

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-567812>

Оригинальное исследование



Концептуальные направления развития беспилотных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения

И.А. Старостин, А.В. Ещин, Т.З. Годжаев, С.А. Давыдова

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время крупные мировые разработчики и производители в области мобильных сельхозмашин ведут работы над созданием сельскохозяйственных роботизированных систем. Особое внимание уделяется разработке универсальных беспилотных мобильных энергетических средств (МЭС), позволяющих автономно выполнять различные технологические операции без участия человека. В перспективе это позволит исключить оператора непосредственно из процесса управления МЭС и пересмотреть подходы к вопросу повышения эффективности выполнения технологических операций. Существующий тренд повышения производительности за счёт увеличения основных параметров агрегата: ширины захвата, рабочих скоростей, грузоподъёмности и т. д. — может измениться на альтернативный путь, заключающийся в применении сопоставимого по производительности множества автономных малогабаритных агрегатов (рой сельскохозяйственных роботов). Таким образом, применение беспилотных систем управления позволяет использовать концептуально новые подходы к созданию МЭС сельскохозяйственного назначения. В связи с этим становится актуальным проведение исследований, направленных на выявление перспективных концептуальных направлений развития беспилотных МЭС и оценку эффективности их применения.

Цель исследования — выявление концептуальных направлений развития беспилотных МЭС сельскохозяйственного назначения и теоретическая оценка эффективности их применения.

Методы. Объектом исследования являлся процесс трансформации МЭС в условиях развития беспилотных систем управления. Основой исследования послужили научные публикации по вопросам развития роботизированных средств сельскохозяйственного назначения, информационные материалы предприятий-изготовителей сельскохозяйственных тракторов и систем управления сельскохозяйственной техникой. В процессе исследования использовались такие методы, как информационный анализ, синтез, методики расчёта производительности сельскохозяйственных агрегатов и приведённой себестоимости выполнения технологических операций, адаптированные ФГБНУ ФНАЦ ВИМ применительно к беспилотным МЭС.

Результаты. Проанализированы перспективы внедрения беспилотных МЭС, существующие цифровые и интеллектуальные системы управления МЭС и основные факторы, сдерживающие их развитие. Предложена классификация МЭС сельскохозяйственного назначения по уровням автоматизации. Выявлены основные направления развития и предложены концептуальные модели беспилотных МЭС: универсальные беспилотные МЭС (беспилотные тракторы) с сохранением существующей градации по тяговому классу и мощности, универсальные (многофункциональные) беспилотные МЭС малой мощности одного тягового класса, отдельные энергетические модули, объединяющиеся в единый беспилотный агрегат на базе агрегируемой сельскохозяйственной машины. Предложена методика, и осуществлён расчёт эквивалентного количества беспилотных МЭС каждой концептуальной модели для каждого тягового класса. Осуществлена оценка влияния применения беспилотных МЭС предложенных концептуальных моделей на производительность пахотного агрегата и приведённую себестоимость выполнения пахотных работ.

Заключение. Разработаны концептуальные модели развития беспилотных МЭС и произведены сравнительные расчёты эффективности их применения в составе агрегатов для вспашки, позволяющие дать оценку возможным перспективам их использования.

Ключевые слова: мобильное энергетическое средство; концепция; беспилотный трактор; система управления; уровень автоматизации.

Как цитировать:

Старостин И.А., Ещин А.В., Годжаев Т.З., Давыдова С.А. Концептуальные направления развития беспилотных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 1. С. 23–37. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-567812>

Рукопись получена: 28.07.2023

Рукопись одобрена: 25.01.2024

Опубликована онлайн: 15.03.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-567812>

Original Study Article

Conceptual directions for the development of driverless agricultural mobile power units

Ivan A. Starostin, Alexander V. Eshchin, Teimur Z. Godzhaev, Svetlana A. Davydova

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Currently, major global developers and manufacturers in the field of mobile agricultural machinery are working on the development of agricultural robotic systems. Particular attention is paid to the development of universal driverless mobile power units (MPU) capable of performing various technological operations autonomously, without human intervention. In the future, this makes it possible to exclude the operator from the MPU control process and to reconsider approaches to the issue of increasing the efficiency of technological operations. The existing trend of productivity improvement by increasing the main parameters of the unit, such as operating width, operating velocities, load capacity, etc., may change to an alternative path consisting in the use of numerous autonomous small-sized units comparable in performance (a swarm of agricultural robots). Thus, the use of driverless control systems makes it possible to use conceptually new approaches to the development of agricultural MPUs. In this regard, it becomes relevant to conduct the study aimed at identifying promising conceptual directions for the development of driverless MPUs and evaluating the efficiency of their application.

AIM: Identification of conceptual directions for the development of driverless MPUs and a theoretical assessment of the efficiency of their application.

METHODS: The study object was the MPU transformation in the context of the development of driverless control systems. The study was based on scientific publications on the development of robotic agricultural tools, informational data of manufacturers of agricultural tractors and control systems for agricultural machinery. In the course of the study, such methods as information analysis, synthesis, methods of performance analysis of agricultural units and analysis of present cost of performing technological operations, adapted for driverless MPUs by the VIM, were used.

RESULTS: The prospects for the introduction of driverless MPUs, the existing digital and intelligent control systems of MPUs and the main factors hindering their development are analyzed. A classification of agricultural MPUs according to automation levels is proposed. The main directions of development are identified and conceptual models of driverless MPUs are proposed: universal driverless MPUs (driverless tractors) with keeping the existing traction class and power classification, universal (multifunctional) low-power driverless MPUs of the only traction class, separate power modules capable of being combined into a single driverless unit based on the coupled agricultural machine. The method is proposed and the equivalent number of driverless MPUs of each conceptual model for each traction class is calculated. An assessment of the impact of the use of the proposed conceptual models of driverless MPUs on the arable unit performance and the present cost of arable operations has been carried out.

CONCLUSIONS: Conceptual models for the advancing of driverless MPUs have been developed and comparative calculations of the efficiency of their application as part of arable units, helping to assess the possible prospects for their use, have been made.

Keywords: mobile power units; concept; driverless tractor; control system; automation level.

To cite this article:

Starostin IA, Eshchin AV, Godzhaev TZ, Davydova SA. Conceptual directions for the development of driverless agricultural mobile power units. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):23–37. doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-567812>

Received: 28.07.2023

Accepted: 25.01.2024

Published online: 15.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития сельского хозяйства является переход к высокопродуктивному, экологически чистому агрохозяйству. Данный переход заключается в применении в сельском хозяйстве цифровых, информационных, интеллектуальных технологий и роботизированных комплексов, способствующих комплексному решению задачи повышения эффективности производства сельскохозяйственной продукции [1], [2]. Это подразумевает принципиально новый подход к управлению процессами производства сельскохозяйственной продукции [3].

В настоящее время крупные мировые разработчики и производители в области мобильных сельхозмашин ведут работы над созданием сельскохозяйственных роботов и роботизированных систем [4]. Особое внимание уделяется разработке универсальных беспилотных МЭС, позволяющих автономно выполнять различные технологические операции без участия человека [5].

Автоматизация и роботизация сельскохозяйственного производства позволяет комплексно подойти к решению ряда проблем отрасли и обеспечить:

- повышение производительности труда и исключение ручного труда;
- снижение или исключение влияния человеческого фактора на результаты производства;
- оптимизацию затрат и снижение себестоимости производимой продукции;
- наиболее полную реализацию продукционного потенциала сельскохозяйственных растений и животных и снижение потерь продукции за счёт точного соблюдения агротехнологий;
- повышение энергоэффективности и экологической безопасности сельскохозяйственной техники;
- повышение безопасности выполнения технологических операций и снижение влияния на человека вредных производственных факторов;
- повышение эффективности использования парка сельскохозяйственной техники.

Внедрение цифровых технологий в МЭС превращает тракторы и самоходные комбайны с традиционной компоновочной схемой в интеллектуальные машины, которые соединяются с навесными и прицепными машинами за счёт не только механических связей (навесная система, прицепное устройство, гидросистема, вал отбора мощности), но и информационных (электронных) [6]. Автоматика управляет глубиной обработки почвообрабатывающих агрегатов, обеспечивает высокую точность высева семян, норму внесения удобрений с использованием спутниковых навигационных систем, дистанционную настройку машин в полевых условиях через Интернет-соединение. Такая связь позволяет выбрать режим работы агрегата в зависимости от агроклиматических условий, агрофона, геометрических параметров поля и т. д. [7], [8].

Современные тракторы уже оснащаются интеллектуальными системами управления двигателем и режимами работы трансмиссии. В совокупности они вырабатывают оптимальный режим работы в зависимости от загрузки, что позволяет наиболее эффективно использовать мощность двигателя, снизить расход топлива и сократить вредные выбросы. Всё большее распространение получают автоматизированные системы управления навесной системой, валом отбора мощности, гидравлическим приводом сельскохозяйственных машин. Наиболее широкое применение в последнее время получили системы автоматического вождения, которые в первую очередь облегчают работу с широкозахватными машинами, позволяют минимизировать потери продукции и времени, повысить качество проведения технологических операций [9].

Таким образом, применение беспилотных систем управления позволяет использовать концептуально новые подходы к созданию МЭС сельскохозяйственного назначения. В связи с этим становится актуальным проведение исследований, направленных на выявление перспективных концептуальных направлений развития беспилотных МЭС и оценку эффективности их применения.

Цель исследования — выявление концептуальных направлений развития беспилотных МЭС сельскохозяйственного назначения и теоретическая оценка эффективности их применения.

МЕТОДЫ

Объектом исследования являлся процесс трансформации МЭС в условиях развития беспилотных систем управления. Основой исследования послужили научные публикации по вопросам развития роботизированных средств сельскохозяйственного назначения, информационные материалы предприятий-изготовителей сельскохозяйственных тракторов и систем управления сельскохозяйственной техникой. В процессе исследования использовались такие методы, как информационный анализ, синтез, методики расчёта производительности сельскохозяйственных агрегатов и приведённой себестоимости выполнения технологических операций, адаптированные ФГБУ ФНАЦ ВИМ применительно к беспилотным МЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Переход к цифровому сельскому хозяйству подразумевает использование МЭС с электронными системами управления. Применение данных систем является одним из первых шагов в процессе перехода к беспилотным МЭС, которые в ближайшей перспективе смогут самостоятельно выполнять технологические операции под контролем оператора, находящегося непосредственно в кабине, а в дальнейшей перспективе — автономно работать на поле под дистанционным контролем оператора,

находящегося в диспетчерском пункте и следящего за работой нескольких технических средств [6].

В настоящее время уже совершаются серьёзные шаги, позволяющие создавать МЭС с автоматическим управлением движением мобильного средства (автопилотом), но с сохранением оператора, находящегося непосредственно в кабине.

Начальными этапами создания автоматически управляемых МЭС являются применение систем параллельного вождения на базе навигационных систем GPS / ГЛОНАСС по загруженной карте-заданию конкретного поля. По своей сути это электронные ассистенты, помогающие оператору управлять трактором или самоходной сельскохозяйственной машиной. Различают несколько уровней систем параллельного вождения: курсоуказатели (агронавигаторы), подруливающие устройства и системы автопилотирования [9], [10].

Курсоуказатели представляют из себя навигационные системы сельскохозяйственного назначения. При их использовании оператор управляет трактором или самоходной сельскохозяйственной машиной, ориентируясь на показания курсоуказателя. Данные системы наиболее просты в установке и относительно недороги, а их точность может достигать 2 см (при наличии базовой RTK станции), что позволяет двигаться с минимальными отклонениями от заданной траектории и обеспечивать минимальную ширину перекрытия агрегата. Однако точность движения агрегата с агронавигатором в высокой степени зависит от квалификации оператора, быстроты его реакции. При наличии данной системы оператор вынужден держать под контролем не только протекание технологического процесса, но и соответствие направления движения трактора заданному курсу. Курсоуказатели находят наибольшее применение при выполнении технологических операций, не требующих высокой точности: внесение жидких и твёрдых органических и минеральных удобрений, боронование и т. п.

Подруливающие устройства представляют собой агронавигатор, дополненный механическим устройством подруливания, автоматически корректирующим направление движения трактора или самоходной сельскохозяйственной машины согласно заданному курсу. Подруливающее устройство в большинстве случаев устанавливается как дополнительный привод рулевого колеса сбоку от него или непосредственно вместо него. В основе подруливающего устройства находится управляемый электронной системой электродвигатель, передающий крутящий момент на рулевое колесо или вал механизма рулевого управления трактора. Точность вождения в загонке при использовании подруливающих устройств фактически не зависит от квалификации или уровня концентрации оператора, однако она зависит от технического состояния и общих технических возможностей установленной на тракторе рулевой системы. Подруливающие устройства находят применение при выполнении требующих достаточно высокой

точности технологических операций, таких как основная и предпосевная обработка почвы, посев и посадка сельскохозяйственных культур, опрыскивание, уборка урожая.

Системы автопилотирования представляют собой агронавигатор с устанавливаемым в гидравлическую систему рулевого управления гидравлическим блоком, управляемым электронной системой. В этом случае для повышения точности вождения применяются датчики поворота управляемых колёс. Использование таких систем позволяет обеспечить автономное вождение не только в загонке, но и при осуществлении разворотов. Благодаря этому оператор может сконцентрироваться на контроле за протеканием технологического процесса и техническим состоянием машинно-тракторного агрегата. Системы автопилотирования могут применяться при выполнении практически всех технологических операций от обработки почвы до уборки урожая и особенно эффективны при выполнении требующих высокой точности операций по уходу за сельскохозяйственными культурами, в частности при междурядной обработке пропашных сельскохозяйственных культур.

Во всех системах параллельного вождения, базирующихся на навигационной системе GPS/ГЛОНАСС, повышение точности позиционирования до 2...3 см достигается при использовании базовой станции RTK, зона действия которой ограничена в большинстве случаев несколькими километрами или подключением платных поправок [9].

Дальнейшее развитие систем автопилотирования сельскохозяйственных тракторов идёт в направлении повышения уровня автоматизации и безопасности эксплуатации сельскохозяйственных машин и агрегатов (рис. 1). Достигают этого за счёт применения технического зрения и элементов искусственного интеллекта.

Компанией Cognitive Pilot разработана система беспилотного вождения Agro Pilot, базирующаяся на искусственном интеллекте. В основе системы лежит технология глубокого обучения нейронных сетей. Состав комплекта системы автоматического вождения Cognitive Agro Pilot включает блок управления с нейропроцессором для автономного вождения, цветные видеокамеры, планшет управления, цифровой гидроблок для управления рулевым механизмом, датчики углов поворота колёс. Данная система позволяет осуществлять автономное (без участия оператора) движение трактора или самоходной сельскохозяйственной машины на поле, ориентируясь по кромке, по валку, по рядку (для пропашных культур), поддерживая заданную скорость движения. Точность вождения составляет 1–2 см при использовании GPS/ГЛОНАСС навигации с базовой станцией и RTK-поправками, а контроля скорости — в пределах 1 км/ч. Применение нейронной сети, получающей информацию от установленных камер, позволяет комбайну автоматически разворачиваться, перестраиваться на необработанные участки поля, останавливаться перед препятствием или объезжать его [11].



Рис. 1. Развитие автономных систем управления МЭС сельскохозяйственного назначения.

Fig. 1. Advancing of autonomous control systems of agricultural MPUs.

Применение рассмотренной системы автопилотирования позволяет автоматизировать часть функций, частично исключить человека из управления движением самого трактора или самоходной сельскохозяйственной машины, тем самым оператор сможет сконцентрировать внимание непосредственно на контроле и управлении технологическим процессом. Однако данная система пока ещё не обладает всем необходимым функционалом, позволяющим ей самостоятельно принимать решения во всех нестандартных ситуациях, и требует в таких случаях вмешательства оператора. В связи с этим применение данной системы автопилотирования не позволяет полностью отказать от оператора, т. е. не даёт возможности создавать беспилотные или автономные роботизированные МЭС сельскохозяйственного назначения.

Сохраняется ряд проблем, тормозящих дальнейшее развитие и внедрение автоматизированных систем управления техникой. Эффективность работы данных систем под контролем оператора весьма высока, но они пока не способны в полной мере быть автономными и при возникновении нестандартных ситуаций не могут сгенерировать оптимальное решение [12]. Вызывает недоверие к данным системам риск причинения ими материального вреда вследствие системных сбоев. Требуют проработки вопросы кибербезопасности, поскольку злоумышленники могут вывести из строя технику, уничтожить посевы или нанести какой-либо иной материальный ущерб. Требования к данным системам должны быть проработаны и закреплены в соответствующих нормативно-правовых актах.

Применение беспилотных МЭС подразумевает их взаимодействие между собой, при этом для сельскохозяйственной техники нет специально выделенной частоты, позволяющей реализовать как дистанционное управление МЭС, так и их бесконтактное взаимодействие между собой.

Другой проблемой является совместимость существующих программно-аппаратных средств различных производителей МЭС и сельскохозяйственных машин, которая должна осуществляться по единому протоколу передачи данных и через стандартизованные CAN-шины. В настоящее время используется международный протокол ISOBUS, но ещё далеко не все производители сельскохозяйственных машин, особенно отечественных, применяют на своей технике элементы данной системы. При создании беспилотных МЭС необходимо законодательно закрепить требования к применяемым частотам, протоколам передачи данных, применяемым CAN-шинам, блокам управления и контроллерам.

Одним из факторов, сдерживающих развитие отечественной роботизированной сельскохозяйственной техники и, в частности, систем беспилотного управления, является отсутствие отечественной компонентной базы: микроэлектроники, нейронных вычислителей, радаров, лидаров, камер для реализации технологий машинного зрения, базовых RTK-станций, систем спутниковой связи, приёма и передачи данных, исполнительных устройств для управления электрическими, механическими, гидравлическими и пневматическими компонентами сельскохозяйственной техники.

Необходимо отметить, что МЭС функционируют в полевых условиях и передвигаются по поверхностям, не имеющим твёрдого покрытия, в связи с чем помимо геометрической и технологической проходимости для беспилотных МЭС важна опорная проходимость, для определения которой необходимо разрабатывать датчики и системы определения несущей способности грунта и оценки возможности передвижения МЭС по данному грунту [13].

Технологии беспилотного управления различными видами технических средств интенсивно развиваются

во всех отраслях. В последнее время это направление активно развивается в сфере как коммерческого, так и личного транспорта. Множество мировых автопроизводителей заявляют о разработках в сфере создания беспилотных автомобилей. Такое бурное развитие беспилотных систем побудило к созданию регламента, отражающего уровень автоматизации управления. В 2018 году вступил в силу стандарт SAE J 3016-2018 «Классификация и систематизация, а также определения терминов, относящихся к системам автоматизации вождения для дорожных моторных транспортных средств», авторами которого выступили специалисты международного Общества инженеров автомобильной промышленности и транспорта Society of Automotive Engineers (SAE) [14].

В стандарте представлены классификация и систематизация терминов, а также определения, касающиеся систем автоматизации вождения. Используемые в стандарте термины сформулированы таким образом, чтобы сослаться на автоматизацию как часть систем транспортного средства, а не на само транспортное средство. В частности, SAE J 3016-2018 описывает автоматизированные системы управления автотранспортными средствами, которые выполняют часть или все задачи в области динамического вождения на постоянной основе и включают в себя троих основных участников вождения: человека, систему автоматизации вождения, а также другие системы и компоненты транспортного средства.

Согласно SAE J3016 стандартизировано разделение автомобилей по уровню автоматизации вождения. Предусматривается 6 уровней автоматизации вождения автомобилей:

- уровень 0 (отсутствие автоматизации вождения);
- уровень 1 (помощь водителю);
- уровень 2 (частичная автоматизация вождения);
- уровень 3 (условная автоматизация вождения);
- уровень 4 (высокая автоматизация вождения);
- уровень 5 (полная автоматизация вождения).

К уровню 0 относятся обычные автомобили, не содержащие никаких систем автоматизации. При этом некоторые системы, охватываемые уровнем 1 или уровнем 2, уже достаточно давно используются в автомобилях. К таким системам можно отнести ABS, круиз-контроль, системы курсовой устойчивости и так далее.

По аналогии с приведённым разделением автомобилей предлагается осуществить классификацию МЭС сельскохозяйственного назначения по уровню автоматизации (табл. 1).

Так, уровень 0 означает полное отсутствие электронных систем управления какими-либо функциями МЭС. Оператор в этом случае осуществляет как полное управление всеми органами МЭС, так и контроль за выполнением технологического процесса.

Уровень 1 подразумевает применение отдельных вспомогательных систем, например, использование курсоуказателей, агронавигаторов, систем подрывания,

Таблица 1. Уровни автоматизации МЭС сельскохозяйственного назначения

Table 1. Automation levels of agricultural MPUs

Уровень автоматизации	Уровень 0	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5
	Нет электронных систем	Электронные помощники	Частичная автоматизация	Условная автоматизация	Высокая автоматизация	Полная автоматизация
Управление двигателем	Р	Р	РА	АР	АД	А
Управление трансмиссией	Р	Р	РА	АР	АД	А
Рулевое управление	Р	РА	РА	АР	АД	А
Управление тормозной системой	Р	Р	РА	АР	АД	А
Управление гидравлической системой	Р	РА	РА	АР	АД	А
Управление ВОМ	Р	РА	РА	АР	АД	А
Управление электрическими исполнительными механизмами	Р	РА	РА	АР	АД	А

Примечание. Р — ручное управление; РА — ручное управление с возможностью автоматизации определённых действий; АР — автоматическое с возможностью ручного управления; АД — автоматическое управление под дистанционным контролем оператора диспетчерского центра; А — автоматическое управление под дистанционным контролем центральной интеллектуальной системы управления.

систем включения и выключения ВОМ, систем опусканием и подъёма навесной системы на разворотах, поддержание установленной глубины обработки, определённого угла наклона навески и т. п. В этом случае оператор может быть высвобожден от выполнения простых, часто повторяющихся действий, но должен осуществлять контроль за их выполнением электронными системами. Нагрузка на оператора, связанная с простым ведением МЭС по необходимой траектории и управлением некоторыми системами МЭС, снижается, что даёт возможность больше внимания уделять непосредственно контролю за выполнением технологического процесса.

Уровень 2 предполагает частичную автоматизацию управления МЭС, которая связана с применением систем автоматического поддержания скорости, управления движением под контролем и с корректировками оператора и возможностью ориентации по рядкам сельскохозяйственных культур, по скошенным валкам, по краю смежного прохода, по необработанной части или краю поля. В этом случае появляются автономные системы безопасности, способные распознавать возникающие на пути препятствия, самостоятельно останавливать МЭС перед ними или объезжать их. При использовании таких систем оператор большую часть функций, связанных с управлением движением МЭС, доверяет системам автоматизации и подключается к управлению в ситуации, когда автоматическая система оказывается не способна самостоятельно принять решение.

Уровень 3 предполагает условную автоматизацию мобильных средств, при которой автоматизированы все системы управления МЭС, связанные как с управлением движением, так и с управлением технологическим процессом. Оператор, находящийся в кабине, осуществляет только некоторые корректировки в работе МЭС или подключается к управлению только в случае, если автоматическая система оказывается не способна самостоятельно принять решение.

Уровень 4 предполагает применение систем беспилотного управления под дистанционным контролем оператора. В этом случае электронная система полностью управляет всеми функциями беспилотного МЭС, но оператор, находящийся рядом или в диспетчерском пункте, может дистанционно вносить корректировки в работу системы или брать управление на себя.

Уровень 5 предполагает полную автоматизацию, при которой реализуется автоматическое управление беспилотным МЭС под дистанционным контролем центральной интеллектуальной системы управления и наблюдением оператором.

В настоящее время по оценкам экспертов уровень автоматизации серийно выпускаемых автомобилей с функциями автоматического управления достигает третьего уровня. Что же касается МЭС сельскохозяйственного назначения, то в соответствии с предложенным разделением, некоторые наиболее передовые разработки,

в которых применяются автоматические системы управления МЭС, можно отнести к уровню 2, а серийно выпускаемые — к уровню 1.

Серийно выпускаемые и уже находящиеся массовое применение системы параллельного и автоматического вождения на основе систем геопозиционирования GPS / ГЛОНАСС и нейронных сетей обладают достаточно высокими функционалом и точностью, универсальностью, доступностью и позволяют уже в настоящее время автоматизировать часть процессов управления МЭС. Дальнейшее развитие интеллектуальных технологий в сельском хозяйстве позволяет реализовать новые подходы к управлению сельскохозяйственной техникой. Разработка и применение в сельскохозяйственной технике технологий машинного зрения, различного рода датчиков и сенсоров, электронных систем управления, технологий беспроводной передачи данных, интернета вещей и т. п. позволяет создавать беспилотные машины, обеспечивающие повышение качества проведения технологических операций, достаточно высокую точность и безопасность вождения, автономность, что в последствии даст возможность исключить оператора, находящегося непосредственно в кабине, и перейти к применению беспилотных МЭС, контролируемых оператором дистанционно из диспетчерского пункта [15].

Переход к четвёртому уровню автоматизации даёт возможность исключения оператора непосредственно из процесса управления МЭС и позволяет пересмотреть подходы к повышению одного из основных показателей производства — производительности труда. Поскольку в дальнейших перспективах на четвёртом и более высоких уровнях автоматизации становится возможным реализовать контроль и управление одним оператором несколькими агрегатами, то существующий тренд повышения производительности за счёт увеличения основных параметров агрегата: ширины захвата, рабочих скоростей, грузоподъёмности и т. д. — может быть заменен на альтернативный путь, заключающийся в применении сопоставимых по производительности множества автономных малогабаритных агрегатов (рой сельскохозяйственных роботов).

Необходимо также отметить, что согласно закономерности повышения технического уровня тракторов приоритетным путём перехода к энергетической концепции МЭС является использование в качестве сцепного веса технологической части агрегата, что потребует применения в МЭС и сельскохозяйственных машинах разветвлённой адаптивной трансмиссии. Это требует трансформации как самих МЭС, так и агрегируемых с ними сельскохозяйственных машин [16].

Таким образом, применение беспилотных систем управления позволяет использовать концептуально новые подходы к созданию МЭС сельскохозяйственного назначения. Произведённые исследования по изучению разрабатываемых роботизированных средств сельскохозяйственного

назначения и их концепций [1] позволили выявить три концептуальных направления развития беспилотных МЭС (рис. 2).

Первое концептуальное направление (концептуальная модель А) — разработка беспилотных универсальных МЭС, при этом за основу берутся в большинстве случаев серийно выпускаемые модели тракторов, которые оснащаются средствами автоматизации и интеллектуальными системами управления. Кабина и традиционные органы ручного управления в этом случае могут как оставаться, так и быть исключены из конструкции. Отличительной особенностью такого направления развития является сохранение существующих тенденций повышения производительности сельскохозяйственных агрегатов за счёт увеличения мощности МЭС, ширины захвата сельскохозяйственных орудий, рабочих скоростей и т. д. Такие агрегаты в основном работают на поле индивидуально или группами по 2–3 ед. В большинстве случаев разрабатываемые МЭС агрегируют с серийно выпускающимися сельскохозяйственными машинами. Примером такого подхода являются лишённые кабин концепты беспилотных тракторов компаний John Deere [17] и Case IH [18].

Вторым концептуальным направлением (концептуальная модель В) является создание универсальных беспилотных МЭС малой мощности, которые выполняют работы преимущественно группами. Такой подход подразумевает разработку универсальных однотипных машин одной мощности, которые за счёт их групповой работы будут способны заменить всю номенклатуру применяющихся тракторов различных тяговых классов и мощности. В этом случае вся эксплуатирующаяся техника должна быть подстроена под один типоразмер, соответствующий тяговому усилию и мощности разрабатываемого МЭС. Примером развития данного направления является концепция

групповой работы посевных роботов Fendt Xaver. Управление группой роботов осуществляется при помощи облачных технологий, что позволяет сократить количество устанавливаемых датчиков и упростить установленные на самих роботах программно-аппаратные средства [19].

Третьим концептуальным направлением развития беспилотных МЭС сельскохозяйственного назначения (концептуальная модель С) является использование энергомодулей. Данная концепция предполагает создание беспилотных МЭС, составленных из нескольких энергомодулей, каждый из которых включает в себя все базовые элементы, необходимые для выполнения функций тягово-энергетического средства, взаимодействия с внешней средой, другими модулями в агрегате и другими агрегатами. Различные комбинации из нескольких энергомодулей позволяют создавать беспилотные МЭС сельскохозяйственного назначения различной мощности и тягового усилия. Для агрегатирования с энергомодулями могут быть адаптированы серийно выпускающиеся сельскохозяйственные машины, имеющие различную ширину захвата, рабочую скорость, потребляемую мощность, вместимость бункера и т. п. [20] Примером реализации данной концепции является модульный принцип построения системы роботов Thorvald II [21].

Вышеописанные концептуальные модели развития беспилотных МЭС в полной мере возможно реализовать только при достаточно высоких уровнях автоматизации управления сельскохозяйственным агрегатом.

На рис. 3 представлены примеры агрегатирования беспилотных МЭС концептуальных моделей А, В и С с плугами, культиваторами для сплошной и междурядной обработки почвы.

В настоящее время учёными и ведущими производителями сельскохозяйственной техники в равной степени



Рис. 2. Концептуальные направления развития беспилотных МЭС сельскохозяйственного назначения.

Fig. 2. Conceptual directions of development of driverless agricultural MPUs.

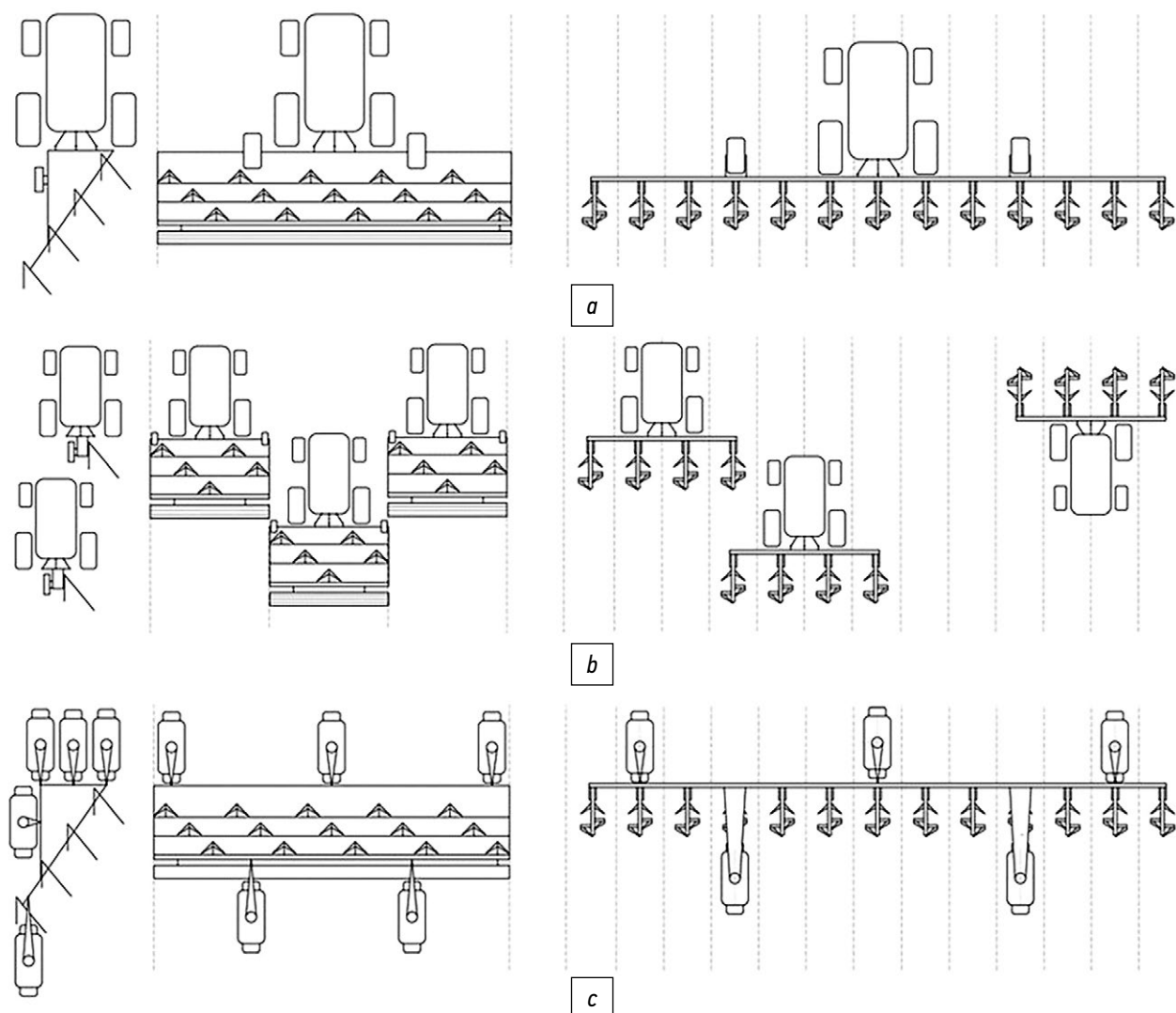


Рис. 3. Агрегатирование беспилотных МЭС с плугами, сплошными и междурядными культиваторами: *a* — концептуальная модель А; *b* — концептуальная модель В; *c* — концептуальная модель С.

Fig. 3. Coupling of driverless MPUs with ploughs, unstriped and inter-row cultivators. *a* — conceptual model A; *b* — conceptual model B; *c* — conceptual model of C.

прорабатываются все описанные концепции. Для определения дальнейших перспектив использования предложенных концептуальных моделей беспилотных МЭС требуется проработать вопрос оценки эффективности их применения.

С целью обеспечения возможности сопоставления различных концептуальных моделей между собой при оценке эффективности их применения необходимо определить количество беспилотных МЭС различных концептуальных моделей, эквивалентное по тяговому усилию, создаваемому базовыми моделями (серийными) тракторами различных тяговых классов. При осуществлении теоретических исследований в качестве базовых моделей, с которыми проводились сравнения, приняты серийно выпускающиеся сельскохозяйственные тракторы тяговых классов от 0,2 до 8 в соответствии с ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85) «Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные.

Тяговые классы». В исследованиях принято, что по тяговому усилию беспилотные МЭС концептуальной модели В соответствуют трактору тягового класса 0,6, а концептуальной модели С — тягового класса 0,2.

Применение беспилотных МЭС концептуальной модели А предполагает замену базового трактора *i*-го тягового класса на беспилотное МЭС того же *i*-го тягового класса, либо перевод базового трактора *i*-го тягового класса на беспилотное управление. В этом случае один трактор заменяется одним беспилотным МЭС того же тягового класса, т. е.:

$$n_A^i = n_6^i, \quad (1)$$

где *i* — показатель тягового класса в соответствии с ГОСТ 27021-86; n_A^i — расчётное количество беспилотных МЭС *i*-го тягового класса модели А, ед.; n_6^i — количество

базовых тракторов i -го тягового класса, заменяемых беспилотными МЭС, ед.

В случае использования беспилотных МЭС концептуальных моделей В и С (энергомодулей) один трактор i -го тягового класса заменяется одним или несколькими беспилотными МЭС определённого тягового класса:

$$n_B^i \geq n_6^i, \quad (2)$$

$$n_C^i \geq n_6^i, \quad (3)$$

где n_B^i — расчётное количество беспилотных МЭС концептуальной модели В, ед.; n_C^i — расчётное количество беспилотных МЭС концептуальной модели С (энергомодулей), ед.

Поскольку тяговое усилие беспилотных МЭС концептуальных моделей В и С (энергомодулей) исходно принято и остаётся постоянным, то их эквивалентное количество будет напрямую зависеть от тягового усилия используемого базового трактора i -го тягового класса.

Количество беспилотных МЭС концептуальной модели В, эквивалентное по тяговому усилию трактору i -го тягового класса, будет определяться по формуле:

$$n_B^i = \frac{P_{Кр\ 6}^i}{P_{Кр\ В}}, \quad (4)$$

где $P_{Кр\ 6}^i$ — максимальное значение номинального тягового усилия базового трактора i -го тягового класса в соответствии с ГОСТ 27021-86, кН; $P_{Кр\ В}$ — максимальное значение номинального тягового усилия беспилотного

МЭС концептуальной модели В, кН. В нашем случае в соответствии с ГОСТ 27021-86 для тягового класса 0,6 составляет $P_{Кр\ В}^{0,6} = 8,1$ кН.

Количество энергомодулей в концептуальной модели С, эквивалентное по тяговому усилию трактору i -го тягового класса, будет определяться по формуле:

$$n_C^i = \frac{P_{Кр\ 6}^i}{P_{Кр\ С}}, \quad (5)$$

где $P_{Кр\ С}$ — максимальное значение номинального тягового усилия энергомодуля модели С, кН. В нашем случае в соответствии с ГОСТ 27021-86 для тягового класса 0,2 $P_{Кр\ С}^{0,2} = 5,4$ кН.

В соответствии с данной методикой произведены расчёты и построен график (рис. 4), отражающий зависимость количества беспилотных МЭС концептуальных моделей А, В и С от тягового класса базового трактора (при расчётах произвели округление эквивалентного количества до целых чисел).

Концептуальная модель А предполагает создание беспилотных МЭС каждого тягового класса, что на графике отражается как параллельная оси абсцисс прямая, проходящая через значение 1 оси ординат.

С целью оценки перспектив использования предложенных концептуальных моделей беспилотных МЭС требуется проведение исследований по определению влияния их применения на производительность и экономическую эффективность сельскохозяйственных агрегатов. Оценка производительности агрегатов в составе с беспилотными МЭС различных концептуальных

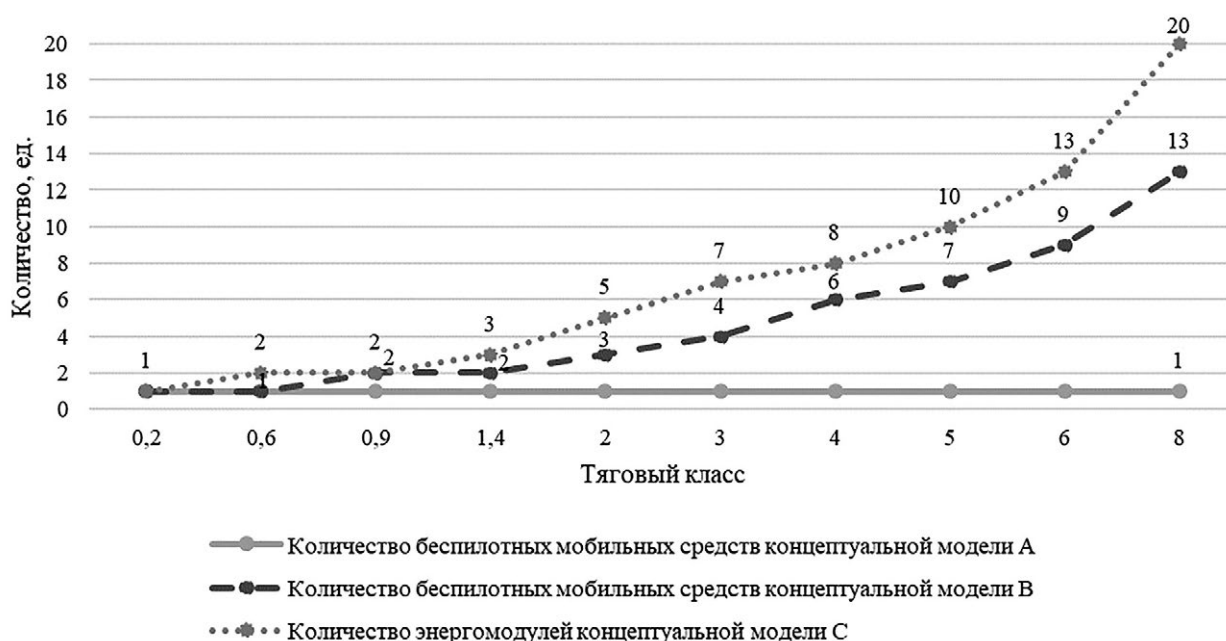


Рис. 4. Результаты расчёта эквивалентного количества беспилотных МЭС концептуальных моделей А, В и С в зависимости от тягового класса базового трактора.

Fig. 4. Results of calculation of equivalent number of driverless MPUs of the conceptual models A, B and C depending on traction class of a basic tractor.

моделей и приведённой себестоимости осуществлена на основе существующих общеизвестных методик [22], усовершенствованных применительно к беспилотным МЭС в ФГБУ ФНАЦ ВИМ.

Осуществлена сравнительная оценка производительности пахотных агрегатов с оборотными плугами при использовании беспилотных МЭС рассматриваемых концептуальных моделей.

При проведении оценки расчётная длина гона принята равной 1000 м. Расчётную глубину обработки приняли равной 20–22 см, удельное тяговое сопротивление орудия на скорости 5 км/ч — 13,4 кН/м при темпе роста тягового сопротивления орудия 5% с повышением скорости на 1 км/ч. Способ движения агрегата — челночный с петлевыми грушевидными разворотами в конце гона.

При расчёте коэффициента использования времени смены в соответствии с нормативными показателями принято, что при использовании базового трактора затраты времени на личные надобности оператора составляют 15 мин в смену, а коэффициент времени отдыха составляет 0,052. При осуществлении расчётов для беспилотных МЭС затраты времени на личные надобности оператора и отдых не учитывались.

При расчёте коэффициента затрат времени на повороты агрегата в конце гона приняты значения кинематической длины и минимального радиуса поворота серийно выпускающихся сельскохозяйственных тракторов соответствующих тяговых классов. Данные о кинематической длине сельскохозяйственных орудий взяты из представленных производителями технических характеристик. Скорость движения агрегата при повороте принята равной 5 км/ч.

При осуществлении расчётов принят челночный способ движения агрегата с петлевыми грушевидными

разворотами. Для агрегатов в составе с беспилотными МЭС концептуальной модели С принят беспетлевой (траектория по минимальному радиусу) способ поворота, при котором радиус поворота равен ширине захвата агрегата.

Результаты расчёта часовой производительности пахотных агрегатов в составе с базовыми тракторами и беспилотными МЭС различных концептуальных моделей соответствующих тяговых классов представлены на рис. 5.

Как показывают произведённые расчёты, применение беспилотных МЭС рассматриваемых концептуальных моделей может позволить повысить производительность пахотных агрегатов.

Использование беспилотных МЭС концептуальной модели А может позволить увеличить производительность пахотных агрегатов во всех тяговых классах. Использование беспилотных МЭС концептуальной модели В может позволить увеличить производительность пахотных агрегатов на 2–42%, при этом достаточно высоких показателей роста производительности возможно обеспечить при использовании группы данных средств по сравнению с базовыми тракторами тяговых классов от 0,6 до 4 (10–42%).

Использование беспилотных МЭС концептуальной модели С по сравнению с базовыми тракторами тяговых классов свыше 0,6 может позволить увеличить производительность пахотного агрегата на 4–18%, при этом достаточно высокие показатели увеличения производительности достигаются при использовании данных средств по сравнению с базовыми тракторами в тяговых классах от 2 до 8 (15–18%).

Проведена сравнительная оценка приведённой себестоимости пахотных работ при использовании

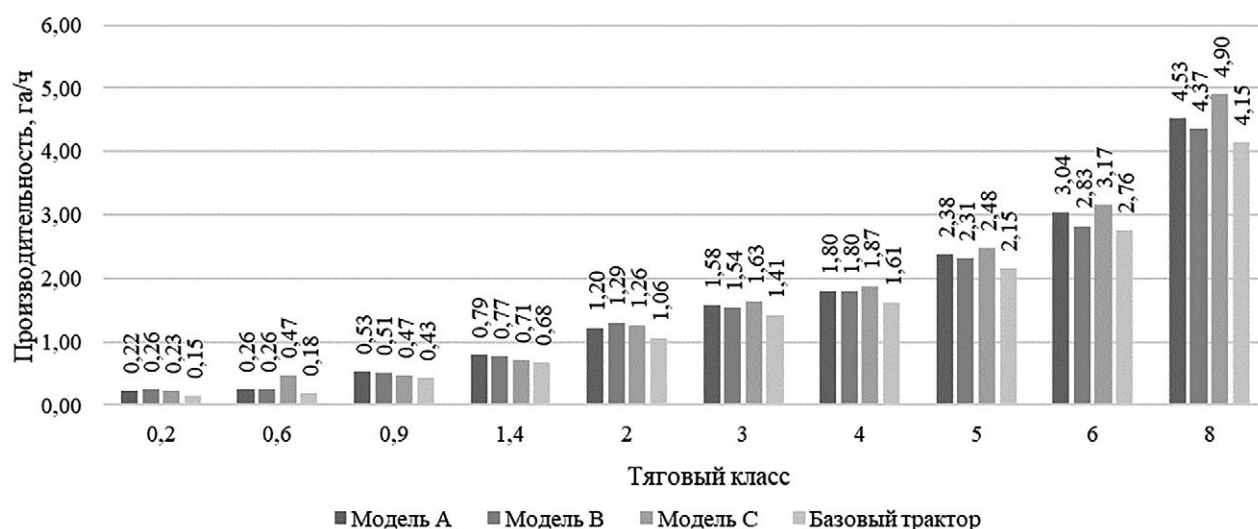


Рис. 5. Расчётная часовая производительность пахотных агрегатов в составе с беспилотными МЭС различных концептуальных моделей.

Fig. 5. Assessed hour performance of arable units including driverless MPUs of various conceptual models.

беспилотных МЭС по сравнению с базовыми тракторами. Результаты расчёта себестоимости вспашки одного гектара приведены в табл. 2.

По полученным данным рассчитано снижение себестоимости вспашки одного гектара при использовании беспилотных мобильных средств относительно базовых тракторов соответствующих тяговых классов (рис. 6).

Приведённые на рис.6 данные показывают, что использование беспилотных МЭС концептуальной модели А во всех тяговых классах может позволить снизить себестоимость выполнения работ на 11–42%. Использование беспилотных МЭС концептуальной модели В может оказаться эффективным по сравнению с базовыми тракторами только в тяговых классах 0,2–0,9. Снижение себестоимости выполнения работ при использовании беспилотных МЭС концептуальной модели С возможно достигнуть только в тяговых классах 0,2–0,6, 8. В остальных случаях применение беспилотных МЭС концептуальных моделей В и С может приводить к увеличению себестоимости пахотных работ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Серийно выпускаемые и находящие массовое применение системы параллельного и автоматического вождения на основе систем геопозиционирования и нейронных сетей позволяют уже в настоящее время автоматизировать часть процессов управления МЭС. Дальнейшее развитие систем управления непосредственно связано с интеграцией систем геопозиционирования, лидаров, радаров, машинного зрения, интернета вещей, интеллектуальных и других технологий, которые позволяют реализовать автономное управление всем функционалом МЭС сельскохозяйственного назначения, что в последствии даст возможность исключить оператора, находящегося непосредственно в кабине, и перейти к применению беспилотных МЭС.

Проведённые исследования позволили предложить классификацию МЭС сельскохозяйственного назначения по уровням автоматизации. Переход к беспилотным МЭС возможен при достижении 4 уровня автоматизации,

Таблица 2. Себестоимость вспашки одного гектара, руб./га

Table 2. Present cost of ploughing per hectare, rub/ha

Тяговый класс	Модель А	Модель В	Модель С	Базовый трактор
0,2	3744,49	3054,24	2146,70	5835,98
0,6	3054,24	3054,24	1950,00	5250,71
0,9	1863,61	3054,24	1953,09	2677,13
1,4	1276,40	2036,16	1892,41	1850,66
2	1352,35	1832,54	1741,74	1746,01
3	1356,37	2036,16	1859,24	1675,90
4	1589,37	2617,92	1854,10	1898,02
5	1368,72	2375,52	1740,10	1617,49
6	1464,18	2498,92	1766,27	1685,94
8	1766,63	2335,59	1748,42	1979,64

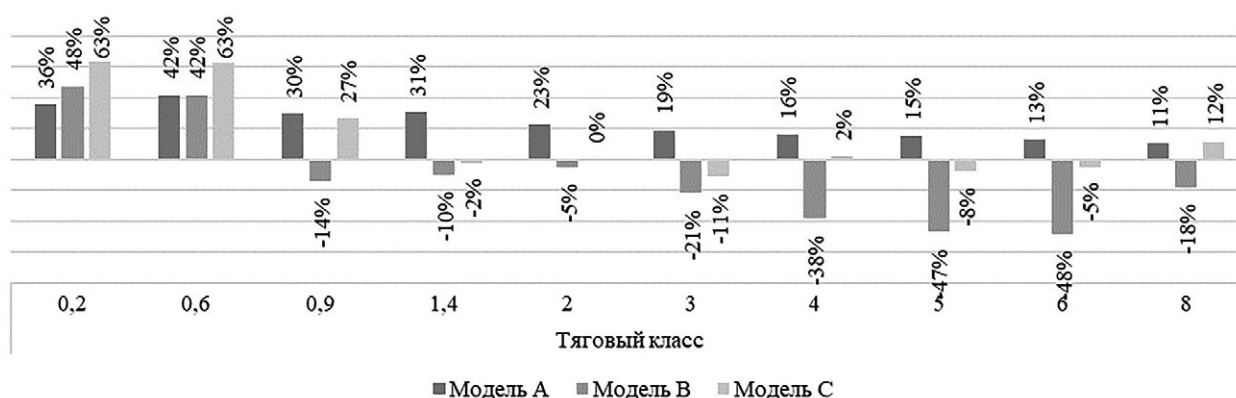


Рис. 6. Снижение себестоимости вспашки одного гектара при использовании беспилотных МЭС относительно базовых тракторов.
Fig. 6. Decreasing the present value of ploughing per hectare using driverless MPUs in comparison with basic tractors.

при котором оператор контролирует работу агрегата дистанционно. Разработанные концептуальные модели отражают основные тенденции и перспективные направления развития МЭС. Предложенная методика расчёта эквивалентного количества беспилотных МЭС позволяет определить оптимальное количество беспилотных МЭС, входящих в состав сельскохозяйственного агрегата с каждой концептуальной моделью для каждого тягового класса.

Произведённые расчёты показывают, что применение беспилотных МЭС рассматриваемых концептуальных моделей может позволить повысить производительность пахотных агрегатов, при этом использование беспилотных МЭС концептуальной модели А может положительно сказаться на снижении себестоимости выполнения работ во всех тяговых классах, беспилотных МЭС концептуальной модели В — только в тяговых классах 0,2–0,9, беспилотных МЭС концептуальной модели С — только в тяговых классах 0,2–0,6, 8. В остальных случаях применение беспилотных МЭС концептуальных моделей В и С может приводить к увеличению себестоимости пахотных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведённые теоретические исследования показывают, что применение предложенных концептуальных моделей беспилотных МЭС может позволить повысить производительность сельскохозяйственных агрегатов, однако получены неоднозначные результаты по расчёту приведённой себестоимости выполнения сельскохозяйственных работ данными средствами. Для более полной и объективной оценки эффективности применения беспилотных МЭС предложенных концептуальных моделей целесообразно осуществить оценку эффекта от их применения при выполнении различных сельскохозяйственных операций.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. И.А. Старостин — руководство исследованием, концептуализация, методология, администрирование

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Starostin I.A., Eshchin A.V., Davydova S.A. Global trends in the development of agricultural robotics // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2023. Vol. 1138. P. 012042. doi: 10.1088/1755-1315/1138/1/012042
2. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации Системы технологий и машин // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 3(36). С. 40–45. EDN RLCDHO
3. Аксенов А.Г. Анализ интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 3(36). С. 46–51. EDN CECDAH
4. Измайлов А.Ю., Годжаев З.А., Гришин А.П. и др. Цифровое сельское хозяйство (обзор цифровых технологий сельскохозяйственного

проекта; А.В. Ещин — формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация; Т.З. Годжаев — проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и её редактирование; С.А. Давыдова — формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и её редактирование.

Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. I.A. Starostin — study management, conceptualization, methodology, project administration; A.V. Eshchin — formal analysis, conducting the study, writing the draft of the manuscript, visualization; T.Z. Godzhaev — conducting the study, writing the draft of the manuscript, writing and editing the final version of the manuscript; S.A. Davydova — formal analysis, conducting the study, writing the draft of the manuscript, writing and editing the final version of the manuscript.

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

ния) // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 2 (31). С. 41–52. EDN: JNIMAH

5. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6–10. EDN YFRZDV doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10

6. Starostin I.A., Belyshkina M.E., Chilingaryan N.O., Alipichev A.YU. Digital technologies in agricultural production: implementation background, current state and development trends // Agricultural engineering. No. 3 (103). 2021. P. 4–10.

7. Федоренко В.Ф., Мишуев Н.П., Булагин Д.С. и др. Цифровое сельское хозяйство: состояние и перспективы развития. М.: Росинформагротех, 2019.
8. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 1. С. 16–21. EDN HYFQAN doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21
9. Голтыпин В.Я. Системы параллельного вождения машинно-тракторных агрегатов // Техника и оборудование для села. 2013. № 11. С. 12–14. EDN: RKAJTT
10. Матюк Н.С., Зинченко С.И., Мазиров М.А. и др. Ресурсосберегающие технологии обработки почвы в адаптивном земледелии. Иваново: ФГБНУ Верхневолжский ФАНЦ, 2020. EDN: OXDIHN
11. Cognitive Agro Pilot Система автоматического вождения [internet]. Дата обращения: 14.07.2023. Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php/>
12. Саяпин А.С. Петрищев Н.А., Пестряков Е.В. Совершенствование управления техническим состоянием машин за счет использования цифровых средств мониторинга // Технический сервис машин. 2023. Т. 61, № 4(153). С. 10–17. EDN MMBPZL doi: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-10-17
13. Годжаев З.А., Лавров А.В., Шевцов В.Г., Зубина В.А. О выборе технологического направления развития системы сельскохозяйственных мобильных энергосредств // Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 1. С. 35–41. EDN: WVVVVS doi: 10.31992/2074-0530-2020-43-1-35-41
14. Taxonomy And Definitions For Terms Related To Driving Automation Systems For On-Road Motor Vehicles. SAE J 3016. Washington: SAE, 2018.
15. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Современные технологии и техника для сельского хозяйства — тенденции выставки AGRITECHNIKA 2019 // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 28–40. EDN: OPALJD doi: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40
16. Кутков Г.М. Развитие технической концепции трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 1. С. 27–35. EDN: ECZSAK doi: 10.31992/0321-4443-2019-1-27-35
17. Новые гусеничные и колесные тракторы John Deere [internet]. Дата обращения: 14.07.2023. Режим доступа: <https://www.deere.ru/ru/тракторы/>, свободный. – (Дата обращения: 12.07.2023).
18. Тракторы Case IH [internet]. Дата обращения: 14.07.2023. Режим доступа: <https://www.caseih.com/apac/ru-ru/products/tractors>
19. Latest generation of seed sowing robots: The Fendt Xaver comes of age. AGCO GmbH. [internet]. Дата обращения: 14.07.2023. Режим доступа: <https://www.fendt.com/int/2-fendt-xaver>
20. Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Васюнина Ю.Г., Савельев А.И. Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 1. С. 78–88. EDN MNHHSN doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88
21. Grimstad L., From P.J. The Thorvald II agricultural robotic system // Robotics. 2017. Vol. 6. P. 24.
22. Верещагин Н.И., Левшин А.Г., Скороходов А.Н. Организация и технология механизированных работ в растениеводстве. М.: Академия, 2013.

REFERENCES

1. Starostin IA, Eshchin AV, Davydova SA. Global trends in the development of agricultural robotics. *IOP Conf. Series: Earth Env. Sci.* 2023;1138:012042. doi: 10.1088/1755-1315/1138/1/012042
2. Lobachevskij JaP, Bejlis VM, Cench JuS. Aspekty cifrovizacii Sistemy tehnologii i mashin // *Jelektrotehnologii i jelektooborudovanie v APK.* 2019;3(36):40–45. (In Russ). EDN RLCDDH
3. Aksenov A.G. Analiz intellektual'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij v sel'skom hozjajstve // *Jelektrotehnologii i jelektooborudovanie v APK.* 2019;3(36):46–51. (In Russ). EDN CECDAH
4. Izmailov AYu, Godzhaev ZA, Grishin AP, et al. Digital agriculture (a review of digital technologies for agricultural purposes). *Innovations in agriculture.* 2019;2(31):41–52. (In Russ). EDN: JNIMAH
5. Lobachevskij JaP, Dorokhov AS. Cifrovyje tehnologii i robotizirovannye tehnicheskie sredstva dlja sel'skogo hozjajstva. *Sel'skohozejstvennyje mashiny i tehnologii.* 2021;15(4):6–10. (In Russ). EDN YFRZDV doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10
6. Starostin IA, Belyshkina ME, Chilingaryan NO, Alipichev AYu. Digital technologies in agricultural production: implementation background, current state and development trends. *Agricultural engineering.* 2021;3(103):4–10.
7. Fedorenko VF, Mishurov NP, Buklagin DS, et al. *Digital agriculture: state and development prospects.* M.: Rosinformagrotech; 2019. (In Russ)
8. Starovojtov SI, Cench JuS, Korotchenja VM, Lichman GI. Tehnicheskie sistemy cifrovogo kontrolja kachestva obrabotki pochvy. *Sel'skohozejstvennyje mashiny i tehnologii.* 2020;14(1):16–21. (In Russ). doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21
9. Goltjapin VYa. Systems of parallel driving of machine-tractor units. *Technique and equipment for the village.* 2013;11:12–14. (In Russ). EDN: RKAJTT
10. Matyuk NS, Zinchenko SI, Mazirow MA, et al. Resource-saving technologies of tillage in adaptive agriculture. *Ivanovo: FGBNU Verkhnevolzhskiy FANTs; 2020.* (In Russ). EDN: OXDIHN
11. Cognitive Agro Pilot Automatic driving system [internet]. accessed: 14.07.2023. Available from: <https://www.tadviser.ru/index.php/>
12. Sajapin AS, Petrishhev NA, Pestrjakov EV. Sovershenstvovanie upravlenija tehnicheskim sostojaniem mashin za schet ispol'zovanija cifrovych sredstv monitoringa. *Tehnicheskij servis mashin.* 2023;61(4(153)):10–17. (In Russ). doi: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-10-17
13. Godzhaev ZA, Lavrov AV, Shevtsov VG, Zubina VA. On the choice of the technological direction of development of the system of agricultural mobile power equipment. *Izvestiya MSTU MAMI.* 2020;1:35–41. (In Russ). EDN: WVVVVS doi: 10.31992/2074-0530-2020-43-1-35-41
14. Taxonomy And Definitions For Terms Related To Driving Automation Systems For On-Road Motor Vehicles. SAE J 3016. Washington: SAE, 2018.
15. Izmailov AYu, Lobachevsky YaP, Dorokhov AS. Modern technologies and equipment for agriculture — trends of the exhibition AGRITECHNIKA 2019. *Tractors and agricultural machinery.* 2020;6:28–40. (In Russ). EDN: OPALJD doi: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40
16. Kutkov GM. Development of the technical concept of the tractor. *Tractors and agricultural machinery.* 2019;1:27–35. (In Russ). EDN: ECZSAK doi: 10.31992/0321-4443-2019-1-27-35

17. New tracked and wheeled John Deere tractors [internet]. accessed: 14.07.2023. Available from: <https://www.deere.ru/ru/tractors/>
18. Case IH tractors [internet]. accessed: 14.07.2023. Available from: <https://www.caseih.com/apac/ru-ru/products/tractors>
19. Latest generation of seed sowing robots: The Fendt Xaver comes of age. Official website of AGCO GmbH. [internet]. accessed: 14.07.2023. Available from: <https://www.fendt.com/int/2-fendt-xaver>
20. Krestovnikov KD, Erashov AA, Vasjunina JuG, Savel'ev AI. Razrabotka ustrojstva soprjazhenija dlja modul'noj sel'skhozajstvennoj

- robototekhnicheskoy platformy. *Sel'skhozajstvennye mashiny i tehnologii*. 2022;16(1):78–88. (In Russ) EDN MNHHSN doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88
21. Grimstad L, From PJ. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*. 2017;6:24.
22. Vereshchagin NI, Levshin AG, Skorokhodov AN. Organization and technology of mechanized work in crop production. Moscow: Akademiya; 2013. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Старостин Иван Александрович,

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией прогнозирования развития систем машин и технологий в АПК;
адрес: Российская Федерация, 109428, Москва,
1-й Институтский пр-д, д. 5;
ORCID: 0000-0002-8890-1107;
eLibrary SPIN: 7301-6845;
e-mail: starwan@yandex.ru

Ещин Александр Вадимович,

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник лаборатории прогнозирования развития систем машин и технологий в АПК;
ORCID: 0000-0002-9368-7758;
eLibrary SPIN: 7610-5793;
e-mail: eschin-vim@yandex.ru

Годжаев Теймур Захидович,

заведующий сектором моделирования и оптимизации мобильных энергосредств;
ORCID: 0000-0002-4496-0711;
eLibrary SPIN: 4808-7437;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Давыдова Светлана Александровна,

канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории прогнозирования развития систем машин и технологий в АПК;
ORCID: 0000-0002-1219-3335;
eLibrary SPIN: 1050-6034;
e-mail: davidova-sa@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

* Ivan A. Starostin,

Cand. Sci. (Engineering),
Head of the Laboratory for Forecasting the Development of Machine Systems and Technologies in the Agro-Industrial Complex;
address: 5 1st Institutsky proezd street, 109428 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-8890-1107;
eLibrary SPIN: 7301-6845;
e-mail: starwan@yandex.ru

Aleksandr V. Eshchin,

Cand. Sci. (Engineering),
Senior Researcher at the Laboratory for Forecasting the Development of Machine Systems and Technologies in the Agro-Industrial Complex;
ORCID: 0000-0002-9368-7758;
eLibrary SPIN: 7610-5793;
e-mail: eschin-vim@yandex.ru

Teimur Z. Godzhaev,

Head of the Modeling and Optimization of Mobile Energy Equipment Sector ;
ORCID: 0000-0002-4496-0711;
eLibrary SPIN: 4808-7437;
e-mail: tgodzhaev95@yandex.ru

Svetlana A. Davydova,

Cand. Sci. (Engineering),
Leading Researcher at the Laboratory for Forecasting the Development of Machine Systems and Technologies in the Agro-Industrial Complex;
ORCID: 0000-0002-1219-3335;
eLibrary SPIN: 1050-6034;
e-mail: davidova-sa@mail.ru