

Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства

Сергей Леонидович Никитченко^{1,2}, Андрей Андреевич Капкаев¹,
Василий Иванович Юхнов^{1,3}, Мария Ильинична Муконина¹

¹ФГБОУ ВО РГУПС, г. Ростов-на-Дону, Россия

²ФГБОУ ВО ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

³Северо-Кавказский филиал ФГБОУ ВО МТУСИ, г. Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: binom_a@rambler.ru

Аннотация. В сельском хозяйстве техника является важным производственным активом. Управление жизненным циклом эксплуатируемых машин во многих отраслях осуществляют с помощью информационных систем ЕАМ, которые позволяют сократить непроизводительные простои техники. Это актуально для сельхозпроизводства, поскольку здесь зачастую наблюдается низкий коэффициент использования времени смены машин, а в структуре непроизводительных затрат времени до 30% занимают простои по техническим причинам. Однако, системы ЕАМ не популярны в отечественной агроинженерной сфере, при этом с их помощью можно автоматизировать комплекс инженерных управленческих задач, а цифровые решения на их базе содержат дополнительные возможности в реализации резервов производства. Целью представленного исследования является повышение эффективности управления жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации с применением информационной системы ЕАМ. Объект исследований – этапы развития и функциональные возможности современных информационных систем CMMS и ЕАМ, интеграция ЕАМ с инструментами цифровой экономики; пути адаптации и совершенствования ЕАМ к специфике отечественного сельхозпроизводства; показатель общей эффективности ОЕЕ сельскохозяйственной техники. Предмет исследований – влияние цифровизации на функциональность ЕАМ систем; влияние ЕАМ на показатель общей эффективности сельскохозяйственной техники (на примере зерноуборочных комбайнов). Выявлены основные этапы развития ЕАМ, где после 2011 года наблюдается их интеграция с инструментами цифровой экономики, что переводит ЕАМ в категорию интеллектуальных систем для управления техническим состоянием машин. Предложены рекомендации по адаптации ЕАМ к условиям отечественного агробизнеса. Определено эталонное значение показателя ОЕЕ для зерноуборочных комбайнов ACROS, равное 47%, и значение в условиях реальной эксплуатации – 19,1%. Теоретически установлено, что при использовании системы ЕАМ коэффициент использования времени смены повышается на 20%, а показатель ОЕЕ комбайнов увеличивается в 1,41 раза за счёт сокращения простоев машин по техническим причинам.

Ключевые слова: жизненный цикл изделий; сельскохозяйственная техника; техническое обслуживание; эффективность; надёжность; ЕАМ-система; цифровизация.

Для цитирования: Никитченко С. Л., Капкаев А. А., Юхнов В. И., Муконина М. И. Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 194–204. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Life cycle management of agricultural machinery at the operational stage in the conditions of digitalization of production

Sergei L. Nikitchenko^{1,2}, Andrey A. Kapkaev¹, Vasily I. Yukhnov^{1,3}, Maria I. Mukonina¹

¹Rostov State Transport University, Rostovon Don, Russia

²Don State Technical University, Rostovon Don, Russia.

³North Caucasus branch of Moscow Technical University of Communications and Informatics, Rostovon Don, Russia.

e-mail: binom_a@rambler.ru





Abstract. In agriculture, machinery is an important production asset. Many industries manage the life cycle of machines in use with the help of EAM information systems, which reduce unproductive downtime. This is relevant for agricultural production, since there is often a low utilization rate of machine change time, and in the structure of non-productive time costs, up to 30% is downtime due to technical reasons. However, EAM systems are not popular in the domestic agro-engineering field, while they can be used to automate a set of engineering management tasks, and digital solutions based on them contain additional opportunities for the implementation of production reserves. The purpose of the presented study is to improve the efficiency of life cycle management of agricultural machinery at the operational stage using the EAM information system. The object of research is the stages of development and functionality of modern information systems CMMS and EAM, integration of EAM with digital economy tools; ways of adapting and improving EAM to the specifics of domestic agricultural production; an indicator of the overall efficiency of the OEE of agricultural machinery. The subject of research is the impact of digitalization on the functionality of EAM systems; the impact of EAM on the indicator of the overall efficiency of agricultural machinery (on the example of combine harvesters). The main stages in the development of EAM are identified, where after 2011 their integration with the tools of the digital economy is observed, which translates EAM into the category of intelligent systems for managing the technical condition of machines. Recommendations for adapting EAM to the conditions of domestic agribusiness are proposed. The reference value of the OEE indicator for ACROS combine harvesters was determined, equal to 47%, and the value in real operation is 19.1%. It has been theoretically established that when using the EAM system, the shift time utilization ratio increases by 20%, and the OEE of combines increases by 1.41 times due to the reduction of machine downtime for technical reasons.

Keywords: product lifecycle; agricultural machinery; maintenance; efficiency; reliability; EAM system; digitalization.

For citation: Nikitchenko S. L., Kapkaev A. A., Yukhnov V. I., Mukonina M. I. Life cycle management of agricultural machinery at the operational stage in the conditions of digitalization of production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal*. 2023;(10)194–204. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>.

Введение. Надежность современных сельскохозяйственных машин формируется и обеспечивается на начальных этапах жизненного цикла (ЖЦ) – проектирование, конструирование, изготовление. Этап эксплуатации в ЖЦ машин является наиболее продолжительным и реализация надёжности в этот период осуществляется поддержанием работоспособности техники за счёт проведения периодических технических обслуживаний (ТО), диагностирования, правильного хранения машин, плановых и внеплановых текущих ремонтов и других работ. Организацией проведения этих мероприятий могут заниматься инженерно-технические работники (ИТР) эксплуатирующих предприятий, дилерских служб и других сервисных организаций. Причём после истечения гарантийного периода эксплуатации роль ИТР сельхозпредприятий в поддержании работоспособности отечественной техники заметно возрастает [15, 20].

В мировой и отечественной практике во многих отраслях давно автоматизированы инженерные задачи обеспечения ЖЦ технических изделий от стадии идеи до использования по назначению и утилизации. Здесь активно практикуются CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support) – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий [6]. Управление ЖЦ осуществляется на информационной платформе PLM (Product Lifecycle Management), которая интегрирует различное прикладное программное обеспечение и создаёт единое информационное пространство для инженерных служб и потребителей изделия [6]. Основу PLM составляют PDM-системы (Product Data Management) – системы управления данными об изделии. На этапе проектирования и изготовления отечественной сельскохозяйственной техники инженеры активно используют системы автоматизированного проектирования (САПР). Однако, сельское хозяйство является одной из немногих отраслей, где на этапе эксплуатации машин инженеры чаще обходятся без специализированного программного обеспечения (ПО) и автоматизации инженерных задач процессного управления ЖЦ технических объектов [5].

В настоящий момент в мире выделился целый класс систем управления ЖЦ активов предприятий, которые называются EAM-системы (Enterprise Asset Management System). Такие системы положительно зарекомендовали себя в горнодобывающей и химической промышленности, нефтегазовом секторе, металлургии, машиностроении, энергетике, транспорте и других отраслях. Они позволяют автоматизировать процессы управления, связанные с планированием мероприя-



тий эксплуатации, ТО и ремонта машин, учётом и анализом показателей их работы, материальным обеспечением и анализом надёжности [9].

Опыт специалистов отечественной компании Factory5 (<https://factory5.ai/>) показывает, что эффективнее всего ЕАМ-системы функционируют в больших промышленных предприятиях с крупным и разнородным парком производственных активов, которые сильно зависят от надёжности и качества работы оборудования. Здесь эффективность ПО достигается при наличии 50 и более единиц оборудования у предприятия. А при наличии 100 единиц машин и более кроме ПО актуальным становятся цифровые решения для сбора и анализа больших данных.

Современные сельскохозяйственные тракторы и комбайны являются сложными техническими объектами, надёжность которых в период эксплуатации во многом определяет темп и качество выполнения полевых работ, а также величину получаемого урожая культур. В исследовании [3] установлено, что в условиях Ростовской области имеется многочисленная группа предприятий, каждое из которых насчитывает в своем парке тракторов и комбайнов по 80÷90 и более единиц. Именно эта категория хозяйств в первую очередь может стать потенциальным потребителем информационных систем типа ЕАМ и цифровых методов управления ЖЦ машин. Согласно исследованию сообщества SMRP (<https://smrp.org/>), внедрение ЕАМ-систем в различных отраслях позволяет увеличить до 30% срок полезного использования оборудования, до 20% сократить его простои, повысить коэффициент готовности оборудования, снизить число отказов до 30% и повысить долю плановых ремонтов до 80%, сократить затраты на технический сервис более чем на 20%, обеспечить оптимизацию складских запасов и снизить время ожидания запчастей. При этом повышается безопасность работ по ТОР, а их производительность увеличивается на 40...50%. В исследовании [14] установлено, что автоматизация инженерных задач управления ТО сельскохозяйственной техники позволяет сократить затраты времени ИТР при управлении процессами ТО на 35...38 %, а средняя накопленная продолжительность неработоспособного состояния МАДТ(t_1 , t_2) по ГОСТ Р 27.010–2019 за период полевых работ для тракторов снижается на 23%.

Таким образом, современные системы ЕАМ являются инструментами для снижения непроизводительных простоев техники, повышения надёжности и производительности оборудования и сервисных работ. Это является актуальным для сельхозпроизводства, поскольку здесь зачастую наблюдается низкий коэффициент использования времени смены машин (для зерноуборочных комбайнов – 0,45), а в структуре непроизводительных затрат времени смены до 30% занимают простои по техническим причинам [13], при этом 55,9% отказов комбайнов связано с эксплуатационными причинами [10]. Решение перечисленных проблем находится в компетенции систем ЕАМ, однако информации об опыте их применения в российском агробизнесе почти нет. Необходимо выяснить причины сложившейся ситуации, найти пути адаптации имеющихся программных продуктов к условиям отечественного сельхозпроизводства и определить возможный эффект предприятий от их внедрения.

Цель исследования – повышение эффективности управления жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации с применением информационной системы ЕАМ.

Объект исследований – этапы развития и функциональные возможности современных информационных систем CMMS и ЕАМ, интеграция ЕАМ и инструментов цифровой экономики; пути адаптации и совершенствования ЕАМ к специфике отечественного сельхозпроизводства; показатель общей эффективности ОЕЕ сельскохозяйственной техники.

Предмет исследований – влияние цифровизации на функциональность ЕАМ систем; влияние системы ЕАМ на показатель общей эффективности сельскохозяйственной техники (на примере зерноуборочных комбайнов).

Методика исследований. Основным методом исследований являлся аналитический. Для анализа возможностей существующих ЕАМ-систем использовали рекламные материалы, размещённые на сайтах разработчиков, и Интернет-ресурс <https://soware.ru/categories/enterprise-asset-management-systems>. Синтез предложений по совершенствованию и адаптации ЕАМ к условиям отечественного сельскохозяйственного производства осуществлялся с учётом инструкций по эксплуатации и ТО машин; требований ГОСТ, регламентирующих вопросы организации ТО сельскохозяйственной техники и надёжность технических изделий. Использовалась методика расчёта показателя общей эффективности ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness) оборудования.

Результаты исследований. ЕАМ-системы получили развитие в начале текущего века и после 2010 года модули ЕАМ входили в состав практически всех известных крупных управленческих систем ERP (Enterprise Resource Planning). Предшественниками ЕАМ-систем были более простые компьютеризированные системы управления ТОР – CMMS-системы (Computerized Maintenance Management System), которые появились в 70-ых годах XX века, существуют и развиваются до сих пор [24]. Функциональность данных программных продуктов ограничивалась вопросами управления технической эксплуатацией оборудования и составлением заявок на выполнение ремонта, компоненты складского учета и заявок на покупку материалов. Современные ЕАМ содержат компоненты CMMS и их функциональность. Результаты анализа функциональных возможностей широко используемых в мире и в России ЕАМ-систем представлены в табл. 1.

Таблица 1

Функциональные возможности управления ТОР известных ЕАМ-систем

Наименование ЕАМ-системы	Производитель, страна	Функциональные возможности							
		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
Монолит ЕАМ	Монолит-Инфо, Россия	+	+	+	+	+	+		+
Ellipse ЕАМ	ABB, Швейцария	+	+	+	+	+	+		+
Галактика ЕАМ	Галактика, Россия	+	+	+	+	+	+		
SAP Predictive Maintenance and Service	SAP SE, Германия	+	+	+	+		+		+
IC ЕАМ	ИБС Экспертиза, Россия	+	+	+	+	+	+	+	+
Oracle ЕАМ	Oracle Corporation, США	+	+		+	+	+		
NERPA ЕАМ	Новософт, Россия	+	+	+	+	+	+		+
HexGN ЕАМ	Hexagon AB, Швеция	+	+		+	+	+		+
IC:ТОИР + IC: RCM	Деснол Софт, Россия	+	+	+	+	+	+		+
IFS ЕАМ	IFS, Швеция	+	+	+	+	+	+		
Global-EAM	Бизнес Технологии, Россия	+	+	+	+	+	+		
Zyfra ЕАМ	Твинс технологии, Россия	+	+	+	+	+	+		
Infor ЕАМ	Infor, США	+	+	+	+	+	+		+
F5 ЕАМ	TM Factory5, Россия	+	+	+	+	+	+		+
openMAINT	Tecnoteca, Италия	+	+	+		+	+	+	
Seascope	Си Проект, Россия	+	+		+	+	+	+	
IBM Maximo	IBM, США	+	+	+	+	+	+		+
Smart Field Services	Генезис знаний, Россия	+			+	+	+		

Примечание. Принятые обозначения в таблице: F₁ – планирование и управление графиками ТОР оборудования; F₂ – анализ отказов и их последствий; F₃ – RCM-анализ надёжности и выбор стратегии ТОР; F₄ – поддержка содержания (регламента) технологий ТОР; F₅ – управление складом и резервирование запасных частей; F₆ – управление сервисным персоналом; F₇ – 3D-модели оборудования и интеграция с PDM системами фирм производителей машин; F₈ – связь с цифровым двойником технического объекта и предиктивное ТО.

На платформе ЕАМ можно выбирать стратегию управления мероприятиями ТОР, анализировать надёжность эксплуатируемых объектов и выбирать пути её повышения, а также решать другие инженерные задачи. На рисунке представлены этапы формирования функций систем CMMS и ЕАМ.

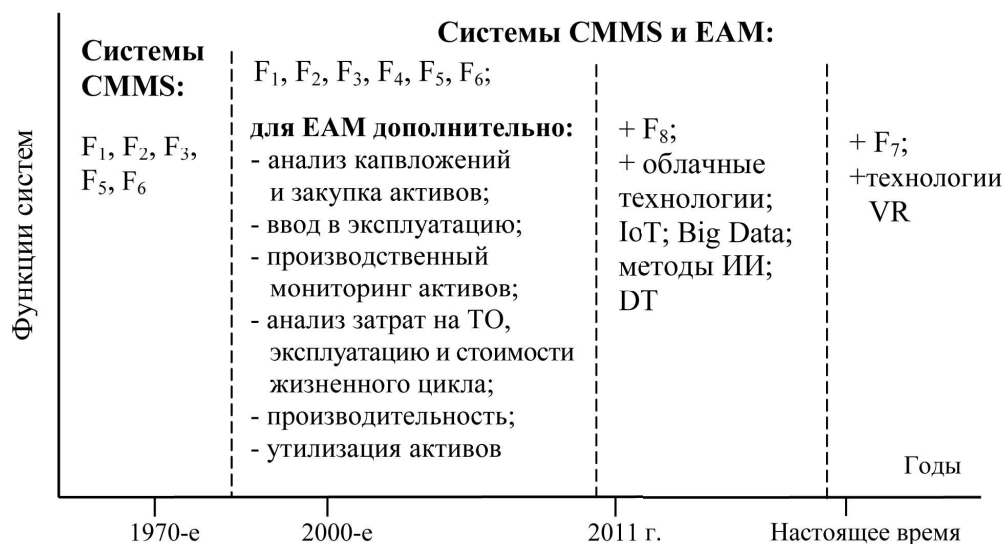
После 2011 года наблюдается интеграция ЕАМ-систем с основными трендами цифровой экономики (Industry 4.0) – облачные технологии, большие данные (Big Data), Интернет вещей (IoT), предиктивная аналитика, искусственный интеллект (ИИ) и цифровые двойники физических объектов (Digital Twin, DT) [8, 17]. Более точно функцию F₈ пока следует понимать, как возможность применения стратегии предиктивного ТО (PdM), основанного на обработке больших объёмов данных, получаемых с «умных» устройств.

Функциональность отечественных и зарубежных ЕАМ-систем в целом является схожей, при этом они охватывают интересы предприятий с разными объёмами производства. Про-





грессивным отличием многих российских продуктов является стремление обеспечить возможность работы с 3D-моделями оборудования, что позволяет пользователям более наглядно визуализировать обслуживаемые объекты в технологических документах, видео инструкциях или анимации. Интеграция с продуктами PDM/PLM стимулирует использование в EAM развивающегося тренда цифровой экономики – виртуальная реальность (Virtual Reality, VR). Важной особенностью современных систем EAM, является автоматизация максимального набора инженерных задач в области управления жизненным циклом изделий, а развитие на их базе инструментов Industry 4.0 и цифровых методов контроля и управления техническим состоянием машин переводит данные системы в категорию интеллектуальных [7, 22]. Обработка больших массивов данных в таких системах осуществляется с применением искусственных нейронных сетей, позволяя выйти на качественно новый уровень реализации стратегий ТОР по состоянию машин.



Этапы развития информационных систем CMMS и EAM

Этапы развития информационных систем CMMS и EAM

В условиях цифровизации сельскохозяйственного производства исследование и развитие интеллектуальных методов происходит в сферах управления процессами эксплуатации [23], удалённого диагностирования и управления ТОР машин [4, 12, 21], дистанционной оценке параметров надёжности технических объектов [11], а также резервирования и материального обеспечения производства [16]. Многие из подобных методов легко могут дополнить и усовершенствовать имеющийся инструментарий известных EAM при их адаптации к условиям отечественного АПК. Внедрение цифровых технологий и интеллектуальных систем в процесс диагностирования сельскохозяйственной техники позволит до 1,5 раза снизить трудоёмкость всех проводимых операций [7].

В данной статье мы рекомендуем несколько важных с нашей точки зрения направлений совершенствования CMMS и EAM-систем, которые будут способствовать их более широкому применению в российском АПК.

1. Адаптация имеющихся систем CMMS и EAM к специфике отечественного сельхозпроизводства и к стандартам РФ в области ТО и надёжности технических систем через разработку типовых моделей данных, ориентированных на решение задач управления эксплуатационной надёжностью сельскохозяйственной техники. Наличие логических противоречий на уровне информационных моделей данных затрудняет внедрение существующих EAM в российском АПК. Здесь следует выработать отраслевой стандарт на структуру типовых информационных моделей данных для систем типа EAM. В работе [14] предложена информационная модель данных для системы процессного управления ТОР сельскохозяйственной техники, а в работе [15] показан подход к созданию управляющих систем на основе моделей данных, обеспечивающих многостороннюю информационную поддержку деятельности организаторов и исполнителей сервисных работ с учётом требований охраны труда и окружающей среды. Актуальность требований безопасности показана в работе [20]. При планировании графиков ТО машин система должна учитывать рекомендации изготовителей



относительно планово-предупредительного характера обслуживания. Далее нужно обеспечить возможность корректировать эти графики в программе с учётом реального состояния объектов или с помощью методов RCM (Reliability-Centered Maintenance) – ТО, ориентированное на обеспечение безотказности (ГОСТ Р 27.606-2013).

2. Информационная система должна обеспечивать возможность оценки применяемых для парка машин стратегий ТОР с помощью комплексных показателей надёжности – коэффициент готовности, коэффициент технического использования и другим (ГОСТ Р 27.002-2015 и 27.010-2019). В работах [5, 14] рассмотрен вариант CMMS-системы с такими оценочными показателями, а также предложена методика оценки качества подобного ПО.

3. Программное обеспечение должно решать задачи резервирования запасных частей машин, прогнозирования потребности предприятия в топливе на основании данных о потреблении ресурсов в прошлые годы с использованием методов искусственного интеллекта – нейросеть, генетический алгоритм [16].

4. Интеграция ПО с системой ГЛОНАСС предприятия позволит автоматизировать первичный учет наработки машин по топливу и повышает возможности анализа затрат времени смены.

5. Автоматизация процесса разработки технологической документации на выполнение сервисных работ для инженера эксплуатирующего предприятия является актуальной задачей, поскольку это повысит качество работ ТОР. Система должна позволять создавать не только операционные карты, но и маршрутно-технологические графики (МТГ) на виды ТО [15]. Этот документ имеет привязку к конкретному предприятию. Визуализация МТГ и его составляющих может выполняться как в традиционном виде, так и с использованием методов VR. Информационный контент сложных с технологической точки зрения операций целесообразно представлять в виде анимации.

Влияние системы ЕАМ на эффективность управления жизненным циклом сельскохозяйственной техники комплексно оценим с помощью показателя общей эффективности оборудования ОЕЕ, который учитывает простои, снижение скорости работы и потерю качества [1, 19]

$$ОЕЕ = \text{Доступность} \times \text{Производительность} \times \text{Качество}. \quad (1)$$

Критерий Доступность (Готовность) учитывает потери от простоев и рассчитывается как

$$\text{Доступность} = \frac{\text{Фактическое рабочее время}}{\text{Планируемое производственное время}}. \quad (2)$$

Критерий Производительность учитывает снижение скорости работы оборудования и в простом виде рассчитывается по формуле

$$\text{Производительность} = \frac{\text{Фактическая производительность}}{\text{Максимально возможная производительность}}. \quad (3)$$

Применительно к машинно-тракторному агрегату (МТА) или зерноуборочному комбайну формулу (3) можно записать в следующем виде

$$\text{Производительность} = \frac{0,1B_p V_\phi T_{см} \tau_\phi}{0,1B_p V_{ТУ} T_{см} \tau_{\max}} = \frac{V_\phi \tau_\phi}{V_{\max} \tau_{\max}}. \quad (4)$$

где B_p – рабочая ширина захвата агрегата или жатки, м; V_ϕ , V_{\max} – соответственно фактическая рабочая скорость и максимальная рабочая скорость машины на полевой операции, разрешённая агротребованиями или ТУ, км/ч; $T_{см}$ – продолжительность смены, ч; τ_ϕ , τ_{\max} – соответственно фактический и максимально возможный (по ТУ) коэффициент использования времени смены.

Качество учитывает потери в качестве и рассчитывается как

$$\text{Качество} = \frac{\text{Объём годной продукции}}{\text{Фактический выпуск продукции}}. \quad (5)$$

Модули по расчету показателя ОЕЕ реализованы в некоторых информационных системах ЕАМ [1]. В мировой практике для стационарного промышленного оборудования

принято считать хорошим показатель ОЕЕ – более 75% (промышленные лидеры в непрерывных производствах имеют значения 80–85%), удовлетворительным – от 65% до 75%, плохим – менее 65% [19]. Для сельскохозяйственной техники пороговые значения показателя ОЕЕ будут существенно ниже, поскольку здесь использование машин дискретно и они являются мобильными.

В данном исследовании выполнили расчёт эталонного (нормативного) значение показателя ОЕЕ для зерноуборочного комбайна ACROS, с которым в дальнейшем сравнивали его фактические значения. Максимально возможное значение критерия *Доступность* определяли по данным протоколов испытаний комбайнов в МИС, путём анализа составляющих затрат времени смены машин в условиях испытательных центров. В качестве фактического рабочего времени в формуле (2) рассматривали сумму времени чистой работы, времени поворотов и переездов по полю, времени выгрузки зерна, поскольку это элементы технологического процесса уборки и комбайн здесь используется на рабочем участке (поле) по назначению. Для нормативной продолжительности смены 7 часов эталонное значение критерия *доступность* составило 0,805 (80,5%).

Расчёт эталонного значения критерия *Производительность* по формуле (4) можно выполнять с учётом рекомендаций ТУ 4735-009-70658126-2006, в которых для комбайнов ACROS установлена максимальная рабочая скорость $V_{\max} = 10$ км/ч и коэффициент использования времени смены $\tau_{\max} = 0,72$. Однако реальная рабочая скорость комбайна ограничивается требованиями к качеству уборочных работ по параметрам потерь зерна, поэтому здесь логичней использовать максимальную рабочую скорость, установленную агротребованиями на операцию. Рекомендуемая скорость движения комбайна на уборке зерновых культур при урожайности свыше 40 ц/га – 4,6...7,3 км/ч [18]. Мы выполнили анализ протоколов испытаний комбайнов ACROS моделей 550, 585 и 595 Plus в Северо-Кавказской и Кубанской МИС, а также отчетов данных МИС по результатам мониторинга потребительских свойств указанных комбайнов в условиях эксплуатации. Согласно этих документов, на уборке озимой пшеницы с урожайностью свыше 50 ц/га среднее значение параметра $V_{\phi} = 4,51$ км/ч, а среднее значение коэффициента τ_{ϕ} составляет 0,71. Тогда эталонное значение критерия *Производительность* для максимальной рабочей скорости движения, установленной ТУ, будет равно

$$\text{Производительность} = \frac{4,51 \cdot 0,71}{10 \cdot 0,72} = 0,44 \text{ (44 \%)}.$$

Для максимальной скорости, установленной агротребованиями на операцию, этот критерий будет равен

$$\text{Производительность} = \frac{4,51 \cdot 0,71}{7,3 \cdot 0,72} = 0,61 \text{ (61 \%)}.$$

При расчёте эталонного критерия *Качество* руководствовались исследованием [2], где автор для комплексной оценки качества работы зерноуборочного комбайна принимает во внимание два частных показателя – прямые потери и дробление зерна. Для Северо-Кавказского региона в благоприятных условиях уборки при прямом комбайнировании допускается 2,5 % прямых потерь и 2% дробления зерна [18]. Суммарные допускаемые потери зерна составляют 4,5%, поэтому эталонным значением критерия *Качество* в данной работе примем 95,5%.

Тогда эталонное значение показателя ОЕЕ комбайна по формуле (1) для условий ТУ и для агротехнических требований соответственно будет равно

$$OEE_{\phi 1} = 0,805 \cdot 0,44 \cdot 0,955 = 0,338 \text{ (33,8 \%)},$$

$$OEE_{\phi 2} = 0,805 \cdot 0,61 \cdot 0,955 = 0,47 \text{ (47,0 \%)}.$$





Далее исследуем теоретически влияние информационной системы ЕАМ на показатель ОЕЕ комбайна. Воспользуемся результатами исследования надёжности зерноуборочных комбайнов и их баланса времени смены в рядовых условиях эксплуатации [13]. С помощью этих данных рассчитаем значение показателя ОЕЕ комбайна для текущего состояния производства, в котором не используется система типа ЕАМ. В табл. 2 сведём результаты расчёта средних потерь времени на один комбайн за период уборки зерновых культур, продолжительность которого в предприятии Ростовской области составляет в среднем 16 дней. Считаем, что комбайн ежедневно работает в две смены по 8 часов каждая.

В общем перечне непроизводительных затрат времени $T_2 - T_{10}$ внедрение ЕАМ позволит сократить время T_6 простоев машин при устранении отказов. Причём здесь может иметь место совокупный эффект за счёт автоматизации резервирования запчастей и снижения простоев комбайнов в их ожидании, а также за счёт улучшения качества ТО и соблюдения его регламентов, что снижает число отказов машин. По данным [16] применение автоматизированных методов резервирования запчастей снижает продолжительность простоев комбайнов на 37%, а по данным [14] автоматизация инженерных задач управления ТО и информационная поддержка сервисных работ снижают время пребывания машин в неработоспособном состоянии на 23%. Таким образом, в таблице 2 для варианта использования ЕАМ время простоев T_6 снижено на 60% (23+37%) и составляет 15,49 часов на комбайн за сезон уборки. Устранение простоев здесь позволяет пропорционально увеличить время T_p чистой работы комбайна, при этом коэффициент использования времени смены τ увеличивается с 0,45 до 0,54.

Таблица 2

Составляющие затрат времени для зерноуборочного комбайна

Затраты времени	В течение смены без ЕАМ, ч	Значение затрат времени за весь период уборки, час	
		Без применения ЕАМ	С применением ЕАМ
Планируемое производственное время на один комбайн T_1	8	256	256
Ожидание автомобиля T_2	1,94	62,10	62,10
Выгрузка зерна T_3	0,374	11,97	11,97
Обеденный перерыв T_4	0,282	9,02	9,02
Время ЕТО T_5	0,2552	8,17	8,17
Простои при устранении отказов T_6	1,21	38,72	15,49
Очистка измельчителя T_7	0,0132	0,4224	0,4224
Время переезда на поле T_8	0,132	4,224	4,224
Время переездов по полю T_9	0,048	1,536	1,536
Время на повороты T_{10}	0,154	4,93	4,93
Время чистой работы T_p	3,6	115,2	138,43
Коэффициент τ	0,45	0,45	0,54

Далее в табл. 3 представлены значения критериев Доступность, Производительность, Качество и общий показатель эффективности ОЕЕ для комбайна в рассматриваемых вариантах организации управления жизненным циклом. Уровень качества уборочных работ в обоих вариантах принят 95,5 %.

Данные табл. 3 показывают, что внедрение системы ЕАМ в хозяйстве позволит увеличить показатель ОЕЕ зерноуборочного комбайна с 19,2 до 27,1 %. При этом частный критерий *Доступность* техники увеличивается в 1,17 раза а критерий *Производительность* (по агротребованиям) – в 1,2 раза. Следует отметить низкие фактические значения показателя ОЕЕ машин в реальном производстве. Для комбайна ACROS он в 1,73 раза меньше рассчитанного эталонного значения, следовательно в реальном производстве есть резервы для улучшения эффективности

Расчет показателя ОЕЕ для комбайна

Показатель	Без применения ЕАМ	С применением ЕАМ
Доступность, % $\frac{T_p + T_3 + T_9 + T_{10}}{T_1}$	$\frac{133,67}{256} = 0,522, (52,2 \%)$	$\frac{156,87}{256} = 0,613, (61,3 \%)$
Производительность, %	По ТУ – 28,2 По агротребованиям – 38,6	По ТУ – 33,8 По агротребованиям – 46,3
Качество, %	95,5	95,5
ОЕЕ, %	По ТУ – 14,0 По агротребованиям – 19,2	По ТУ – 19,8 По агротребованиям – 27,1

Заключение. В результате исследований установлено, что ЕАМ-системы не популярны в отечественной агроинженерной сфере, но при этом с их помощью можно автоматизировать комплекс задач по управлению жизненным циклом эксплуатируемых машин, определять показатели их надёжности и решать вопросы материального обеспечения производства. Показаны основные этапы развития ЕАМ, где после 2011 года наблюдается их интеграция с инструментами цифровой экономики, что переводит ЕАМ в категорию интеллектуальных систем управления техническим состоянием машин.

Предложены рекомендации по адаптации ЕАМ к условиям отечественного агробизнеса, основанные на применении информационных моделей данных, соответствующих действующим отечественным ГОСТам в области ТО и надёжности сельхозтехники, а также использовании в системах технологических документов, проверенных передовой отечественной практикой.

Определено эталонное значение показателя общей эффективности ОЕЕ для зерноуборочных комбайнов ACROS, равное 47 %, которое отражает степень реализации возможностей машины при соблюдении агротребований к скоростному режиму при идеальной организации полевых работ. Фактическое значение показателя ОЕЕ комбайнов в условиях реальной эксплуатации равно 19,2%. Теоретически установлено, что при использовании системы ЕАМ коэффициент использования времени смены повышается на 20 %, а показатель ОЕЕ комбайнов может быть увеличен в 1,41 раза за счёт сокращения простоев машин по техническим причинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акланов Ф.А., Нургалева Ю.А., Смирнов О.О., Хасанов Е.Р., Петросян М.О. Оценка общей эффективности оборудования при поддержке принятия решений по техническому обслуживанию и ремонту // Решетневские чтения. 2014. №18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-obschey-effektivnosti-oborudovaniya-pri-podderzhke-prinyatiya-resheniy-po-tehnicheskomu-obsluzhivaniyu-i-remontu> (дата обращения: 23.07.2023)
2. Бердышев В. Е. Комплексный показатель качества работы зерноуборочного комбайна // Известия НВ АУК. 2010. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-pokazatel-kachestva-raboty-zernouborochnogo-kombayna> (дата обращения: 23.07.2023)
3. Глечикова Н.А., Рева А.Ф., Серёгин А.А., Коровин Ю.И. Анализ и прогноз изменения парка сельскохозяйственной техники и объёмов внесения удобрений в ростовской области // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № S4. С. 61–74.
4. Гольпяпин В.Я., Голубев И.Г. Цифровой мониторинг состояния парка сельскохозяйственной техники // В сборнике: Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК. Материалы XI Международной научно-практической интернет конференции. 2019. С. 256–261.
5. Гринченков Д.В., Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Мезенцева А.Ю. Оценка качества программного обеспечения для управления техническим сервисом машин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2021. № 4. С. 11–16. DOI: 10.17213/1560-3644-2021-4-11-16.



6. Джамай Е.В., Сазонов А.А., Демин С.С. Цифровая трансформация производства на основе управления жизненным циклом изделий «PLM+» в рамках концепции «Индустрия 4.0.» // *Modern Economy Success*. 2019. № 5. С. 36–44.

7. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 45–50. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-45-50

8. Зозуля Д.М. Цифровизация российской экономики и Индустрия 4.0: вызовы и перспективы // *Вопросы инновационной экономики*. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-rossiyskoy-ekonomiki-i-industriya-4-0-vyzovy-i-perspektivy> (дата обращения: 15.04.2023).

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

10. Комаров В.А., Курашкин М.И. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период // *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31. № 2. С. 188–206.

11. Костомахин М.Н. Устройство дистанционного онлайн мониторинга параметров надежности сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2022. № 1. С. 36–43.

12. Костомахин М.Н., Пестряков Е.В. Программный комплекс для дистанционного контроля узлов и агрегатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022;16(4):19–25. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-19-25>.

13. Лебедев А.Т., Павлюк Р.В., Захарин А.В., Лебедев П.А. Исследования надежности зерноуборочных комбайнов в рядовых условиях эксплуатации на примере ставропольского края // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. № 3 (28). С. 409–415.

14. Лесник Н.А. Совершенствование организации технического обслуживания сельскохозяйственной техники с применением специализированного программного обеспечения: автореф. ... дис. канд. тех. наук. Зерноград, 2022. 20 с.

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. DOI: 10.55618/20756704_2022_15_2_39–53.

16. 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>.

17. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. М. ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с., ISBN 978-5-98094-008-9.

18. Разработка операционных технологий выполнения сельскохозяйственных механизированных работ: методические рекомендации / Сост. Г.Г. Маслов, Е.В. Припоров, А.В. Палапин; Кубанский гос. аграрный университет. Краснодар, 2011. 191 с.

19. Россоха Е.В. Оценка эффективности управления оборудованием на предприятии // *Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление*. 2014. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-upravleniya-oborudovaniem-na-predpriyatii> (дата обращения: 11.07.2023).

20. Хабардин В.Н. Проблемы и концепция технического обслуживания машин в сельском хозяйстве: монография. Иркутск: Изд-во ИрГАУ. 2020. 124 с.

21. Щукина В.Н., Девянин С.Н., Казанцев С.П., Перевозчикова Н.В. Разработка алгоритма поиска неисправности при удаленной диагностике // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 6. С. 20–24. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-20-24>.

22. Lee, Jay & Ni, Jun & Singh, Jaskaran & Jiang, Baoyang & Azamfar, Moslem & Feng, Jianshe. (2020). Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 142. 1–40. DOI: 10.1115/1.4047856.

23. Maya Sukhanova, Valentina Miroshnikova, Andrey Bondarev, Andrey Sukhanov, Intelligent system for managing dynamic processes of seed preparation for sowing-”must-have” within of the concept of digital transformation for crop production, IOP conference series: earth and environmental science, 659, 012001 (2021) doi: 10.1088/1755-1315/659/1/012001.

24. Wienker, Michael & Henderson, Ken & Volkerts, Jacques. (2016). The Computerized Maintenance Management System an Essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering*. 138. 413–420. 10.1016/j.proeng.2016.02.100.

REFERENCES

1. Aklanov F.A., Nurgaleeva Yu.A., Smirnov O.O., Khasanov E.R., Petrosyan M.O. Assessing the overall efficiency of equipment to support decision-making on maintenance and repair. *Reshetnev Readings*. 2014; 18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-obschey-effektivnosti-oborudovaniya-pri-podderzhke-prinyatiya-resheniy-po-tehnicheskomu-obsluzhivaniyu-i-remontu> (date of access: 07/23/2023)

2. Berdyshev V. E. Complex indicator of the quality of work of a grain harvester. *Izvestia NV AUK*. 2010;2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-pokazatel-kachestva-raboty-zernoborochnogo-kombayna> (access date: 07/23/2023)





3. Glechikova N.A., Reva A.F., Seregin A.A., Korovin Yu.I. Analysis and forecast of changes in the fleet of agricultural machinery and volumes of fertilizer application in the Rostov region. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2018;S4: 61–74.
4. Goltypin V.Ya., Golubev I.G. Digital monitoring of the state of the agricultural machinery fleet. *Scientific and information support for innovative development of the agro-industrial complex*. Materials of the XI International Scientific and Practical Internet Conference. 2019:256–261.
5. Grinchenkov D.V., Nikitchenko S.L., Lesnik N.A., Mezentsseva A.Yu. Assessing the quality of software for managing technical service of machines. *News of universities. North Caucasus region. Technical science*. 2021;4:11–16. DOI: 10.17213/1560-3644-2021-4-11-16.
6. Jamai E.V., Sazonov A.A., Demin S.S. Digital transformation of production based on product lifecycle management “PLM+” within the framework of the “Industry 4.0” concept. *Modern Economy Success*. 2019;5:36–44.
7. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of agricultural machinery. *Agroengineering*. 2021;2 (102):45–50. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-45-50.
8. Zozulya D.M. Digitalization of the Russian economy and Industry 4.0: challenges and prospects. *Issues of innovative economics*. 2018;1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-rossiyskoy-ekonomiki-i-industriya-4-0-vyzovy-i-perspektivy> (date of access: 04/15/2023).
9. Izmailov M.K. Comparative analysis of modern EAM systems used in Russian and foreign practice. *BENEFICIUM*. 2020; 2 (35):35–42. DOI: [http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2\(35\)](http://doi.org/10.34680/BENEFICIUM.2020.2(35)).
10. Komarov V.A., Kurashkin M.I. Study of the performance of grain harvesters during the warranty period. *Engineering technologies and systems*. 2021;31;2:188–206.
11. Kostomakhin M.N. Device for remote online monitoring of reliability parameters of agricultural machinery. *Agricultural machinery: maintenance and repair*. 2022;1:36–43.
12. Kostomakhin M.N., Pestryakov E.V. Software package for remote control of components and assemblies. *Agricultural machines and technologies*. 2022; 16(4): 19–25. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-19-25>.
13. Lebedev A.T., Pavlyuk R.V., Zakharin A.V., Lebedev P.A. Research on the reliability of grain harvesters under normal operating conditions using the example of the Stavropol region. *Innovations in agriculture*. 2018;3 (28):409–415.
14. Lesnik N.A. Improving the organization of technical maintenance of agricultural machinery using specialized software: Ph.D. thesis. Zernograd, 2022. 20 p.
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. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2022;15;2 (58):39-53. DOI: 10.55618/20756704_2022_15_2_39-53.
16. Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Improving methods for reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms. *Agroengineering*. 2022; 24; 6:25–31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>.
17. Prokhorov A., Lysachev M. Scientific editor Professor Borovkov A. Digital twin. Analysis, trends, world experience. First edition, corrected and expanded. Moscow, 2020. 401 p. ISBN 978-5-98094-008-9.
18. Development of operational technologies for performing agricultural mechanized work: methodological recommendations / Comp. G.G. Maslov, E.V. Priporov, A.V. Palapin. Krasnodar, 2011. 191 p.
19. Rossokha E.V. Assessing the efficiency of equipment management at an enterprise. *Proceedings of BSTU. Series 5: Economics and management*. 2014;7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-upravleniya-oborudovaniem-na-predpriyatii> (date of access: 07/11/2023).
20. Khabardin V.N. Problems and concepts of machine maintenance in agriculture: monograph. Irkutsk: IrSAU Publishing House, 2020. 124 p.
21. Shchukina V.N., Devyanin S.N., Kazantsev S.P., Perevozchikova N.V. Development of a fault finding algorithm for remote diagnostics. *Agroengineering*. 2022; 24;6: 20–24. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6>.
22. Lee, Jay & Ni, Jun & Singh, Jaskaran & Jiang, Baoyang & Azamfar, Moslem & Feng, Jianshe. (2020). Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 142. 1–40. DOI: 10.1115/1.4047856.
23. Maya Sukhanova, Valentina Miroshnikova, Andrey Bondarev, Andrey Sukhanov, Intelligent system for managing dynamic processes of seed preparation for sowing-”must-have” within of the concept of digital transformation for crop production, IOP conference series: earth and environmental science, 659, 012001 (2021) doi: 10.1088/1755-1315/659/1/012001.
24. Wienker, Michael & Henderson, Ken & Volkerts, Jacques. (2016). The Computerized Maintenance Management System an Essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering*. 138. 413–420. 10.1016/j.proeng.2016.02.100.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 10.07.2023.
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 10.07.2023.