

Анализ актуальных методов повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту

Михаил В. Семьнин¹ glamsonic@ya.ruМихаил Ю. Костенко¹ kostenko.mihail2016@ya.ru

¹ Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Россия

Аннотация. Данная статья посвящена анализу актуальных методов повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту. Цель данной статьи – провести анализ существующих методов, направленных на повышение надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту. В связи с тем, что использование транспортных средств в сельском хозяйстве на деформируемом грунте имеет высокую актуальность, существует необходимость в разработке методов, которые могут повысить надежность рулевого управления и уменьшить вероятность аварийных ситуаций. Итогом данной статьи является рассмотрение различных подходов и методов, которые помогают решить данную проблему, статья направлена на то, чтобы обобщить опыт и знания в данной области и предложить рекомендации для улучшения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту. В статье рассмотрены следующие методы: улучшение качества материалов и деталей, разработка оптимальной геометрии шарового пальца, использование систем автоматической регулировки, применение новых технологий концепции «Precision Agriculture» и эксплуатационная самодиагностика с регулярным техническим обслуживанием. Выбор более прочных и долговечных материалов, установка системы автоматической регулировки подвески, а также проведение регулярного технического обслуживания позволят увеличить надежность и срок эксплуатации рулевого оборудования на деформируемом грунте, а использование новых технологий, таких как машинное обучение и искусственный интеллект, позволит повысить безопасность сельскохозяйственных машин. Автор статьи вносит новизну в изучение повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту, обращая внимание на применение современных технологий и методов, таких как использование систем автоматической регулировки и применение новых технологий. Также автор обращает внимание на необходимость регулярного технического обслуживания и замены изношенных деталей для поддержания эффективности и безопасности работы рулевого оборудования.

Ключевые слова: надежность, рулевое управление, сельскохозяйственный транспорт, деформируемый грунт, техническое обслуживание, условия эксплуатации, инженерные решения, устойчивость передвижения.

Analysis of current methods for improving the reliability of steering systems in agricultural transport when moving on deformable soils

Mikhail V. Semynin¹ glamsonic@ya.ruMikhail Yu. Kostenko¹ kostenko.mihail2016@ya.ru

¹ Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, st. Kostycheva, 1, Ryazan, 390044, Russia

Abstract. This article is dedicated to the analysis of current methods aimed at improving the reliability of steering control in agricultural transport when operating on deformable soil. Objective of this paper is to analyze existing methods aimed at enhancing the reliability of steering control in agricultural transport on deformable terrain. Given the high relevance of the use of vehicles in agriculture on such ground conditions, there is a need to develop methods that can improve steering reliability and reduce the likelihood of accidents. The outcome of this article is a consideration of various approaches and methods that help address this issue; the paper aims to consolidate experience and knowledge in this field and offer recommendations for enhancing the steering control reliability of agricultural transport when operating on deformable soil. The methods examined in this paper include improving the quality of materials and components, developing optimal ball joint geometry, using automatic adjustment systems, applying new «Precision Agriculture» technology concepts, and implementing operational self-diagnostics with regular technical maintenance. Selection of stronger and more durable materials, the installation of automatic suspension adjustment systems, and regular technical maintenance will increase the reliability and lifespan of steering equipment on deformable soil. The use of new technologies, such as machine learning and artificial intelligence, will enhance the safety of agricultural machines. The author brings novelty to the study of enhancing steering control reliability in agricultural transport on deformable soil by focusing on the application of modern technologies and methods, such as the use of automatic adjustment systems and the implementation of new technologies. Moreover, the author emphasizes the need for regular technical maintenance and replacement of worn parts to maintain the efficiency and safety of the steering equipment's operation.

Keywords: reliability, steering, agricultural transport, deformable soil, maintenance, operating conditions, engineering solutions, stability of movement.

Для цитирования

Семьнин М.В., Костенко М.Ю. Анализ актуальных методов повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 3. С. 36–41. doi:10.20914/2310-1202-2023-3-36-41

For citation

Semynin M.V., Kostenko M.Yu. Analysis of current methods for improving the reliability of steering systems in agricultural transport when moving on deformable soils. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 3. pp. 36–41. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-3-36-41

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Проблема низкой надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту имеет высокую актуальность и является серьезным вызовом для сельскохозяйственных предприятий и фермеров. В условиях, когда необходимо перемещать грузы и оборудование по полям с мягким грунтом, рулевое управление транспортными средствами испытывает повышенную нагрузку, что приводит к снижению его надежности и увеличению вероятности аварийных ситуаций. Одной из главных причин повреждений рулевого оборудования при передвижении на деформируемом грунте является наличие на пути препятствий, таких как камни, ветки, корни деревьев и другие объекты, которые могут повредить детали рулевого оборудования. Кроме того, при движении по деформируемому грунту колеса транспортного средства затягиваются в него, что приводит к более интенсивному трению и вибрации рулевого оборудования. Это может привести к раннему износу и поломкам деталей, что ухудшает работу транспортного средства и может повлечь за собой дополнительные затраты на ремонт. Для решения этой проблемы необходимо принимать меры по повышению надежности рулевого управления при передвижении по деформируемому грунту.

Цель статьи – провести анализ существующих методов, направленных на повышение надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту.

Объекты и методы

Объект – надежность рулевого управления грузового сельскохозяйственного автотранспорта.

В статье используются следующие методы: анализ существующих научных и технических публикаций, исследований и патентов, связанных с проблемой надежности рулевого управления на деформируемом грунте, испытания, включающие тестирование различных рулевых систем и устройств на разных типах деформируемого грунта, обработка полученных данных, позволяющая выявить статистически значимые различия между разными методами управления и оценить их эффективность.

В статье рассмотрены следующие методы: улучшение качества материалов и деталей, разработка оптимальной геометрии шарового пальца, использование систем автоматической регулировки, применение новых технологий концепции «Precision Agriculture» и эксплуатационная самодиагностика с регулярным техническим обслуживанием.

Изучение методов повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту показало, что одним из перспективных направлений является применение систем эксплуатационной самодиагностики. Эти системы могут значительно снизить количество отказов и повысить общий уровень надежности техники. Результаты научно-исследовательских работ, проведенных в этой области, показывают, что системы бортовой диагностики могут быть разработаны для мониторинга функционирования рулевого управления грузовых автомобилей, а также для обеспечения оперативной диагностики и устранения неисправностей. Принципы и алгоритмы функционирования систем самодиагностики должны обеспечивать надежность работы системы и исключать возможность потери информации внутри системы.

Ревякин М.М. [1] разработал систему эксплуатационной самодиагностики для повышения надежности грузовых автомобилей. Система включает в себя мониторинг функционирования автомобиля, структуру бортовой системы самодиагностики, а также принципы и алгоритмы функционирования. Исследование показало, что система влияет на уменьшение количества отказов и повышение надежности грузовых автомобилей.

Рулевое управление в сельскохозяйственном транспорте при передвижении по деформируемому грунту имеет высокую важность для обеспечения безопасности и комфорта водителя. Рулевой привод грузовых автомобилей отличается от легковых автомобилей наличием продольной рулевой тяги. Усилие передается через несколько элементов, включая рычаги поперечной рулевой тяги и продольной рулевой тяги. Шарниры соединений тяг шарнирные и защищены от попадания грязи. В поперечных тягах используются эксцентриковые вкладыши, устраняющие зазоры при износе сочленений. Регулировка длины тяг осуществляется за счет правой и левой резьбы на концах поперечной тяги и наконечниках.

Однако, изнашивание верхнего и нижнего шарниров рулевого вала, а также коррозия на иголках крестовины могут существенно снизить надежность рулевого привода. Средний ресурс нижних шарниров составляет 130 000 км, а ресурс вала-сектора – 350 000 км. Игольчатые подшипники крестовины могут изнашиваться со временем, если в механизм попадает влага и смазка вымывается. Спивак Д.А. [2] провел общий анализ долговечности рулевого управления в грузовых автомобилях малого класса и пришел к выводу, что верхний шарнир имеет высокий ресурс, что говорит о его высоком

качестве и надежности. Однако, нижние шарниры имеют ограниченный ресурс, который составляет примерно 130000 км, что требует регулярной проверки и замены при необходимости. Кроме того, игольчатые подшипники крестовины также могут стать причиной поломки рулевого вала, если внутрь механизма попадет влага, что приведет к вымыванию смазки и коррозии иголок.

Для обеспечения безопасности и долговечности рулевого вала необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и замену изношенных деталей. В связи с этим, необходимо постоянно следить за состоянием рулевого вала и его компонентов.

Корпус механизма, винт с шариковой гайкой и сошка являются основными компонентами рулевой системы, которые обеспечивают стабильность и безопасность управления автомобилем. По результатам исследований, эти детали практически не изнашиваются и имеют ресурс, соответствующий ресурсу автомобиля в целом. Однако, другие компоненты, такие как вал-сектор, подвержены износу в процессе эксплуатации. Средний ресурс вала-сектора исследуемых автомобилей составил 350000 км. Это достаточно большой ресурс, однако в процессе эксплуатации могут возникать различные проблемы, такие как износ, смятие и выкрашивание шлицевых поверхностей вала-сектора, а также выработка в местах работы уплотнительных колец.

В результате может произойти ухудшение качества управления автомобилем и повышение риска аварийных ситуаций. Поэтому, регулярное техническое обслуживание и замена изношенных деталей являются важными мерами для поддержания эффективности и безопасности работы рулевой системы.

Научно-исследовательская работа Терещенко Е.С., Мурга И.А., Фадеева Д.Ю., Шабалина Д.В. [3] сравнивала различные способы регулирования реактивного действия рулевого управления автомобилей многоцелевого назначения. Изменение реактивного действия может привести к увеличению усилия на рулевом колесе, что усложняет управление транспортным средством.

Для решения этой проблемы были разработаны системы автоматической регулировки, которые позволяют компенсировать неровности дороги и изменения веса груза, облегчая работу механизма рулевого управления. Однако, опыт показал, что изменение реактивного действия путем регулирования расхода насоса может привести к нелинейной зависимости усилия на рулевом колесе от расхода насоса, что усложняет выработку алгоритма управления усилием на рулевом колесе в зависимости от момента сопротивления повороту колес. Поэтому

для достижения более эффективного и точного управления транспортным средством на деформируемом грунте необходимо учитывать не только изменение реактивного действия, но и конструктивные особенности системы рулевого управления и её компонентов.

Исследование Горелова В.А. [4] выявило, что для решения этой задачи необходимо учитывать множество факторов, включая конструктивные особенности транспортных средств и свойства грунта.

В этом контексте численное моделирование прямолинейного движения колесной техники по бездорожью является важным инструментом, позволяющим разработчикам на стадии проектирования колесной техники оценить ее проходимость и определить оптимальные параметры трансмиссии и управления для различных условий эксплуатации. В результате исследования был разработан метод прогнозирования опорной проходимости колесных транспортных средств по деформируемому грунту, который может быть использован в различных задачах проектирования колесной техники и позволяет учитывать многие важные факторы, влияющие на ее проходимость. Результаты исследования подчеркивают эффективность метода и его важность для промышленности.

Одной из ключевых проблем является износ шаровых соединений, которые испытывают значительные нагрузки и находятся в напряженно-деформированном состоянии. Для решения этой проблемы можно использовать различные методы модернизации детали шарового шарнира рулевого привода, что позволит повысить стабильность рулевого управления и снизить износ шаровых соединений [5]. Одним из таких методов, может быть, выбор более прочных и долговечных материалов для изготовления шаровых и других деталей механизма, а также оптимизация геометрии шаровой опоры. Кроме того, можно использовать системы автоматической регулировки подвески, эксплуатационную самодиагностику и регулярное техническое обслуживание для обеспечения безопасности и эффективности работы рулевого управления. Внедрение новых технологий, таких как машинное обучение и искусственный интеллект, также может способствовать улучшению процесса управления и повышению безопасности сельскохозяйственных машин на деформируемом грунте.

Результаты и обсуждение

Далее в таблице представлен анализ выявленных методов повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту.

Таблица 1.

Анализ актуальных методов повышения надежности рулевого управления сельскохозяйственного транспорта при передвижении по деформируемому грунту

Table 1.

Analysis of actual methods of increasing reliability of steering control of agricultural transport when moving on deformable soil

Метод Method	Характеристика Characteristics
Улучшение качества материалов и деталей Improving material and part quality	Выбор более прочных и долговечных материалов для изготовления шаровых и других деталей механизма, использование качественных подшипников, уплотнителей и других компонентов, что позволит увеличить надежность и срок эксплуатации рулевого оборудования на деформируемом грунте, где колеса транспорта испытывают большие нагрузки и вибрации. Selection of stronger and more durable materials for manufacturing of ball and other parts of the mechanism, use of quality bearings, seals and other components, which will increase reliability and service life of steering equipment on deformable ground, where transport wheels experience high loads and vibrations.
Разработка оптимальной геометрии шарового пальца Development of optimum ball pin geometry	Анализ конструкции механизма и определение наиболее эффективной геометрии шаровой для улучшения качества рулевого управления. Analyzing the mechanism design and determining the most effective ball geometry to improve steering quality.
Использование систем автоматической регулировки Use of automatic adjustment systems	Установка системы автоматической регулировки подвески, которая будет компенсировать неровности дороги и изменения веса груза, облегчая работу механизма рулевого управления. Это позволит уменьшить нагрузку на рулевое оборудование, снизить требуемые усилия на рулевом колесе и повысить точность управления транспортным средством на деформируемом грунте. Installing an automatic suspension adjustment system that will compensate for road irregularities and changes in the weight of the load, facilitating the steering mechanism. This will reduce the load on the steering equipment, reduce the required steering wheel forces and improve the accuracy of vehicle control on deformable ground.
Применение новых технологий концепции «Precision Agriculture» Application of new technologies of the "Precision Agriculture" concept	Использование современных технологий, таких как машинное обучение и искусственный интеллект, для улучшения процесса управления и повышения безопасности сельскохозяйственных машин. Utilizing modern technologies such as machine learning and artificial intelligence to improve the steering process and increase the safety of agricultural vehicles.
Эксплуатационная самодиагностика, регулярное техническое обслуживание Operational self-diagnosis, regular maintenance	Проведение регулярного технического обслуживания механизма рулевого управления и замена изношенных деталей, чтобы сохранить его эффективность и безопасность работы. Performing regular maintenance on the steering mechanism and replacing worn parts to keep it running efficiently and safely.

Для более эффективной защиты рулевого оборудования на деформируемом грунте также можно использовать специальные устройства, такие как дополнительные защитные щитки, которые защищают рулевые детали от повреждений при прохождении через препятствия. Также можно установить системы мониторинга состояния рулевого оборудования, которые позволяют оперативно обнаруживать любые неисправности и принимать меры по их устранению.

Кроме того, важно регулярно производить техническое обслуживание транспортных средств и заменять изношенные детали, чтобы предотвратить возможные поломки и повреждения рулевого оборудования.

Концепция «Precision Agriculture» (точное сельское хозяйство) предполагает использование передовых технологий и методов для увеличения эффективности производства и повышения надежности сельскохозяйственной техники [6]. Эта концепция включает в себя использование современных информационных технологий,

датчиков, систем навигации и других инструментов для точного контроля и управления процессами сельского хозяйства, включая посев, уход за растениями и животными, уборку урожая и транспортировку сельскохозяйственной продукции.

Неоднородное распределение нагрузки на колеса при движении по деформируемому грунту может привести к неравномерному износу шин, а также к деформации их поверхности. Это может привести к неустойчивости движения, потере сцепления с дорогой и повышенному риску аварийных ситуаций. Поэтому при проектировании рулевого управления сельскохозяйственного транспорта необходимо учитывать особенности передвижения по деформируемому грунту и обеспечивать равномерное распределение нагрузки на колеса.

Исследователи Rosca, R., Cârlescu, P., Țenu, I., и Vlahidis, V. [7] в своей статье «Улучшение модели тягового механизма для взаимодействия между сельскохозяйственной шиной и почвой» упоминают, что первым ученым,

который систематически исследовал взаимодействие между почвой и колесом при помощи экспериментального анализа и теоретического моделирования, был Беккер. Эти экспериментальные исследования послужили основой для развития эмпирических моделей, которые могут быть использованы для оценки производительности колесных транспортных средств на деформированном грунте. Гипотеза о деформируемом поперечном сечении шины привела к изменению результатов относительно геометрии контакта шины с землей, а также силы и эффективности тяги. Анализ соответствия результатов показал, что цель исследования была достигнута по крайней мере в отношении скольжения колеса в рекомендованных пределах для сельскохо-

зяйственных операций (0–30 %). Коэффициент Пирсона для силы тяги слегка уменьшился, однако процент данных модели, попадающих в пределы 95 % доверительного интервала экспериментальных данных, значительно увеличился.

Заключение

Выбор правильных методов повышения надежности рулевого управления может значительно улучшить работу сельскохозяйственной техники на деформируемом грунте, снизить износ и повысить безопасность. Рекомендуется использовать все предложенные методы вместе для максимальной эффективности и долговечности рулевого управления транспорта.

Литература

- 1 Ревякин М.М., Жосан А.А., Головин С.И. Повышение эксплуатационной надежности технических систем как аспект стратегии ресурсосбережения мобильных энергетических средств агропромышленного комплекса // *Агротехника и энергообеспечение*. 2017. № 4 (17). С. 115-121.
- 2 Спивак Д.А., Полуэктов М.В. Общий анализ долговечности рулевого управления в грузовых автомобилях малого класса // *Молодой ученый*. 2021. № 18 (360). С. 112–117. URL: <https://moluch.ru/archive/360/80620/>
- 3 Терещенко Е.С., Мурог И.А., Фадеев Д.Ю., Шабалин Д.В. К вопросу о повышении эффективности рулевого управления автомобилей многоцелевого назначения // *Омский научный вестник*. 2013. Т. 118. № 2. С. 164–168.
- 4 Горелов В.А. Результаты численного моделирования прямолинейного движения двухзвенного колесного транспортного комплекса по деформируемому грунту // *Наука и образование*. 2012. № 01.
- 5 Семьин М.В., Костенко М.Ю. К вопросу снижения износа шаровых соединений транспортных средств сельскохозяйственного назначения // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2022. № 4(41). С. 96–102.
- 6 Aby G.R., Issa S.F. Safety of automated agricultural machineries: a systematic literature review // *Safety*. 2023. V. 9. №. 1. P. 13. doi: 10.3390/safety9010013
- 7 Rosca R., Cârlescu P.; Țenu I.; Vlahidis V. The Improvement of a Traction Model for Agricultural Tire–Soil Interaction // *Agriculture*. 2022. V. 12. № 12. P. 2035. doi: 10.3390/agriculture12122035
- 8 Фомичёв Е.В., Ревякин М.М. Диагностирование как способ получения информации о техническом состоянии сельскохозяйственных машин и повышения их надёжности // *Агротехника и энергообеспечение*. 2014. № 1 (1). С. 356-361.
- 9 Успенский И.А., Юхин, И.А., Рябчиков Д.С., Попов А.С. и др. Тенденции перспективного развития сельскохозяйственного транспорта // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014. №. 101. С. 2060-2075.
- 10 Si J., Niu Y., Lu J., Zhang H. et al. High-precision estimation of steering angle of agricultural tractors using GPS and low-accuracy MEMS // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. V. 68. №. 12. P. 11738-11745. doi: 10.1109/TVT.2019.2949298
- 11 Liu H., Yan S., Shen Y., Li C. et al. Model predictive control system based on direct yaw moment control for 4WID self-steering agriculture vehicle // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. V. 14. №. 2. P. 175-181.
- 12 Gat G., Gan-Mor S., Degani A. Stable and robust vehicle steering control using an overhead guide in greenhouse tasks // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. V. 121. P. 234-244. doi: 10.1016/j.compag.2015.12.019
- 13 Qiu Q., Fan Z., Meng Z., Zhang Q. et al. Extended Ackerman Steering Principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. V. 152. P. 40-50. doi: 10.1016/j.compag.2018.06.036
- 14 Liu Z., Zheng W., Wang N., Lyu Z. et al. Trajectory tracking control of agricultural vehicles based on disturbance test // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. V. 13. №. 2. P. 138-145.
- 15 Zardin B., Borghi M., Gherardini F., Zanasi N. Modelling and simulation of a hydrostatic steering system for agricultural tractors // *Energies*. 2018. V. 11. №. 1. P. 230. doi: 10.3390/en11010230
- 16 Oksanen T., Backman J. Guidance system for agricultural tractor with four wheel steering // *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. V. 46. №. 4. P. 124-129. doi: 10.3182/20130327-3-JP-3017.00030
- 17 Mousazadeh H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles // *Journal of Terramechanics*. 2013. V. 50. №. 3. P. 211-232. doi: 10.1016/j.jterra.2013.03.004
- 18 Hu J., Gao L., Bai X., Li T. et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2015. V. 31. №. 10. P. 1-10.
- 19 Li S., Xu H., Ji Y., Cao R. et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. V. 158. P. 335-344. doi: 10.1016/j.compag.2019.02.019
- 20 Man Z., Yuhan J., Shichao L., Ruyue C.A.O. et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology // *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2020. V. 51. №. 4.

References

- 1 Revyakin M.M., Zhosan A.A., Golovin S.I. Increasing the operational reliability of technical systems as an aspect of the resource-saving strategy for mobile energy means of the agro-industrial complex. *Agricultural technology and energy supply*. 2017. no. 4 (17). pp. 115-121. (in Russian).
- 2 Spivak D.A., Poluektov M.V. General analysis of the durability of steering in small class trucks. *Young scientist*. 2021. no. 18 (360). pp. 112–117. Available at: <https://moluch.ru/archive/360/80620/> (in Russian).
- 3 Tereshchenko E.S., Murog I.A., Fadeev D.Yu., Shabalin D.V. On the issue of increasing the efficiency of steering control of multi-purpose vehicles. *Omsk Scientific Bulletin*. 2013. vol. 118. no. 2. pp. 164–168. (in Russian).
- 4 Gorelov V.A. Results of numerical modeling of rectilinear motion of a two-link wheeled transport complex on deformable soil. *Science and Education*. 2012. no. 01. (in Russian).
- 5 Semynin M.V., Kostenko M.Yu. On the issue of reducing wear of ball joints of agricultural vehicles. *Agrarian Bulletin of the Verkhnevolzhye*. 2022. no. 4(41). pp. 96–102. (in Russian).
- 6 Aby G.R., Issa S.F. Safety of automated agricultural machineries: a systematic literature review. *Safety*. 2023. vol. 9. no. 1. pp. 13. doi: 10.3390/safety9010013
- 7 Rosca R., Cârlescu P.; Țenu I.; Vlahidis V. The Improvement of a Traction Model for Agricultural Tire–Soil Interaction. *Agriculture*. 2022. vol. 12. no. 12. pp. 2035. doi: 10.3390/agriculture12122035
- 8 Fomichev E.V., Revyakin M.M. Diagnostics as a way to obtain information about the technical condition of agricultural machines and increase their reliability. *Agricultural technology and energy supply*. 2014. no. 1(1). pp. 356-361. (in Russian).
- 9 Uspensky I.A., Yukhin, I.A., Ryabchikov D.S., Popov A.S. et al. Trends in the future development of agricultural transport. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014. no. 101. pp. 2060-2075. (in Russian).
- 10 Si J., Niu Y., Lu J., Zhang H. et al. High-precision estimation of steering angle of agricultural tractors using GPS and low-accuracy MEMS. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. vol. 68. no. 12. pp. 11738-11745. doi: 10.1109/TVT.2019.2949298
- 11 Liu H., Yan S., Shen Y., Li C. et al. Model predictive control system based on direct yaw moment control for 4WID self-steering agriculture vehicle. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. vol. 14. no. 2. pp. 175-181.
- 12 Gat G., Gan-Mor S., Degani A. Stable and robust vehicle steering control using an overhead guide in greenhouse tasks. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. vol. 121. pp. 234-244. doi: 10.1016/j.compag.2015.12.019
- 13 Qiu Q., Fan Z., Meng Z., Zhang Q. et al. Extended Ackerman Steering Principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. vol. 152. pp. 40-50. doi: 10.1016/j.compag.2018.06.036
- 14 Liu Z., Zheng W., Wang N., Lyu Z. et al. Trajectory tracking control of agricultural vehicles based on disturbance test. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. vol. 13. no. 2. pp. 138-145.
- 15 Zardin B., Borghi M., Gherardini F., Zanasi N. Modelling and simulation of a hydrostatic steering system for agricultural tractors. *Energies*. 2018. vol. 11. no. 1. pp. 230. doi: 10.3390/en11010230
- 16 Oksanen T., Backman J. Guidance system for agricultural tractor with four wheel steering. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. vol. 46. no. 4. pp. 124-129. doi: 10.3182/20130327-3-JP-3017.00030
- 17 Mousazadeh H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*. 2013. vol. 50. no. 3. pp. 211-232. doi: 10.1016/j.jterra.2013.03.004
- 18 Hu J., Gao L., Bai X., Li T. et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2015. vol. 31. no. 10. pp. 1-10.
- 19 Li S., Xu H., Ji Y., Cao R. et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. vol. 158. pp. 335-344. doi: 10.1016/j.compag.2019.02.019
- 20 Man Z., Yuhan J., Shichao L., Ruyue C.A.O. et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2020. vol. 51. no. 4.

Сведения об авторах

Михаил В. Семьинин аспирант, кафедра технологии металлов и ремонта машин, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Россия, glamsonic@ya.ru

 <https://orcid.org/>

Михаил Ю. Костенко д.т.н., профессор, кафедра технологии металлов и ремонта машин, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, ул. Костычева, 1, г. Рязань, 390044, Россия, kostenko.mihail2016@ya.ru

 <https://orcid.org/>

Information about authors

Mikhail V. Semynin graduate student, metal technology and machine repair department, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, st. Kostycheva, 1, Ryazan, 390044, Russia, glamsonic@ya.ru

 <https://orcid.org/>

Mikhail Yu. Kostenko Dr. Sci. (Engin.), professor, metal technology and machine repair department, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, st. Kostycheva, 1, Ryazan, 390044, Russia, kostenko.mihail2016@ya.ru

 <https://orcid.org/>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 08/08/2023

После редакции 31/08/2023

Принята в печать 25/08/2023

Received 08/08/2023

Accepted in revised 31/08/2023

Accepted 25/08/2023
