems for the maintenance and repair management of agricultural machinery.

Keywords: agricultural machinery, reliability, maintenance, automation, digitalization, CMMS system, EAM system

For citation: Nikitchenko S.L., Lesnik N.A., Smykov S.V. Management of agricultural machinery maintenance under the automation and digitalization of production. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4): 33-42. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>.

Введение. Современное ведение сельского хозяйства тесно связано с применением современных информационных технологий и инструментов цифровой экономики: интернет-вещей (IoT), облачных технологий, ГЛОНАСС/GPS, больших данных, методов искусственного интеллекта [1-6]. Однако в области управления технической эксплуатацией отечественной сельскохозяйственной техники перечисленные инструменты на практике используются весьма слабо. В мире все более активно исследуются и развиваются интеллектуальные системы технического обслуживания (ТО) оборудования, использующие цифровые инструменты для прогнозирования состояния технических объектов и реализации стратегии предиктивного ТО [7, 8]. Для сельскохозяйственной

техники разрабатываются методы дистанционной диагностики и удалённого мониторинга параметров надёжности [9-11]. В нашей стране это в основном пока экспериментальные проекты.

Во многих отраслях управление жизненным циклом основных фондов осуществляется с помощью EAM-систем (Enterprise Asset Management System) и их предшественников CMMS-систем (Computerized Maintenance Management System)¹ – систем компьютерного управления обслуживанием оборудо-

¹ Enterprise Asset Management. Системы управления основными фондами предприятия / TADVISER. Государство. Бизнес. Технологии: Деловой интернет-портал и аналитическое агентство. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/EAM> (дата обращения: 23.02.2023).

вания [12-14]. Данные инструменты представляют собой автоматизированные рабочие места (АРМ) инженерно-технического персонала, отвечающего за работоспособность оборудования на предприятии. Современные версии ЕАМ-систем включают в себя функционал CMMS и представляют собой облачные решения, а также имеют мобильный интерфейс пользователя. На мировом рынке подобных систем, ориентированных как на отечественного, так и на зарубежного потребителя, российские разработчики представлены достаточно широко¹ [12]. Данные программные продукты поддерживают методы процессного управления и позволяют выбирать стратегию технического обслуживания и ремонта (ТОР) оборудования для предприятия, составлять графики ТОР и контролировать их выполнение, вести историю и анализ отказов машин, резервировать запасные части и др. Среди известных отечественных систем можно выделить такие, как NERPA ЕАМ, Галактика ЕАМ 1С: ТОИР и др.

В последнее время наметились тенденции совершенствования ЕАМ-систем за счет применения инструментов цифровой экономики: анализа больших данных, предиктивного ТО, цифровых двойников (DT) обслуживаемых объектов, искусственного интеллекта² [7]. Многие российские разработчики ЕАМ-систем обеспечивают возможность работы с 3D-моделями узлов и агрегатов обслуживаемых машин, что стимулирует применение виртуальной реальности (VR) при создании симуляторов и анимации для описания процессов ТОР³ [15]. Это позволит более качественно готовить исполнителей и осуществлять информационную поддержку сервисных работ. Дальнейшее развитие ЕАМ-систем направлено на интеграцию с PDM-системами (Product Data Management) фирм изготовителей техники. Такой концепции придерживаются разработчики продукта 1С: PDM [16]. На базе автоматизированных платформ ЕАМ-систем формируются цифровые методы управления производством.

Отсутствие в реальном сельскохозяйственном производстве широкого применения автоматизированных и цифровых методов управления ТО отечественных машин препятствует максимальной реализации их технических возможностей и надёжности. Практика показывает, что переход на прогрессивную систему ТОР по состоянию возможен с помощью современных ЕАМ-приложений, которые обеспечивают правильную стратегию управления состоянием оборудования и её

практическую реализацию. В ближайшей перспективе эти задачи будут распределены между ЕАМ-системами и цифровыми двойниками физических объектов [3, 17].

Несмотря на продолжительный период существования, ЕАМ-системы почти не используются в сельскохозяйственном секторе экономики нашей страны [14]. Наши исследования, проведённые в сельскохозяйственных предприятиях Ростовской области, показывают, что консервативный стиль управления предприятиями, эксплуатирующими технику, до сих пор основан на бумажном документообороте. Сельские инженерно-технические работники (ИТР) недостаточно оснащены компьютерной техникой и специализированным программным обеспечением (ПО). Не уделяется внимание прогрессивным методам управления надёжностью машин со стороны руководства предприятий и в программах подготовки студентов профильных вузов. Но более объективная причина – это ориентированность большинства имеющих ЕАМ и CMMS-систем на отрасли, далёкие от сельского хозяйства, а чтобы адаптировать системы к специфике отечественного сельскохозяйственного производства, требуется решить следующие вопросы:

- определить функции информационной системы и механизмы ее внедрения на сельскохозяйственном предприятии;
- создать модель данных информационной системы и сформировать механизмы сбора первичной производственной информации;
- выявить влияние инструмента управления на надёжность обслуживаемых машин, трудоёмкость управления процессами ТО и стоимость управленческой инженерной деятельности с определением экономического эффекта для предприятия.

Имеющийся опыт использования CMMS/ЕАМ-систем в других отраслях позволяет выдвинуть гипотезу о том, что данные системы положительно повлияют на надёжность сельскохозяйственной техники и другие перечисленные показатели.

Цель исследований: автоматизация инженерных задач процессного управления мероприятиями ТО сельскохозяйственной техники с исследованием возможностей повышения показателей эксплуатационной надёжности обслуживаемых машин и снижения трудоёмкости управления сервисными процессами от применения предлагаемого ПО.

Материалы и методы. Применены методы теории надёжности, графов, марковских процессов для систем массового обслуживания; методология процессного управления; современные методы программирования и семантического моделирования информационных моделей данных, планирования

² Enterprise Asset Management. Системы управления основными фондами предприятия / TADVISER. Государство. Бизнес. Технологии: Деловой интернет-портал и аналитическое агентство. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/ЕАМ> (дата обращения: 23.02.2023).

³ Там же.

экспериментальных исследований и обработки данных, методы технико-экономической оценки.

В качестве аналога CMMS-системы использовалась разработанная нами компьютерная программа «Агрокомплекс «АСУТО»» (свид. о гос. регистрации № 2020614673) в сочетании с ранее разработанными нами программой складского учёта «Агрокомплекс «Ресурсы»» (свид. о гос. регистрации № 2006611143) и программой учёта работы и потребления топлива машинно-тракторным парком «Агрокомплекс «МТП»» (свид. о гос. регистрации № 2006611144). Все программы являются Windows-приложениями. Обмен данными между программами возможен по локальной сети или с помощью флеш-носителей. В перспективе предполагается разработка облачного хранилища данных и web-интерфейсов перечисленных программ. Совокупность задач, решаемых тремя указанными программами, соответствует функционалу известных CMMS-систем. Рассматриваемая информационная система обладает следующими функциональными возможностями:

1. Поддержка процессного управления мероприятиями ТО МТП предприятия – планирование графиков ТО, контроль своевременности проведения и соответствия содержания ТО регламенту, учёт, документирование сервисных процессов по каждому техническому объекту. Возможность корректирования графиков ТО на основании данных диагностирования или по другим причинам.

2. Учёт наработки машин (в моточасах, кг израсходованного топлива) и простоев по техническим причинам, хранение истории отказов и мер по их устранению для каждого объекта.

3. Управление постановкой машин на ТО на основании наработки в принятых единицах измерения.

4. Информационное обеспечение технологий технического обслуживания (текстовое и графическое содержание регламента ТО, операционные карты).

5. Контроль надёжности эксплуатируемых машин и оценка применяемой стратегии ТО по показателю коэффициент технического использования $K_{ТТИ}$.

6. Совместимость с системами ГЛОНАСС/GPS мониторинга (для автоматизации первичного учёта наработки по топливу).

7. Учёт расхода запасных частей каждой машиной, резервирование и составление заявок на запчасти.

Концептуальная модель данных рассматриваемой информационной системы приведена на схеме рисунка 1.

Модель центрируется относительно главной сущности «Машина», что позволяет реализовать принцип индивидуального подхода к каждой единице техники. Связи главной сущности с остальными сущностями

на схеме (рис. 1) отражают все основные потребности для поддержания жизненного цикла эксплуатируемого объекта. Модель также учитывает реальные информационные потребности инженерно-технических работников, участвующих в организации и проведении анализа процессов ТО машин, и ориентирована на обеспечение автоматизации оформления действующих инженерных документов. На основе концептуальной модели создана физическая модель базы данных с использованием СУБД Firebird.

Программа «АСУТО» устанавливалась на рабочий компьютер инженера и на ноутбук механика предприятия. На рисунке 2 показан графический интерфейс программы «АСУТО», который насыщен условными символами для облегчения восприятия информации оператором.

Справочный раздел базы данных программы настраивается на конкретное предприятие и содержит таблицы с информацией о парке тракторов и комбайнов предприятия, видах ТОР и об их регламенте содержания, а также о периодичности ТО машин (кг израсходованного топлива и моточасы). Программы «Ресурсы» и «МТП» используются техником склада запчастей и учётчиком полевой бригады соответственно для первичного учёта потребления машинами предприятия запчастей и топлива. Технически ввод первичной информации о наработке тракторов в программе «АСУТО» может осуществляться с помощью ручного ввода данных (моточасы или кг израсходованного топлива) пользователем программы; интеграции с базой данных программы «МТП» (кг топлива); интеграции с базой данных системы ГЛОНАСС/GPS мониторинга работы сельскохозяйственной техники (кг топлива).

Для сельскохозяйственных тракторов и комбайнов важным является соблюдение периодичности технического обслуживания, установленной заводом-изготовителем, поэтому концептуальная модель данных информационной системы и приложение «АСУТО» адаптированы для стратегии планово-предупредительного ТО. Но при необходимости приложение позволяет редактировать планы-графики ТО машин по результатам диагностирования или, например, если объекту при устранении отказа уже были выполнены некоторые операции очередного технического обслуживания.

Центрирование модели относительно сущности «Машина» позволяет в дальнейшем добавлять в модель новые блоки данных, ориентированные на развитие цифровых методов управления процессами, дистанционной диагностики, цифровых двойников составных частей машин, реализацию предиктивного ТО и др.

Исследована возможность сокращения затрат времени инженерно-технических работников на управление техническим обслуживанием ($T_{ИТР}$) с помощью

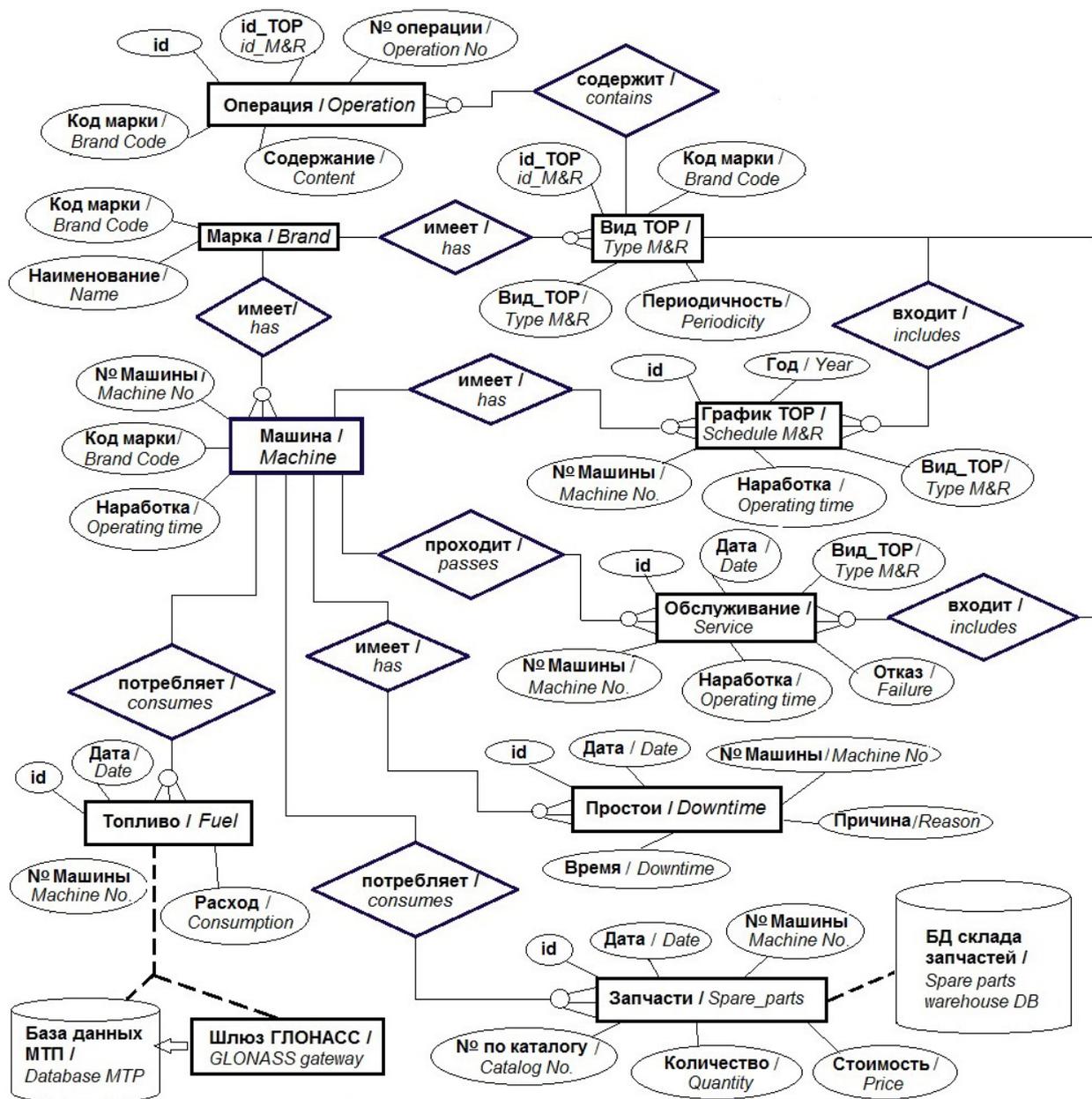


Рис. 1. Концептуальная модель данных информационной системы для управления техническим обслуживанием машин

Fig. 1. Conceptual model of information system data to manage the maintenance of machines

программы «АСУТО». Затраты времени можно представить в виде суммы:

$$T_{итр} = T_{гр} + T_{пун} + T_{ан} + T_{кто} + T_{дто}, \quad (1)$$

где $T_{гр}$ – время на планирование и разработку графиков ТО машин, ч; $T_{пун}$ – время на первичный учёт наработки машин, ч; $T_{ан}$ – время на анализ и расчёт остаточной наработки машины до технического обслуживания, ч; $T_{кто}$ – время на проверку качества ТО, ч; $T_{дто}$ – время на оформление технических документов и журнала ТО по выполненному обслуживанию, ч.

Продолжительность каждой управленческой операции, рассматриваемой в формуле (1), измеряли по 50 раз в ручном и автоматизированном режиме

исполнения. Полученные результаты обрабатывали статистическими методами. Обычно операция составления графика ТО машины выполняется один раз в год, операции по управлению мероприятиями ТО повторяются многократно в течение года. Интенсивность использования машин в разных хозяйствах является различной, поэтому анализ затрат времени инженерно-технических работников на управление процессами ТО осуществлён для возможных парков отечественных машин при наработке каждой машины, соответствующей одному циклу ТО⁴ (табл. 1).

Оценка влияния специализированного ПО «АСУТО» на показатели надёжности обслуживаемых машин осуществлялась методом статистического

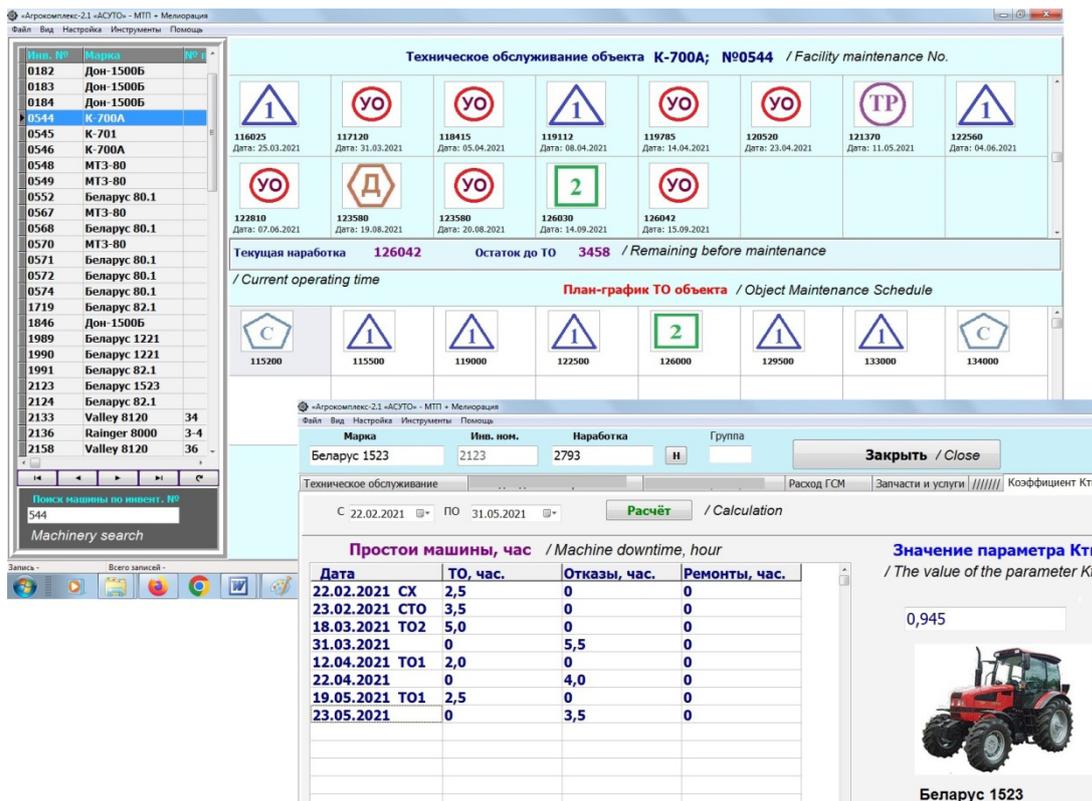


Рис. 2. Графический интерфейс программы «Агрокомплекс «АСУТО»»
 Fig. 2. Graphical interface of the program “Agrokompleks ASUTO”

Таблица 1
 Составы возможных парков используемых машин и общее количество обслуживаний за цикл ТО
 Table 1
 Composition of possible fleets of serviced machines and the total number of services per a maintenance cycle

Марка машин Make of machines	Количество машин (N_m , шт.), число ТО за цикл ($N_{ТО}$) Number of machines N_m pcs., the number of maintenance $N_{ТО}$ per cycle					
	Вариант А / Option A		Вариант В / Option B		Вариант С / Option C	
	N_m	$N_{ТО}$	N_m	$N_{ТО}$	N_m	$N_{ТО}$
Беларус 82.1 / Belarus 82.1	4	32	6	48	10	80
Беларус 1523 / Belarus 1523	3	24	4	32	5	40
К-744R2	3	24	3	24	5	40
ACROSS585	5	45	7	63	10	90
ИТОГО	15	125	20	167	30	250

исследования. В качестве оценочных показателей надёжности применялись коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ по ГОСТ 27.002-2015, вероятность пребывания машин в работоспособном состоянии и параметр $MADT(t_1, t_2)$ – средняя накопленная продолжительность неработоспособного состояния за период времени $[t_1, t_2]$ по ГОСТ Р 27.010-2019.

На сельскохозяйственном предприятии Ростовской области, специализирующемся на выращивании зерновых и пропашных культур, картофеля и овощей, авторами

исследовалась группа из 25 тракторов: К-700А (2 шт.); К-744 (1 шт.); К-701 (1 шт.); Беларус 1221 (2 шт.); Беларус 1523 (4 шт.); Беларус 80/82 (15 шт.). В течение года тракторы выполняли операции по основной и поверхностной обработке почвы, внесению минеральных удобрений, посеву и посадке культур, по уходу за посевами, осуществляли транспортные и прочие работы. Показатели надёжности тракторов за 2018-2020 гг. (управление ТО вручную) сравнивались с показателями 2021 г. (после внедрения программы «АСУТО»).

⁴ Лесник Н.А. Совершенствование организации технического обслуживания сельскохозяйственной техники с применением специализированного программного обеспечения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Зерноград, 2022. 20 с.

Построение графиков ТО каждого трактора в программе «АСУТО» возможно при наличии плановой наработки трактора на предстоящий год в разрезе по кварталам или месяцам. Плановая наработка трактора получена авторами на основе анализа большого объёма данных о наработке по каждой единице техники за 16 лет применения на предприятии программы «МТП».

Процесс эксплуатации каждого трактора считали случайным. При этом в период полевых работ продолжительностью T с точки зрения надёжности трактор может пребывать в одном из четырёх состояний: S_1 – работоспособен; S_2 – находится на периодическом ТО; S_3 – неработоспособен и находится в состоянии эксплуатационного отказа, отказ устраняется оперативно; S_4 – неработоспособен и находится на внеплановом текущем ремонте. Переход из работоспособного состояния в любое другое характеризуется интенсивностью λ_{ij} , обратный переход – μ_{ij} . Для каждого состояния трактора определялась вероятность $P_i(t)$ в любой момент времени $t \in T$. Главным условием эффективности внедряемой системы управления ТО принято

$$P_1^{\text{ДО}}(t) < P_1^{\text{ПОСЛЕ}}(t), \quad (2)$$

где $P_1^{\text{ДО}}(t)$ и $P_1^{\text{ПОСЛЕ}}(t)$ – вероятности пребывания тракторов в работоспособном состоянии соответственно до внедрения программного обеспечения и после него.

Вероятности $P_i(t)$ определяли через систему дифференциальных уравнений Колмогорова для однородного непрерывного марковского процесса в стационарном режиме:

$$\begin{cases} P_1(t) = \frac{\mu_{21}P_2(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t)}{(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})}; \\ P_2(t) = \frac{\lambda_{12}P_1(t)}{\mu_{21}}; \\ P_3(t) = \frac{\lambda_{13}P_1(t)}{\mu_{31}}; \\ P_4(t) = \frac{\lambda_{14}P_1(t)}{\mu_{41}}; \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Оценка средней накопленной продолжительности неработоспособного состояния для совокупности тракторов определялась по формуле:

$$MADT(t_1, t_2) = \frac{\sum_{i=1}^N H_{Ci}}{N}, \quad (4)$$

где H_{Ci} – общая продолжительность неработоспособного состояния i -го объекта за период времени t_1, t_2 .

Стоимостные расчёты выполнялись для функций информационной системы, связанных исключительно

с управлением ТО, поэтому учитывалась только стоимость внедрения программ «АСУТО» и «МТП». Функции информационной системы, связанные с резервированием запасных частей машин методом искусственного интеллекта с генетическим алгоритмом, описаны в работе [18].

Результаты и их обсуждение. Экспериментально определены статистические характеристики затрат времени ИТР, входящие в формулу (1). Среднее значение времени ТПУН на одну операцию до внедрения «АСУТО» составило 45,1 сек, после внедрения – 20,4 сек. Для времени ТДТО эти значения соответственно составляли 37,5 сек и 11,34 сек. Эксперименты показали, что затраты времени на составление графиков технического обслуживания ($T_{\text{тр}}$) в ручном исполнении могут составлять в среднем 0,5 часа на одну машину.

Автоматизация этой операции позволяет создавать годовой график ТО для одной машины за 1,5-2,0 мин. После внедрения «АСУТО» составляющая времени $T_{\text{ан}}$ исчезает из баланса, поскольку данная операция автоматизируется и расчёт выполняет программа.

Расчётное значение затрат времени ТИТР за цикл ТО для возможного парка машин А до внедрения АРМ «АСУТО» составляет 53,26 ч, после внедрения – 34,27 ч. Для парка В эти значения соответственно составили 66,52 и 40,93 ч, а для парка С – 99,65 и 61,68 ч. То есть затраты времени на управление процессами ТО после автоматизации снижаются на 35...38 %.

Абсолютные стоимостные затраты на управленческую инженерную деятельность в условиях возможных парков при внедрении только автоматизированных рабочих мест (АРМ) «АСУТО» увеличиваются по сравнению с ручным документооборотом на 16...65%, а при автоматизации первичного учёта наработки машин с использованием дополнительного АРМ «МТП» данные затраты увеличиваются на 100...153%. Если рассматривать сумму эксплуатационных затрат на управление процессами и на технологию проведения ТО, приведённых к наработке на цикл ТО, то в нашем случае для всех парков машин в структуре общих затрат затраты на управление с применением АРМ составили менее 2%.

Для группы из 25 наблюдаемых тракторов получены основные статистические характеристики затрат времени пребывания в различных состояниях S_i ; $T_p, T_{\text{ТО}}, T_o, T_{\text{рем}}$ – в течение периодов полевых работ до внедрения программы «АСУТО» и после него. В таблице 2 представлены данные характеристики в расчёте на один трактор. Здесь все случайные величины времени простоев тракторов описываются законом распределения Вейбулла.

После внедрения ПО увеличивается время пребывания машин на обслуживании ($T_{\text{ТО}}$), что объясняется

Таблица 2

Основные статистические характеристики затрат времени пребывания тракторов в различных состояниях, ч

Table 2

Main statistical characteristics of costs of time spent by tractors in various states, hour

Показатель Index	До внедрения «АСУТО» Before "ASUTO" software implementation				После внедрения «АСУТО» After "ASUTO" software implementation			
	T_p	$T_{ТО}$	T_o	$T_{рем}$	T_p	$T_{ТО}$	T_o	$T_{рем}$
Среднее / Average	1091,20	10,70	29,64	24,79	1155,48	16,68	13,86	19,72
Стандартное отклонение / Standard deviation	601,890	6,040	14,340	25,440	609,99	9,804	8,334	16,121
Дисперсия / Variance	362269,30	36,50	205,50	647,30	372091,50	96,12	69,45	259,88
Коэффициент вариации / Coefficient of variation	0,5516	0,5639	0,4837	1,0264	0,5279	0,5878	0,6013	0,8175

исключением пропусков отдельных регламентных операций и даже целых мероприятий ТО, для выполнения которых понадобилось время. Положительный эффект оказало снижение затрат времени пребывания тракторов в состоянии отказа (T_o) (рис. 3).

Параметр интенсивности λ_{13} перехода тракторов из работоспособного состояния S_1 в состояние отказа S_3 уменьшился на 37,86%. Средняя накопленная продолжительность неработоспособного состояния тракторов за период полевых работ до внедрения ПО составляла 65,5 ч, а после внедрения – 50,26 ч. Снижение данного параметра составляет 23%. Среднее значение коэффициента $K_{ТН}$ для парка тракторов после внедрения ПО увеличилось на 1,8%. Снижение времени T_o тракторов после внедрения новой методики управления ТО обусловлено уменьшением числа отказов их отдельных составных частей (данные получены с помощью складской программы «Ресурсы») (табл. 3).

Результаты расчёта вероятностей состояний тракторов по годам представлены в таблице 4.

Внедрение специализированного ПО привело к снижению суммарной вероятности пребывания тракторов

в простое по техническим причинам ($P_2 + P_3 + P_4$) с 0,062 до 0,046, то есть на 26%. В среднем вероятность P_1 пребывания тракторов в работоспособном состоянии в период полевых работ увеличилась на 1,81%.

Дальнейшее развитие данной информационной технологии управления видим по следующим направлениям:

- обеспечение возможности автоматизированной разработки маршрутно-технологических графиков ТО машин [15];
- разработка Web-версии программного продукта «АСУТО» с облачной базой данных;
- интеграция с известными ГЛОНАСС/GPS-системами;
- развитие интеллектуальных методов RCM-анализа отказов и формирование оптимальных стратегий ТОР обслуживаемых объектов [19, 20];
- разработка типовых информационных моделей данных, охватывающих задачи управления техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники.

Таблица 3

Снижение отказов агрегатов, узлов и деталей тракторов после внедрения ПО

Table 3

Reduction of failures of tractor units, assemblies and parts after software implementation

Наименование составной части Component name	Снижение числа отказов, % Failure rate reduction, %
Насосы НШ (все) Pumps NSh (all)	36,4
Компрессоры (все) Compressors (all)	40,0
Подшипники / Bearings	39,13
Ремни / Belts	26,2
Рукава РВД / Sleeves	32,14
Распылители форсунок Sprayers	44,0
Форсунки / Diesel injectors	37,83

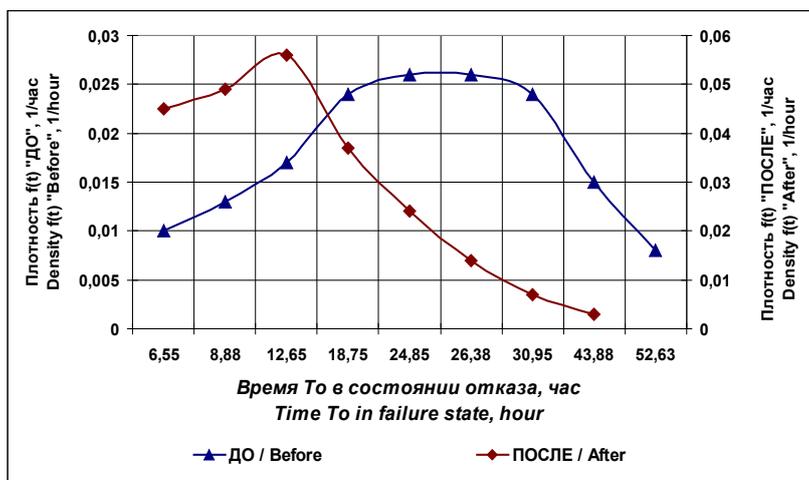


Рис. 3. Плотности распределения случайной величины T_o до внедрения ПО и после него

Fig. 3. Distribution densities of a random variable T_o before and after software implementation

Значения вероятностей состояний группы тракторов

Values of the states of probabilities for a group of tractors

Год / Year	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
До внедрения ПО / Before software implementation				
2018	0,936	0,009	0,033	0,021
2019	0,933	0,010	0,031	0,024
2020	0,943	0,011	0,025	0,020
Среднее/Average	0,937	0,0102	0,030	0,022
После внедрения ПО / After software implementation				
2021	0,954	0,015	0,013	0,018

Представленные результаты исследований могут быть полезными для разработчиков ЕАМ-систем, ориентированных на управление ТОР сельскохозяйственной техники.

Выводы

Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники с помощью разработанного

программного обеспечения способствует повышению эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники и снижению трудоёмкости управления процессами ТО. Снижение простоев машин в период эксплуатации обусловлено уменьшением числа отказов отдельных составных частей за счёт их предупреждения по результатам диагностирования и соблюдения периодичности и регламента ТО.

Список использованных источников

1. Brodny J., Tutak M. Assessing the level of digitalization and robotization in the enterprises of the European Union Member States. *PLoS ONE*. 2021;16(7): e0254993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254993>
2. Крюкова А.А., Хисрава Я.Ш. Ключевые инструменты цифровой экономики и их влияние на деятельность современной компании // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8, № 3 (28). С. 214-216. EDN: QNPZQQ
3. Yang F., Gang Zh., Mingliang Zh., Fuzhen X. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance: An Overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
4. Водяников В.Т. Тенденции совершенствования технических средств и сменяемости технологических укладов производства // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 2. С. 76-80. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-76-80>
5. Зозуля Д.М. Цифровизация российской экономики и Индустрия 4.0: вызовы и перспективы // Вопросы инновационной экономики. 2018. Т. 8, № 1. С. 1-14. <https://doi.org/10.18334/vinec.8.1.38856>
6. Измайлов А.Ю., Хорошенко В.К., Лужнова Е.С. Управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАСС/GPS // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. № 3. С. 15-20. EDN: TTLVSB
7. Lee J., Ni J., Singh J., Jiang B., Azamfar M., Feng J. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):1-40. <https://doi.org/10.1115/1.4047856>
8. Власов А.И., Григорьев П.В., Кривошеин А.И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // *Надёжность и качество сложных систем*. 2018. № 2 (22). С. 26-35. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-2-4>
9. Костомахин Н.М., Воронов А.Н., Ковалев Л.И., Ковалев И.Л. Контроль параметров надёжности сельскохозяйственной

References

1. Brodny J., Tutak M. Assessing the level of digitalization and robotization in the enterprises of the European Union Member States. *PLoS ONE*. 2021;16(7):e0254993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254993>
2. Kryukova A.A., Khisravova Y.S. Key instruments of the digital economy and their impact on the activity of a modern company. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2019;8(3):214-216. (In Rus.)
3. Yang F., Gang Zh., Mingliang Zh., Fuzhen X. Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35:80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
4. Vodyannikov V.T. Trends in the improvement of technical means and the replaceability of technological modes of production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(2):76-80. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-76-80>
5. Zozulya D.M. Digitalization of the Russian economy and industry 4.0: challenges and prospects. *Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki*. 2018;8(1):1-14. (In Rus.). <https://doi.org/10.18334/vinec.8.1.38856>
6. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S. Control of agricultural mobile units with use of the GLONASS/GPS navigation system. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015;(3):15-20. (In Rus.)
7. Lee J., Ni J., Singh J., Jiang B., Azamfar M., Feng J. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):1-40. <https://doi.org/10.1115/1.4047856>
8. Vlasov A.I., Grigoriev P.V., Krivoshein A.I. Model of predictive equipment maintenance with application of wireless touch networks. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2018;2(22):26-35. (In Rus.). <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-2-4>
9. Kostomakhin N.M., Voronov A.N., Kovalev L.I., Kovalev I.L. Control of reliability parameters of agricultural equipment with the use of GPS/GLONASS systems. *Trudy GOSNITI*. 2015;118:26-30. (In Rus.). EDN: TODEWR

техники с использованием систем GPS/ГЛОНАСС // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 26-30. EDN: TODEWR

10. Бондаренко И.И. Определение и контроль оперативного мониторинга транспорта, диагностика режимов работы машинно-тракторного парка с помощью системы GPS мониторинга транспорта // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 4. С. 113-117. EDN: IRTIGX

11. Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Воронов А.Н., Сяпин А.С. Экспериментальная система дистанционного мониторинга технического состояния самоходных сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2019. № 10. С. 48-57. EDN: BEHSQX

12. Измайлов М.К. Сравнительный анализ современных ЕАМ-систем, используемых в российской и зарубежной практике // BENEFICIUM. 2020. № 2 (35). С. 35-42. [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2\(35\).35-42](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2(35).35-42)

13. Wienker M., Henderson K., Volkerts J. The Computerized Maintenance Management System An essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering*. 2016;138:413-420. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>

14. Кац Б.А., Антоненко И.Н., Молчанов А.Ю. Информационные системы управления производственными активами. История, состояние и перспективы. Ч. 1 // Трубопроводная арматура и оборудование. 2015. № 3 (78) С. 74-78. https://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information_systems_asset_management.pdf

15. Никитченко С.Л., Липкович И.Э., Мирошников А.М., Должиков В.В. Автоматизация проектирования маршрутных технологий технического обслуживания сельскохозяйственной техники // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 2 (58). С. 39-53. http://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_2_39-53

16. Нужный А.М., Барабанов А.В., Гребенникова Н.И., Сафронов В.В. Организация обмена технологическими данными в системе 1С: PDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, № 4. С. 26-29. EDN: UJKBHH

17. Дидманидзе О.Н., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Формирование подхода к созданию цифрового двойника трактора сельскохозяйственного назначения // Известия Международной академии аграрного образования. 2022. № 61. С. 33-37. EDN: NBCUYG

18. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 25-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>

19. Sifonte J.R., Reyes-Picknell J.V. Reliability Centered Maintenance – Reengineered. Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R. ProductivityPress, 2017. 367 p.

20. Антоненко И.Н. Методика приоритизации объектов обслуживания на основе оценки критичности отказов // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21, № 3. С. 68-72. https://doi.org/10.12737/article_5b8cf933596a37.05447226

Вклад авторов

С.Л. Никитченко – концептуализация, методология, программное обеспечение, руководство исследованием

Н.А. Лесник – методология, проведение исследования, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

С.В. Смыков – ресурсы, визуализация, создание черновика рукописи

Конфликт интересов:

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

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 18.04.2023; принята к публикации 17.05.2023

10. Bondarenko I.I. Determination and control of operational monitoring of transport, diagnostics of working modes of the machine-tractor fleet using the GPS system of transport monitoring. *Vestnik Belorusskoy Gosudarstvennoy Selskohozyaystvennoy Akademii*. 2021;(4):113-117. (In Rus.)

11. Kostomahin M.N., Petrishchev N.A., Voronov A.N., Sayapin A.S. Experimental system of remote monitoring of technical condition of self-propelled agricultural machines. *Selskohozyaystvennaya Tekhnika: Obsluzhivanie i Remont*. 2019;(10):48-57. (In Rus.) EDN: BEHSQX

12. Izmaylov M.K. Comparative analysis of modern EAM-systems used in Russian and foreign practice. *BENEFICIUM*. 2020;2(35):35-42. (In Rus.) [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2\(35\).35-42](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2(35).35-42)

13. Wienker M., Henderson K., Volkerts J. The Computerized Maintenance Management System An essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering*. 2016;138:413-420. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>

14. Kats B.A., Antonenko I.N., Molchanov A.Yu. Information systems for managing production assets. History, state and prospects. Part 1. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*. 2015;3(78):74-78. (In Rus.) https://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information_systems_asset_management.pdf

15. Nikitchenko S.L., Lipkovich I.E., Miroshnikov A.M., Dolzhikov V.V. Automation of the design of route technologies for the maintenance of agricultural machinery. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15-2(58):39-53. (In Rus.) http://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_2_39-53

16. Nuzhnyi A.M., Barabanov A.V., Grebennikova N.I., Safronov V.V. Organizing the exchange technological data in the 1C: PDM. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2015;11(4):26-29. (In Rus.)

17. Didmanidze O.N., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Forming an approach to designing a digital twin of agricultural tractor. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2022;(61):33-37. (In Rus.)

18. Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Improving the methods of reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms. *Agricultural Engineering*. 2022;24(6):25-31. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>

19. Sifonte J.R., Reyes-Picknell J.V. Reliability Centered Maintenance – Reengineered. Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R. ProductivityPress, 2017. 367 p.

20. Antonenko I.N. Risk-based prioritization technique of maintenance objects. *NDT World*. 2018;21(3):68-72. (In Rus.) https://doi.org/10.12737/article_5b8cf933596a37.05447226

Contribution of the authors

S.L. Nikitchenko – conceptualisation, methodology, software, research supervision

N.A. Lesnik – methodology, conducting the study, revision and editing of the final manuscript

S.V. Smykov – resources, visualisation, original manuscript drafting

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 06.03.2023; revised 18.04.2023; accepted 17.05.2023