

# ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372:620.92

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

## Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве

*А.Ю. Измайлов<sup>1</sup>, А.С. Дорохов<sup>2</sup>, И.А. Старостин<sup>3</sup>, А.В. Ещин<sup>4</sup>*<sup>1,2,3,4</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286><sup>2</sup> [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843><sup>3</sup> [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107><sup>4</sup> [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

**Аннотация.** С изменением климата политика лидирующих стран мира направлена на декарбонизацию – сокращение выбросов парниковых газов. Основным источником выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве являются двигатели внутреннего сгорания мобильных энергетических средств. Снизить выход токсичных выхлопных газов позволит переход на «зеленые» технологии. В связи с этим для мобильных энергетических средств актуальной является разработка новых экологических источников энергии (гибридный электропривод, водородные топливные элементы и аккумуляторные батареи). Анализ перспектив декарбонизации мобильных энергетических средств, приведённых в научных статьях и аналитических обзорах, показал, что применение гибридной схемы с дизель-генераторной установкой, накопителями энергии и электроприводом позволяет лишь частично снизить объёмы выбросов выхлопных газов. Современные водородные топливные элементы позволяют получать электрическую энергию без выделения вредных выбросов, но отличаются сложностью изготовления и дороговизной. Для мобильных энергосредств наиболее перспективными источниками энергии являются аккумуляторные батареи. В процессе своей работы они не выделяют токсичные вещества, имеют высокую энергоёмкость и ресурс. Однако при массовом применении требуется проработка вопроса их вторичного использования и утилизации. Результаты проводимых исследований позволили выявить основные тенденции развития мобильных энергетических средств. В долгосрочной перспективе декарбонизация мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения должна осуществляться за счёт создания энергетических средств малой мощности (до 50 кВт) на аккумуляторных батареях с электрической трансмиссией или средней и высокой мощности (более 50 кВт) на водородных топливных элементах с электрической трансмиссией.

**Ключевые слова:** декарбонизация мобильных энергетических средств, гибридный электропривод, водородные топливные элементы, аккумуляторные батареи

**Для цитирования:** Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

ORIGINAL PAPER

## Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production

*A.Y. Izmaylov<sup>1</sup>, A.S. Dorokhov<sup>2</sup>, I.A. Starostin<sup>3</sup>, A.V. Eshchin<sup>4</sup>*<sup>1,2,3,4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>1</sup> [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286><sup>2</sup> [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843><sup>3</sup> [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107><sup>4</sup> [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

**Abstract.** With the climate change, of the world's leading countries have been carrying out the policy of decarbonization, i.e. reducing greenhouse gas emissions. The main sources of greenhouse gas emissions in agriculture

are internal combustion engines of mobile power vehicles. The transition to “green” technologies is expected to reduce the amount of toxic exhaust gases the transition to “green” technologies. In this regard, the development of new environmentally friendly energy sources (hybrid electric drive, hydrogen fuel cells and batteries) is relevant for mobile power vehicles. An analysis of the prospects for the decarbonization of mobile energy vehicles, given in scientific articles and analytical reviews, showed that the use of a hybrid scheme with a diesel generator set, energy storage devices and an electric drive can only partially reduce exhaust emissions. Modern hydrogen fuel cells make it possible to obtain electrical energy without emitting harmful emissions, but they are difficult to manufacture and expensive. Batteries are the most promising energy sources for mobile power vehicles. They do not emit toxic substances during their operation, but have high energy intensity and resource. However, with mass use, it is necessary to study the issue of their reuse and disposal. The results of the conducted research have identified the main trends in the development of mobile power means. In the long term, the decarbonization of agricultural mobile energy vehicles should be carried out through the designing of energy vehicles of low power (up to 50 kW) on batteries with electric transmission or medium and high power (more than 50 kW) on hydrogen fuel cells with electric transmission.

**Keywords:** decarbonization of mobile energy vehicles, hybrid electric drive, hydrogen fuel cells, storage batteries

**For citation:** Izmailov A.Y., Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-4-10>

## Введение

Одними из приоритетных задач развития сельскохозяйственного производства являются создание высокопродуктивного экспортно-ориентированного сектора и достижение к 2024 г. экспорта сельскохозяйственной продукции в 45 млрд долл.<sup>1</sup> Для решения поставленных задач необходимо обеспечить стабильный рост производства конкурентоспособной высококачественной экологически чистой отечественной сельскохозяйственной продукции. Одними из основных ресурсов развития сельского хозяйства являются технологии и техника, которые позволяют повысить производительность и раскрыть весь потенциал земельных ресурсов и отечественных семян.

Мобильные энергетические средства являются основой комплекса машин для производства сельскохозяйственной продукции. Мобильные энергетические средства различных классов тяги позволяют эффективно выполнять сельскохозяйственные работы во всех отраслях – начиная с селекции и семеноводства, заканчивая животноводством.

В растениеводстве современные мобильные энергетические средства выполняют весь комплекс технологических операций: от обработки почвы и посева до уборки урожая и выполнения транспортно-технологических работ. В этой связи мобильные энергетические средства должны отвечать требованиям передовых инновационных технологий производства сельскохозяйственной продукции. На основании

перспективных технологий производства сельскохозяйственной продукции и последних прорывных научных достижений ведущими производителями и научными центрами прорабатываются различные направления их развития. Решаемые при этом задачи направлены на разработку требований к инновационным мобильным энергетическим средствам, отвечающих современным агротехнологиям и экологичности, эффективно выполняющих технологические операции. Результаты проводимых исследований позволят обосновать современные требования к массогабаритным показателям, грузоподъёмности навесных систем, мощности, производительности гидравлических систем, использованию систем автоматизированного управления и, конечно, экологичности.

**Цель исследований:** выявить основные тенденции развития мобильных энергетических средств в направлении повышения экологической безопасности сельскохозяйственного производства.

## Материалы и методы

Проведён анализ информации о прогнозах развития мировой энергетики и перспективах декарбонизации мобильных энергетических средств в научных статьях, аналитических обзорах, стратегических и прогнозных документах и электронных ресурсах. Исходная информация при проведении исследований обработана экспертно-аналитическим методом.

## Результаты и их обсуждение

В последние десятилетия экологические вопросы все больше преобладают в мировом научном сообществе. С изменением климата политика лидирующих стран мира направлена на декарбонизацию – сокращение выбросов парниковых газов, источниками

<sup>1</sup> Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации: утв. Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564161398> (дата обращения: 13.11.2022).

которых в первую очередь выступают тепловые станции, промышленные предприятия, транспорт и сельскохозяйственное производство. Объёмы мировых выбросов парниковых газов составляют почти 34 млн т. Прогноз показывает, что в ближайшие 10 лет выбросы парниковых газов в России будут только увеличиваться, и в этой связи одной из важнейших задач является поиск новых экологичных источников энергии<sup>2</sup>.

С целью снижения выбросов большинство развитых стран совместно с мировыми автопроизводителями планируют к 2030-2035 гг. полностью отказаться от использования в производимых автомобилях двигателей внутреннего сгорания<sup>3</sup> (рис. 1).

Ведущие мировые производители тракторов прорабатывают вопрос использования как гибридных схем, так и различных альтернативных источников энергии – в частности, аккумуляторных батарей и водородных топливных элементов. Основным эффектом такого перехода является повышение экологичности, энергоэффективности, производительности, надёжности, а также упрощение перехода к интеллектуальным системам управления.

Прогноз развития мировой энергетики показывает, что в ближайшие десятилетия производство энергии из ископаемых углеводородов будет сокращаться, а атомная энергетика и возобновляемые источники энергии – такие, как гидроэнергетика, ветроэнергетика, солнечная и геотермальная, будут получать более

широкое распространение и занимать большую часть энергетического рынка<sup>4</sup>. При этом данные источники энергии направлены в первую очередь на получение электрической энергии, и всё большую актуальность приобретает вопрос повышения эффективности её передачи, сохранения и использования – в частности, в мобильных средствах.

Опыт мировых лидеров в электромобилестроении показывает, что одним из путей эффективного хранения электрической энергии в транспорте является применение аккумуляторов. Так, последние разработки компании Tesla позволяют создавать компактные аккумуляторы для легкового автомобильного транспорта с запасённой энергией до 100 кВт·ч, обеспечивающие пробег более 500 км на одном заряде, при этом время зарядки на специализированной станции занимает не более 40 мин. Необходимо также отметить, что ресурс таких батарей составляет 6000 циклов зарядки-разрядки, что соответствует примерно 1,6 млн км пробега<sup>5</sup>. Рост серийного производства и постоянное совершенствование аккумуляторов позволили за последние несколько лет снизить их стоимость более чем в 1,5 раза [1].

Тенденции перехода на электропривод намечаются и в грузовом транспорте. Компания Tesla разработала электрический грузовой автомобиль, имеющий аккумуляторы с запасённой энергией 1000 кВт·ч, что позволяет ему при грузоподъёмности 36 т преодолевать на одном заряде более 800 км. Компания



Рис. 1. Декарбонизация мобильных энергосредств: мировые тенденции

Fig. 1. Decarbonisation of mobile energy vehicles: global trends

<sup>2</sup> Проект Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt\\_strategii.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf) (дата обращения: 23.01.2023).

<sup>3</sup> Максим Авербух. Зеленая угроза // Новая газета. [Электронный ресурс]. URL: <https://novayagazeta.ru/articles/2020/07/29/86447-zelenaya-ugroza> (дата обращения: 15.12.2022).

<sup>4</sup> Quantifying the Narrowing Net-energy Pathways to a Global Energy Transition. [Электронный ресурс]. URL: <http://cms.energypolicy.co.uk/309> (дата обращения: 18.01.2023).

<sup>5</sup> Tesla official website. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tesla.com/> (дата обращения: 05.12.2022).

Hyundai разработала и организовала серийное производство грузового автомобиля на водородных топливных элементах суммарной мощностью 190 кВт. Запас в 32 кг водорода позволяет преодолевать расстояние в 400 км.<sup>6</sup>

Прогноз развития мобильных энергосредств сельскохозяйственного назначения [2-4], показывает, что в ближайшие десятилетия ДВС будет постепенно терять свои позиции, а аккумуляторные батареи и топливные элементы будут получать всё более широкое распространение (рис. 2).

Традиционные сельскохозяйственные мобильные энергетические средства имеют в своем составе ДВС и механическую трансмиссию. Такая конструкция имеет низкие показатели экологичности, энергоэффективности, надежности. Она достаточно сложна в исполнении и не позволяет эффективно реализовать системы интеллектуального управления движением, а также является источником вибрации и шума.

Одним из следующих этапов развития является переход к гибриднему приводу – использованию дизель-генераторной установки, электромеханической трансмиссии, силовой электроники и накопителей энергии – аккумуляторных батарей (рис. 3).

Вырабатываемая генератором электрическая энергия посредством блока силовой электроники распределяется между электрическими двигателями мостов и аккумуляторной батареей. Трансмиссия энергосредства с гибридным приводом может при передвижении использовать только энергию, накопленную в аккумуляторах, а при выполнении энергоёмких технологических операций – энергию, вырабатываемую генератором. Это позволяет улучшить ряд характеристик энергосредства – в частности, повысить экологичность за счёт снижения мощности ДВС, его периодического использования по мере нагрузки, а использование электромеханической трансмиссии позволяет частично реализовать интеллектуальное

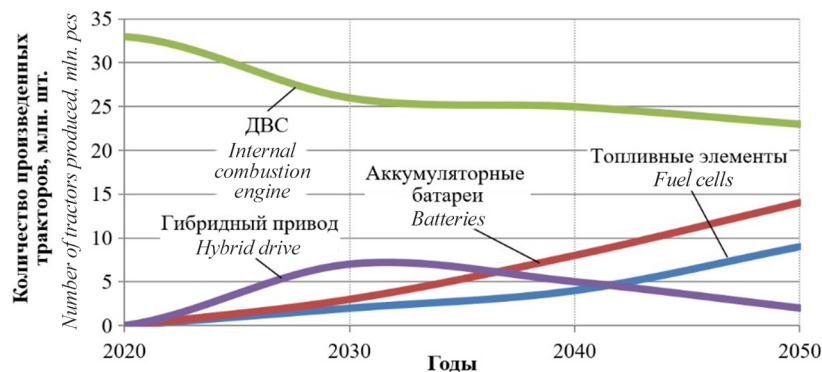


Рис. 2. Прогноз развития мобильной энергетики

Fig. 2. Forecast of mobile energy development

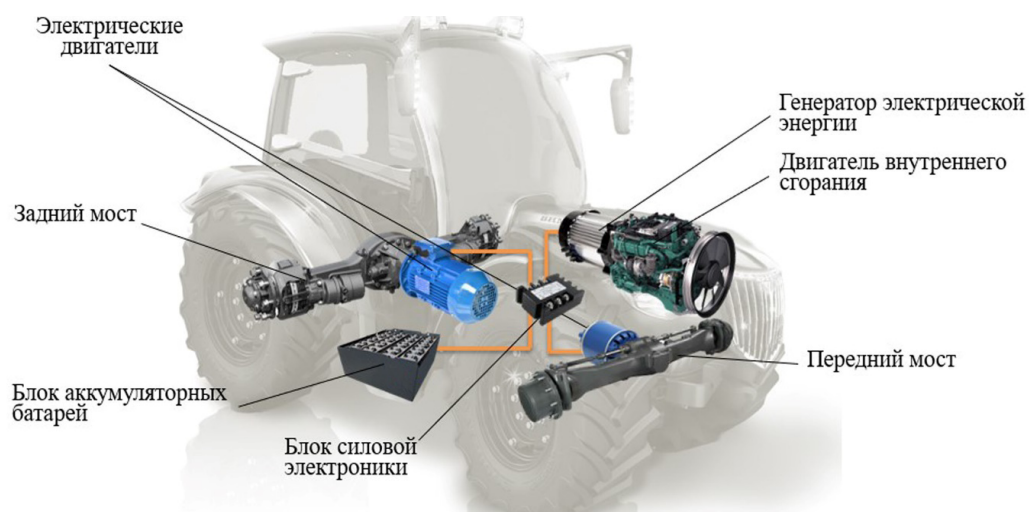


Рис. 3. Схема гибридного энергосредства с электромеханической трансмиссией

Fig. 3. Schematic diagram of a hybrid power vehicle with electromechanical power transmission

<sup>6</sup> Официальный веб сайт ООО «Хендэ Мотор СНГ». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hyundai.ru/news/pevyj-v-mire-tyazhelyj-gruzovik-na-toplivnyh-ehlementah-hyundai-xcient-fuel-cell-napravlyactsya-v-evropu-dlya-kommercheskogo-ispolzovaniya> (дата обращения: 22.12.2022).

управление движением. Однако такая система гибридного привода остается по-прежнему достаточно сложной, не позволяет избавиться от вибраций, шумов ДВС и осложняет применение интеллектуальных систем управления.

При использовании гибридного привода с электрической трансмиссией энергия направляется от генератора или аккумуляторов непосредственно на электродвигатели, встроенные в колеса. Это позволяет более эффективно реализовать электронное управление движением энергосредства, однако сохраняются те же недостатки, связанные с использованием ДВС (рис. 4).

Ещё одним направлением является использование в качестве энергетической установки водородных топливных элементов, представляющих собой устройство для получения электрической энергии при протекании химической реакции взаимодействия водорода с кислородом, в результате чего выделяются

тепло и вода. Получаемая электрическая энергия в зависимости от нагрузки с помощью блока силовой электроники может перераспределяться между мотор-колёсами и аккумуляторной батареей. Использование водородных топливных элементов позволяет решить ряд проблем, имеющих у ДВС: это, в частности, вопрос экологичности. Однако топливные элементы являются достаточно сложными и имеют ограниченный ресурс, что снижает надёжность всего энергосредства.

Для обеспечения работы в течение полной смены необходимо иметь большой запас водорода, для чего требуется разместить на энергосредстве большое количество емкостей для хранения (рис. 5).

Использование электрических мобильных энергетических средств на аккумуляторных батареях позволяет решить все вышеобозначенные проблемы. Такая схема содержит только аккумуляторные батареи, блок силовой электроники и мотор-колёса (рис. 6).

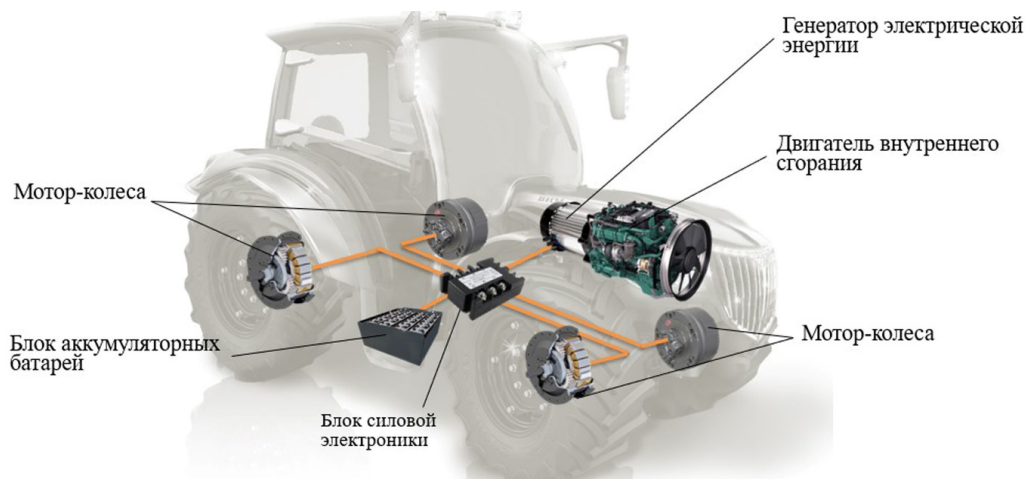


Рис. 4. Схема гибридного энергосредства с электрической трансмиссией

Fig. 4. Schematic diagram of a hydrogen fuel cell power vehicle with electric transmission

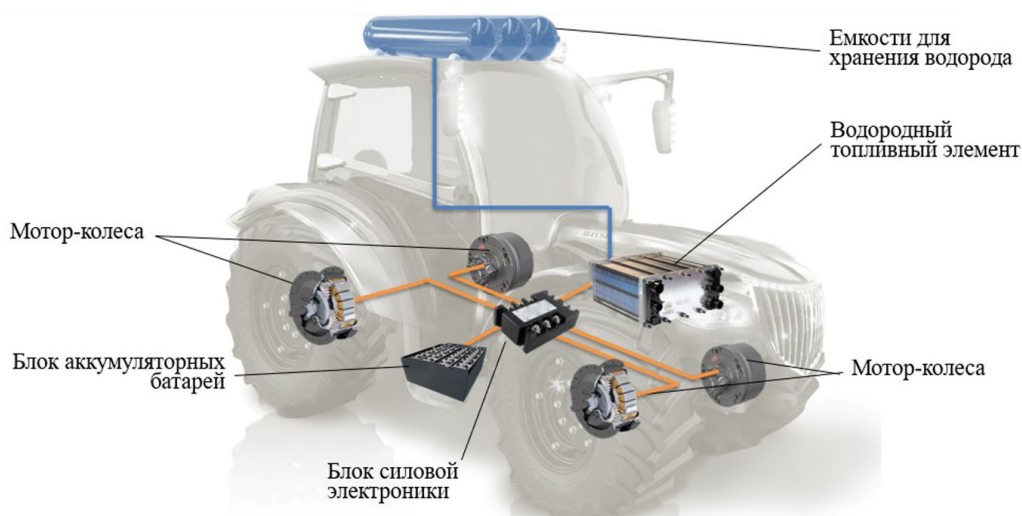


Рис. 5. Схема энергосредства на водородных топливных элементах с электрической трансмиссией

Fig. 5. Schematic diagram of a hydrogen fuel cell power vehicle with electric transmission



**Рис. 6. Схема энергосредства на аккумуляторных батареях с электрической трансмиссией**

**Fig. 6. Schematic diagram of a battery-powered vehicle with electric transmission**

В этом случае аккумуляторные батареи заряжаются от внешних источников. При выполнении технологических операций аккумуляторные батареи выдают регулируемый блоком силовой электроники уровень мощности, необходимый для питания мотор-колёс [5]. В перспективе это является одним из наиболее оптимальных решений [6].

В настоящее время реализация электрического привода мобильных энергетических средств с источниками энергии в виде водородных топливных элементов или аккумуляторных батарей существенно ограничивается отсутствием инфраструктуры, позволяющей своевременно восполнять запас энергии, и высокой стоимостью самих источников энергии.

ФНАЦ ВИМ совместно с ведущими российскими НИИ и высшими учебными заведениями проводит исследования по созданию и использованию альтернативных экологических источников энергии в мобильных энергетических средствах. В настоящее время разработаны беспилотный опрыскиватель с электрической трансмиссией, питающийся от аккумуляторных батарей, и инновационное роботизированное транспортно-технологическое средство, предназначенное для автономного выполнения различных

транспортно-технологических операций в сельскохозяйственном производстве в соответствии с заданной программой [7, 8]. Применение роботизированных мобильных энергетических средств с электрическим приводом в сельскохозяйственном производстве позволит существенно уменьшить загрязнение окружающей среды, значительно повысить производительность труда и качество выполнения технологических операций [9, 10].

### Выводы

1. Декарбонизация мобильных энергетических средств и сопутствующее снижение экологической нагрузки сельскохозяйственного производства на окружающую среду возможны только при соответствующем технико-технологическом развитии сельскохозяйственной мобильной энергетики.

2. В долгосрочной перспективе декарбонизация мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения должна осуществляться за счёт создания энергетических средств малой мощности (до 50 кВт) на аккумуляторных батареях с электрической трансмиссией или средней и высокой мощности (более 50 кВт) на водородных топливных элементах с электрической трансмиссией.

### Список литературы

1. Jae-Woong Byun. The Internal and External Analysis of Tesla Motors' Competitiveness. *Journal of Distribution and Management Research*. 2016;19(4):63-73. <https://dx.doi.org/10.17961/jdmr.19.4.201608.63>
2. Ghobadpour A., Boulonb L., Mousazadeha H., Malva-jerdic A.S., Rafieea S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. *Energy Procedia*. 2019;162:4-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.002>
3. Huisong Gao, Jinlin Xue. Modeling and economic assessment of electric transformation of agricultural tractors fueled with diesel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;39:100697. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100697>

### References

1. Jae-Woong Byun. The Internal and External Analysis of Tesla Motors' Competitiveness. *Journal of Distribution and Management Research*. 2016;19(4):63-73. <https://dx.doi.org/10.17961/jdmr.19.4.201608.63>
2. Ghobadpour A., Boulonb L., Mousazadeha H., Malva-jerdic A.S., Rafieea S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. *Energy Procedia*. 2019;162:4-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.002>
3. Huisong Gao, Jinlin Xue. Modeling and economic assessment of electric transformation of agricultural tractors fueled with diesel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;39:100697. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100697>

4. Jacek Caban, Jan Vrabel, Branislav Šarkan, Janusz Zarajczyk and Andrzej Marczuk. Analysis of the market of electric tractors in agricultural production. *MATEC Web Conf.* 2018;244:03005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403005>

5. Magalhaes R.O., Assunção M.V., Mendes Santos J.P., Silva E.V., Ferreira Junior L.G., Magalhaes R.R., Ferreira D.D. Review on applications of electric ehicles in the countryside. *Ciencia Rural.* 2017;47(7):e20161076 <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161076>

6. Юферев Л.Ю., Споров А.П., Гусаров В.А., Писарев Д.Ю. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 1(46). С. 3-8. EDN: SGJMPH

7. Мирзаев М.А. Проектирование автономного полевого робота для дифференцированного внесения агрохимических средств // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 4(45). С. 131-136. EDN: NBJZNR

8. Споров А.П., Писарев Д.Ю., Парахнич А.С. Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 3. С. 48-54. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54>

9. 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. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

10. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Самсонов В.А. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // Техника и оборудование для села. 2021. № 2 (284). С. 2-7. EDN: WGULNO

4. Jacek Caban, Jan Vrabel, Branislav Šarkan, Janusz Zarajczyk and Andrzej Marczuk. Analysis of the market of electric tractors in agricultural production. *MATEC Web Conf.* 2018;244:03005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403005>

5. Magalhaes R.O., Assunção M.V., Mendes Santos J.P., Silva E.V., Ferreira Junior L.G., Magalhaes R.R., Ferreira D.D. Review on applications of electric ehicles in the countryside. *Ciencia Rural.* 2017;47(7):e20161076 <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161076>

6. Yuferev L.Yu., Sporov A.P., Gusarov V.A., Pisarev D.Yu. Trends in the Development of Agricultural Electrified Mobile Equipment. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2022;69(1):3-8.

7. Mirzaev M.A. Design of an Autonomous Field Robot for Differentiated Application of Agrochemical Agents. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2021;68(4):131-136.

8. Sporov A.P., Pisarev D.Yu., Parakhnich A.S. Electric Drive for an Agricultural Vehicle. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2021;15(3):48-54. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54>

9. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2021;15(4):6-10. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

10. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S., Samsonov V.A. Priority areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for Rural Area.* 2021;2(284):2-7. (In Rus.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-2-7>

### Информация об авторах

**Андрей Юрьевич Измайлов<sup>1</sup>**, академик РАН, д-р техн. наук, директор; [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

**Алексей Семенович Дорохов<sup>2</sup>**, академик РАН, д-р техн. наук, заместитель директора; [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Иван Александрович Старостин<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

**Александр Вадимович Ещин<sup>4</sup>**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник; [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

<sup>1,2,3,4</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский пр-д, 5

### Вклад авторов

А.Ю. Измайлов – руководство исследованием, концептуализация;

А.С. Дорохов – концептуализация, методология, администрирование проекта;

И.А. Старостин – формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Ещин – проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

### Конфликт интересов

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

Статья поступила в редакцию 29.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 26.05.2023; принята к публикации 23.08.2023

### Author Information

**Andrey Y. Izmaylov<sup>1</sup>**, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Director; [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

**Aleksey S. Dorokhov<sup>2</sup>**, RAS Corresponding Member, DSc (Eng); [dorokhov.vim@yandex.ru](mailto:dorokhov.vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Ivan A. Starostin<sup>3</sup>**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [starwan@yandex.ru](mailto:starwan@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

**Aleksandr V. Eshchin<sup>4</sup>**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; [eschin-vim@yandex.ru](mailto:eschin-vim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

<sup>1,2,3,4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

### Author Contribution

A.Y. Izmaylov – research supervision, conceptualization, A.S. Dorokhov – conceptualization, methodology, project administration,

I.A. Starostin – formal analysis, research, original draft preparation, finalizing (reviewing) and editing the draft

A.V. Eshchin – investigation, original draft preparation, finalizing (reviewing) and editing the draft.

### Conflict of interests

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

Received 29.03.2023; revised 26.05.2023; accepted 23.08.2023