

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>

УДК 630:631.3.072.31



Результаты имитационного моделирования рекуперации энергии навесным механизмом трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями

Валерий И. Посметьев, posmetyev@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Максим А. Савинков, savinkov99max03@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

Виктор В. Посметьев, victorvpo@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Вадим О. Никонов , 8888nike8888@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Владимир А. Зеликов, zelikov-vrn@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Евгений В. Поздняков, pozd.ev@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Решение проблемы повышения топливной экономичности и надежности лесных почвообрабатывающих агрегатов при выполнении операций обработки почвы при лесовосстановлении на вырубках, является актуальной задачей лесного хозяйства. Обоснован перспективный путь повышения эффективности лесных почвообрабатывающих орудий, заключающийся в более широком использовании в их конструкциях совершенных рекуперативных систем. Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы, позволяющая сократить расход топлива трактором, снизить динамические нагрузки, воспринимаемые навесным устройством с дисковыми орудиями, а также повысить производительность и качество обрабатываемой почвы трактором. Целью исследования, является оценка на основе имитационного моделирования показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора при изменении высоты препятствий, частоты встречи с препятствиями, а также скорости движения агрегата. Установлено, что при уменьшении с 10 до 2,5 м дистанции между препятствиями высотой 0,1 м рекуперированная мощность возрастает с 1,91 до 13,3 кВт. Выявлено, что при увеличении скорости с 0,3 до 1 м/с – рекуперированная мощность повышается с 1,4 до 11 кВт. С увеличением высоты неровностей от 0,3 до 1 м – рекуперированная мощность увеличивается по линейному закону с 0,38 до 2,75 кВт. В широком диапазоне скоростей движения трактора с орудием в транспортном положении рекуперативная навесная система обеспечивает достаточно эффективную рекуперированную мощность: от 0,4 до 4,9 кВт при движении со скоростями от 0,3 до 1,2 м/с. Результаты исследования показывают, что рекуперативная навесная система обеспечивает снижение затрат труда и расхода топлива агрегируемого трактора на 30 %. Полученные результаты могут быть применены в процессе проектирования аналогичных рекуперативных навесных систем трактора.

Ключевые слова: *рекуперация энергии, навесная система, математическая модель, препятствие, почва, трактор, компьютерная программа, неровности, пневмогидроаккумулятор, имитационное моделирование, рабочая жидкость, дисковое орудие*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Результаты имитационного моделирования рекуперации энергии навесным механизмом трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями / В. И. Посметьев, В. В. Посметьев, М. А. Савинков, В. О. Никонов, В. А. Зеликов, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 104-122. – Библиогр.: с. 118-121 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>.

Поступила 15.11.2024. Пересмотрена 22.02.2025. Принята 01.03.2025. Опубликовано онлайн 24.03.2025.

Article

Results of simulation modeling of energy recovery by a tractor mounted mechanism with a device for aggregating it with forest disk implements

Valerii I. Posmetev, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Maksim A. Savinkov, savinkov99max03@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

Viktor V. Posmetev, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vadim O. Nikonov  8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Vladimir A. Zelikov, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Evgeny V. Pozdnyakov, pozd.ev@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

Abstract

The solution to the problem of increasing the fuel efficiency and reliability of forest tillage units when performing soil processing operations during reforestation in clearings is an urgent task of forestry. A promising way to increase the efficiency of forest tillage implements is substantiated, consisting in a wider use of advanced recuperative systems in their designs. A promising design of a recuperative mounted system is proposed, which allows reducing fuel consumption by the tractor, reducing dynamic loads perceived by the mounted device with disk tools, and increasing the productivity and quality of the soil processed by the tractor. The purpose of the study is to evaluate, based on simulation modeling, the efficiency indicators of the recuperative mounted system of the tractor when changing the height of obstacles, the frequency of encounters with obstacles, and the speed of the unit. It was found that when the distance between obstacles with a height of 0.1 m is reduced from 10 to 2.5 m, the recuperated power increases from 1.91 to 13.3 kW. It was found that with an increase in speed from 0.3 to 1 m/s, the recuperated power increases from 1.4 to 11 kW. With an increase in the height of unevenness from 0.3 to 1 m, the recuperated power increases linearly from 0.38 to 2.75 kW. In a wide range of tractor speeds with an implement in the transport position, the recuperative mounted system provides a fairly effective recuperated power: from 0.4 to 4.9 kW when moving at speeds from 0.3 to 1.2 m/s. The results of the study show that the recuperative mounted system provides a 30% reduction in labor costs and fuel consumption of the aggregated tractor. The results can be applied in the design of similar recuperative mounted systems of the tractor.

Keywords: *energy recovery, mounted system, mathematical model, obstacle, soil, tractor, computer program, unevenness, pneumatic-hydraulic accumulator, simulation modeling, working fluid, disk implement*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Posmetev V. I., Posmetev V. V., Savinkov M. A., Nikonov V. O., Zelikov V. A., Pozdnyakov E. V. (2024) Results of simulation modeling of energy recovery by a tractor mounted mechanism with a device for aggregating it with forest disk implements. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, № 1 (57), pp. 104-122 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>.

Received 15.11.2024. Revised 22.02.2025. Accepted 01.03.2025. Published online 24.03.2025.

Введение

В процессе работы на нераскорчеванных вырубках, гарях и других неудобиях наиболее энергозатратными процессами, являются первичная подготовка почвы и многократные уходы за лесными культурами. Это связано с тем, что лесокультурные площади насыщены трудно перерезаемыми корнями, пнями, валунами, порубочными остатками, растительными включениями, выходами скальных пород, валяжником, кустарниками. Кроме этого, почва сильно задернелая, а в процессе передвижения лесных почвообрабатывающих агрегатов неизбежны наезды на препятствия [1-3].

Такие условия работы лесных почвообрабатывающих агрегатов приводят к: воздействию на них значительных вынужденных колебаний в широком частотно-амплитудном диапазоне; увеличению расхода топлива; ухудшению условий труда водителя; снижению производительности; низкому качеству обработки почвы; большим энергозатратам на движение лесных почвообрабатывающих агрегатов из-за криволинейности траектории и неровностей поверхностей лесных объектов, а также дополнительных сопротивлений, связанных с преодолением рабочими органами орудий неперерезаемых препятствий. Дополнительно к этому, рабочие органы почвообрабатывающих орудий в этих условиях неизбежно подвергаются интенсивным ударным нагрузкам из-за частых столкновений с препятствиями. Это приводит к ухудшению их надежности и долговечности. Давление рабочей жидкости в гидроцилиндре при транспортировании орудия в навешенном состоянии превышает рабочее в 1,5-2,5 раза. Такая жесткая система способствует развитию усталостных напряжений в деталях и узлах лесных почвообрабатывающих агрегатов, которые ведут к интенсивному износу и поломкам звеньев механизма навески трактора [4-6].

По различным оценкам исследователей расход топлива двигателями агрегируемых тракторов с лесными почвообрабатывающими орудиями выше на 15-20 %, чем при их работе на лесных объектах с более благоприятными условиями. Установлено также, что значительные непроизводительные затраты энергии, расходуются при колебаниях силового гидроцилиндра навесного механизма трактора в процессе транспортирования массивных дисковых орудий от

мест базирования к месту работы и обратно, а также разворотах трактора без выполнения технологических операций, подъема и опускания навесного орудия. Также, значительные потери энергии возникают при перепадах давления и нагреве рабочей жидкости в гидроприводе навесного механизма при обработке почвы орудием [7, 8].

В этой связи, решение проблемы повышения топливной экономичности и надежности при выполнении операций обработки почвы лесными почвообрабатывающими агрегатами, является актуальным и своевременным. В настоящее время российскими и зарубежными учеными ведется активная работа по повышению эффективности функционирования тракторов, агрегируемых с навесными почвообрабатывающими орудиями [9-23].

Abbaspour-Giandeh Y. и др. (2020) [9] в своем исследовании изучили влияние изменения тягового усилия культиватора при увеличении глубины обработки почвы, ее влажности, а также скорости движения трактора. Установлено, что с увеличением скорости движения трактора и повышением глубины обработки почвы возрастает тяговое усилие трактора, и ухудшается качество обработки почвы. При увеличении влажности почвы, значение тягового усилия снижается.

В статье Zhou M. и др. (2022) [10] рассмотрена проблема нестабильной глубины обработки почвы культиватором трактора по причине неровностей обрабатываемой поверхности. Процесс управления глубиной обработки почвы с помощью традиционной механической и гидравлической системы сложен. Применение бортового компьютера, контролирующего изменение углов поворота рычагов навесной системы, а также управляющего гидравлической системой изменения положения культиватора, позволяет за счет отслеживания в режиме реального времени геометрических параметров неровностей, имеющих на поверхности почвы, корректировать скорость и стабильность рабочей глубины обработки почвы, и, таким образом, повышать тяговую эффективность работы трактора.

Лuo C. и др. (2022) [11] в своей работе предложили метод дистанционного мониторинга глубины обработки почвы. Для осуществления этого метода

использовался трехточечный механизм навески трактора с измерителем положения нижней стержневой тяги, который учитывал влияние корпуса трактора на глубину обработки почвы навесными орудиями, а также влияние рельефа опорной поверхности и значения ее уклона на изменение глубины обработки почвы. Система мониторинга, состоящая из многопозиционных датчиков и компонентов машинного зрения, также включает в себя устройство определения глубины обработки почвы, терминал мониторинга работы и удаленную систему обслуживания.

Sun X. и др. (2022) [12] в своей статье проанализировали тенденции развития электрогидравлической системы навески трактора, включающие в себя совершенствование конструкции навесной системы, улучшение методов регулировки и алгоритмов управления глубиной обработки почвы. Установлено, что снизить трудоемкость процесса, потребление энергии, улучшить комфортность водителя, а также повысить качество обрабатываемой почвы, можно путем использования многопараметрического метода регулировки глубины обработки почвы и внедрения интеллектуального алгоритма управления глубиной обработки почвы.

Liu C. и др. (2023) [13] в своей работе исследовали стратегии активного управления демпфированием между трактором и задними сцепками. Ими установлено, что традиционная гидравлическая система сцепки трактора имеет очень низкое демпфирование, что приводит к нестабильности системы при подъеме сцепки трактора, недостаточному запасу устойчивости трактора, а также значительным колебаниям давления рабочей жидкости в системе. В связи с этим, авторами предложен метод улучшения коэффициента демпфирования гидравлической сцепки трактора с обратной связью по давлению. Применение предлагаемого метода, обладающего высокой надежностью, позволяет снизить затраты на управление демпфированием гидравлической сцепки, повысить плавность движения трактора, безопасность и комфортность для водителя.

Luo Z. и др. (2023) [14] в своей работе предложили метод управления давлением рабочей жидкости в гидравлическом цилиндре электрогидравлической навесной системы электротрактора. Управление дав-

лением рабочей жидкости в гидроцилиндре электрогидравлической системы сцепки осуществлялось контроллером трактора. Он обеспечивал в режиме реального времени регулировку оптимального значения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре, в зависимости от создаваемого сопротивления при различной глубине обработки почвы. Использование данного метода позволяет снизить пробуксовку колес на 9 %, увеличить эффективность тяги на 2,7 %, улучшить общую эффективность трактора на 3 % и снизить общие потери энергии электротрактора на 7,5 % при поддержании заданной глубины обработки почвы по сравнению с традиционным методом управления положением навесной системы.

Sun X. и др. (2023) [15] в своей статье с целью сокращения стоимости разработки электрогидравлических систем навески трактора предложили несколько конструкций стендов для исследования гидравлических навесных систем тракторов, позволяющих управлять нагрузкой для изменения глубины обработки почвы. Основными элементами стенда, являлись: стационарный компьютер; электрогидравлическая система управления навесной системой; система датчиков, обеспечивающая сбор, отображение и хранение данных в режиме реального времени.

Gao Y. и др. (2024) [16] в своей работе для улучшения качества обработки почвы выполнили исследование возникающих вибраций в процессе обработки почвы между трактором, трехточечным механизмом навески и роторным культиватором. Установлено, что с увеличением скорости движения агрегата и ухудшением качества почвы, характеристики вибраций, действующих на культиватор, навесной механизм и трактор возрастают. Для уменьшения сопротивления обработки роторным культиватором почвы требуется увеличить амплитуду его вибраций. Для снижения вибраций, действующих на трактор, необходимо оптимизировать скорость движения трактора с глубиной обработки почвы роторным культиватором.

Chukewad, Y. M. и др. (2024) [17] в своей статье представили трехточечную сцепку трактора, в которой нижние рычаги приводятся в действие двумя независимыми гидравлическими цилиндрами. Для синхронного перемещения двух нижних рычагов разработан

специализированный контроллер их положения. Установлено, что навешиваемое на трехточечную сцепку трактора орудие может следовать по рельефу, двигаясь вертикально, а также сохраняя нулевой крен вокруг продольной оси трактора.

Khaehanchanpong Y. и др. (2017) [18] в своем исследовании предложили для трактора культиватор, используемый в процессе междурядной обработки, рабочей шириной 80 см, скоростью вращения вала ротора 500 об./мин и общим весом 518 кг. Установлено, что скорость движения трактора не влияет на производительность такого культиватора. Скорость движения была ограничена для тракторов мощностью 25,3 и 37,3 кВт. Расход топлива у трактора мощностью 37,3 кВт был выше, чем у трактора мощностью 25,3 кВт.

Xu J. и др. (2021) [19] в своей статье с целью повышения качества работы и точности управления электрогидравлической системой навески трактора разработали алгоритм нечеткого управления, основанный на комбинированной регулировке силы и положения рабочего органа при изменении глубины обработки почвы. Результаты испытания показали, что предлагаемая система регулировки глубины обработки почвы с использованием разработанного алгоритма имеет высокую скорость реагирования, что повышает надежность работы агрегата и качество обработки почвы.

Kim Y-S. и др. (2020) [20] в своей работе выполнили исследование влияния глубины обработки почвы и выбора силовой передачи на изменение механической нагрузки и топливной экономичности трактора во время движения. Механическая нагрузка во время обработки почвы является показателем общей производительности и ключевым фактором при проектировании силовой передачи трактора. Установлено, что нагрузка на заднюю ось и расход топлива больше всего зависят от сочетания глубины обработки почвы и выбора силовой передачи. С увеличением глубины обработки почвы, нагрузки на двигатель трактора и расход топлива возрастают. Для обеспечения надежности и эффективности работы трактора, необходимо, чтобы информация о глубине обработки почвы и скорости движения соответствовала силовой передаче, используемой трактором при выполнении операции обработки почвы.

Md-Tahir H. и др. (2021) [21] в своей статье сравнили тяговые характеристики, расход топлива и производительность тракторов, оснащенных обычными колесами с шинами и жесткими колесами с грунтозацепами в процессе движения при обработке почвы. Оснащение трактора жесткими колесами с грунтозацепами в сравнении с трактором с обычными колесами, улучшает тяговые характеристики при аналогичном весе оборудования, увеличивает производительность, снижает расход топлива, обеспечивает более низкое сопротивление движению, увеличивает общую эффективность обработки почвы. Кроме этого, использование таких колес, помимо снижения расхода топлива позволяет избежать уплотнения почвы и ухудшения состояния окружающей среды.

Shrivastava P. и др. (2024) [22] в своем исследовании предложили визуальный интерфейс, позволяющий измерять в режиме реального времени, отображать и хранить следующие параметры производительности трактора с навесным орудием: параметры геопозиции, глубины обработки почвы, скорости движения, пробуксовки, расхода топлива, тяги, крутящего момента отбора мощности. Разработанная система состоит из: глобальной системы позиционирования, поворотного потенциометра, датчиков нагрузки, тензодатчиков, микроконтроллера для обработки данных, интеллектуального сенсорного экрана. Использование данной системы позволяет снизить потери мощности трактора, повысить эффективность его работы, снизить эксплуатационные затраты при выполнении обработки почвы.

Коо Y. M. и др. (2021) [23] в своей работе выполнили оценку тяговой мощности и потребления топлива трактором, оснащенным комбинированным навесным орудием. Использование такого орудия упрощает процесс обработки почвы, повышает производительность процесса, а также снижает эксплуатационные расходы. Выявлено, что расход топлива трактором возрастает при использовании комбинированного навесного орудия, однако удельный объемный расход топлива уменьшается по мере увеличения скорости вращения вала отбора мощности и скорости движения трактора в прямом направлении.

Анализ научных работ, приведенных выше, показал, что повысить эффективность тракторов, агрегируемых навесным технологическим оборудованием можно за счет использования: оптимального соотношения глубины обработки почвы и скорости движения трактора в зависимости от влажности почвы; интеллектуальных систем дистанционного мониторинга, отслеживающих в режиме реального времени параметры неровностей на поверхности обрабатываемой почвы, и принимающих на этой основе решения об изменении углов поворота рычагов навесной системы, корректирующих за счет управления гидравлической системой глубину обработки почвы; многопараметрического метода регулировки и интеллектуального алгоритма управления глубиной обработки почвы; активного управления демпфированием между трактором и гидравлическими задними сцепками; метода управления давлением рабочей жидкости в гидроцилиндре навесной системы трактора в зависимости от глубины обработки почвы; усовершенствованных конструкций трехточечных сцепок; трактора с жесткими колесами, оснащенными грунтозацепами; комбинированного навесного орудия.

Установлено, что традиционные гидросистемы лесных почвообрабатывающих агрегатов не предусматривают аккумуляцию и полезное использование безвозвратно теряемой энергии. В этой связи, одним из перспективных путей повышения эффективности лесных почвообрабатывающих машин, является более широкое использование в их конструкциях совершенных рекуперативных систем.

Многолетний опыт работы авторов в области разработки и исследования рекуперативных систем и устройств для транспортно-технологических и лесных машин, позволил разработать перспективную конструкцию рекуперативной навесной системы трактора (рис. 1). Использование такой навесной системы, позволяет: снизить расход топлива трактором за счет преобразования потенциальной энергии массы дискового орудия в энергию рабочей жидкости с последующим ее накоплением в пневмогидроаккумуляторе и полезном использовании в рабочем процессе; повысить производительность обработки почвы трактором; снизить динамические нагрузки, воспринимаемые навесным устройством и дисковыми орудиями; дистанционно изменять и удерживать рабочие органы дисковых орудий на заданной

глубине обработки почвы, и, тем самым, повысить качество ее обработки.

Целью работы, является оценка показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора при изменении высоты препятствий, частоты встречи с препятствиями, скорости движения агрегата.

Цель работы достигается за счет разработки математической модели и на ее основе компьютерной программы, описывающей движение трактора, взаимодействие дисковых рабочих органов орудия с почвой и рекуперацию энергии рабочей жидкости навесной системой при встрече дискового орудия с препятствиями.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объект исследования – процесс рекуперации энергии рекуперативной навесной системой трактора. Предмет исследования – закономерности влияния высоты неровностей, дистанции между препятствиями, скорости движения трактора и положения культиватора на показатели эффективности работы рекуперативной навесной системы трактора.

Дизайн эксперимента или сбор данных

Колесный трактор при движении на лесном объекте совершает поступательное движение вдоль обрабатываемого ряда (рис. 2, а). При движении по неровностям, имеющимся на опорной поверхности почвы колесный трактор совершает наклоны в поперечном и продольном направлениях. Для оценки работы предлагаемой рекуперативной навесной системы трактора, а также исследования основных ее конструктивных параметров, оказывающих наибольшее влияние на рекуперативную мощность, генерируемой навесной системой трактора, применены методы математического моделирования. Для удобства выполнения расчетов в математической модели, описывающей сложное-пространственное движение трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой, разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать влияние конструктивных параметров навесной системы, характеристик опорной поверхности почвы и эксплуатационных параметров трактора на изменение рекуперированной навесной системой мощности. Для визуализации колесного трактора в компьютерной программе, реализующей математическую модель,

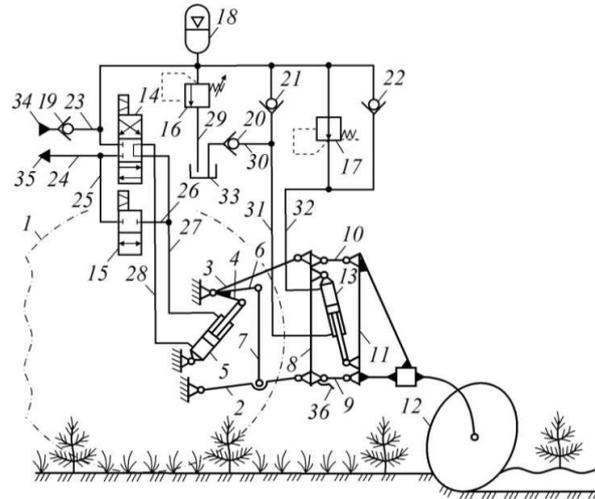


Рисунок 1. Рекуперативная навесная система трактора: 1 – трактор; 2, 3 – тяги; 4, 6, 9, 10 – рычаги; 5, 13 – гидроцилиндры; 7 – раскосы; 8 – треугольная ферма; 11 – рама; 12 – дисковые рабочие органы; 14, 15 – гидро-распределители; 16 и 17 – регулируемый предохранительный и редуционный клапаны; 18 – пневмогидравлический аккумулятор; 19-22 – обратные клапаны; 23-32 – трубопроводы; 33 – гидробак; 34, 35 – напорный и сливной порты

Figure 1. Recuperative mounted system of the tractor: 1 – tractor; 2, 3 – rods; 4, 6, 9, 10 – levers; 5, 13 – hydraulic cylinders; 7 – diagonals; 8 – triangular truss; 11 – frame; 12 – disk working bodies; 14, 15 – hydraulic distributors; 16 and 17 – adjustable safety and pressure-reducing valves; 18 – pneumohydraulic accumulator; 19-22 – check valves; 23-32 – pipelines; 33 – hydraulic tank; 34, 35 – pressure and drain ports

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own schema

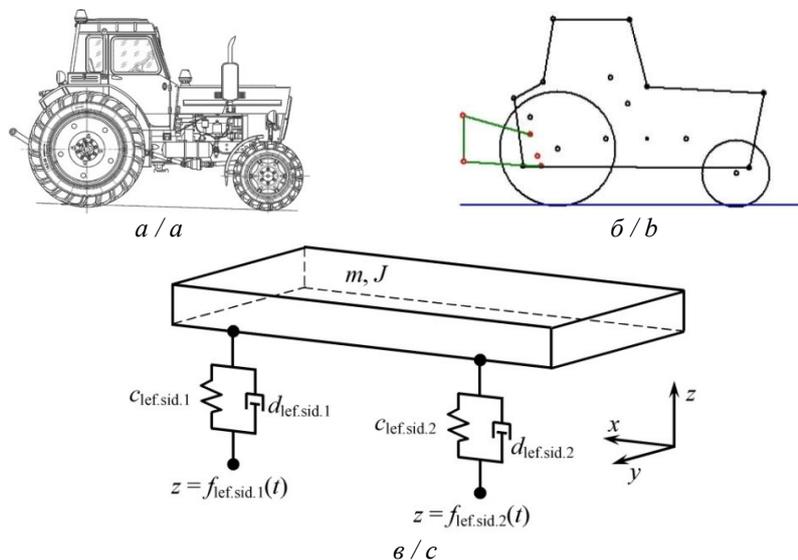


Рисунок 2. Общий вид трактора – а и его схемы при имитации в компьютерной программе – б и описании в математической модели – в

Figure 2. General view of the tractor – a and its diagrams when simulated in a computer program – b and described in a mathematical model – c

Источник: собственные схемы авторов
Source: authors' own schemes

и для проверки корректности переноса геометрических параметров, колесный трактор представляется

схематично, как совокупность точек и отрезков (рис. 2, б). Математическая модель позволяет учитывать

работу рекуперативной навесной системы трактора, функционирование гидравлического привода такой системы, а также изменение параметров опорной поверхности обрабатываемой почвы. В математической модели, движущийся в трехмерном пространстве колесный трактор представлен твердым телом, на которое действуют силы в четырех точках со стороны моделируемой опорной поверхности почвы (рис. 2, в).

Колесный трактор обладает массой m , а также моментом инерции J , расчет которого осуществляется в каждый момент времени для текущей оси вращения. Положение колесного трактора в пространстве описывается в математической модели декартовыми координатами его центра тяжести (x, y, z) , а также углами отклонения (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z) локальной системы координат относительно общей базовой системы координат. Движение колесного трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой в математической модели, описывается системой дифференциальных уравнений, составленных на основе законов динамики, как вращательного, так и поступательного движения:

$$\left\{ \begin{aligned} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 F_{\text{left},i}^x + \sum_{i=1}^2 F_{\text{right},i}^x; \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 F_{\text{left},i}^y + \sum_{i=1}^2 F_{\text{right},i}^y; \\ m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= -m_k \cdot g + \sum_{i=1}^2 F_{\text{left},i}^z + \sum_{i=1}^2 F_{\text{right},i}^z; \\ J_x \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 M^x(F_{\text{left},i}) + \sum_{i=1}^2 M^x(F_{\text{right},i}); \\ J_y \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 M^y(F_{\text{left},i}) + \sum_{i=1}^2 M^y(F_{\text{right},i}); \\ J_z \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 M^z(F_{\text{left},i}) + \sum_{i=1}^2 M^z(F_{\text{right},i}), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где t – время; $F_{\text{left},i}$ и $F_{\text{right},i}$ – силы, действующие на раму трактора; M^i – моменты сил $F_{\text{left},i}$ и $F_{\text{right},i}$ относительно оси i .

Для моделирования рекуперативной навесной системы трактора использовалась точечно-стержневая модель (рис. 3), которая составлена из совокупности точек, обладающих заданной массой и перемещающихся в пространстве по законам динамики. Точки $P_1 \dots P_{16}$, описывающие в математической модели рекуперативную навесную систему соединены между собой попарно тремя различными связями. Данные материальные точки связаны между собой шарнирно невесомыми стержнями

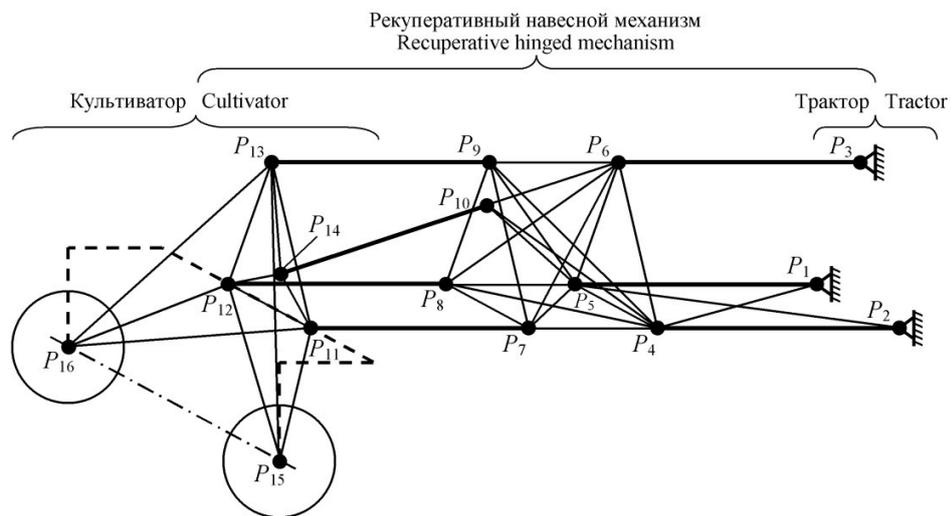


Рисунок 3. Точечно-стержневая модель рекуперативной навесной системы трактора
Figure 3. Point-rod model of a tractor's recuperative mounted system

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own schema

с заданными начальными длинами. Движение в пространстве рассматриваемых точек приводит к сжатию или растяжению связывающих их стержней. Это сопровождается тем, что невесомые стержни для кинематической связности моделируемой рекуперативной навесной системы и сохранения своих первоначальных размеров оказывают силовое воздействие на точки.

Траектории точек P_i в математической модели рассчитывают на основе следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{P_i} \frac{d^2 x_{P_i}}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{mat.poin.}} F_{x_{P_i P_j}} + \begin{cases} F_{x_{dis.g.}}, & i=15, 16; \\ 0, & i \neq 15, 16; \end{cases} \\ m_{P_i} \frac{d^2 y_{P_i}}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{mat.poin.}} F_{y_{P_i P_j}} + \begin{cases} F_{y_{dis.g.}}, & i=15, 16; \\ 0, & i \neq 15, 16; \end{cases} \\ m_{P_i} \frac{d^2 z_{P_i}}{dt^2} = -m_{P_i} g + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{mat.poin.}} F_{z_{P_i P_j}} + \begin{cases} F_{z_{dis.g.}}, & i=15, 16; \\ 0, & i \neq 15, 16, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где m_{P_i} – масса точки P_i ; $N_{mat.poin.}$ – количество задаваемых точек; $F_{x_{dis.g.}}$, $F_{y_{dis.g.}}$, $F_{z_{dis.g.}}$ – декартовы составляющие силы со стороны опорной поверхности на дисковое орудие рекуперативной навесной системы трактора; g – ускорение свободного падения.

Зависимость, описывающая рельеф опорной поверхности почвы по которой движется трактор, оснащенный рекуперативной навесной системой, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} z_n(x) = & \sum_{i=1}^{N_h} (H_{hil.min} + F_{1i} (H_{hil.max} - H_{hil.min})) \cdot \\ & \cdot \exp \left(- \frac{(x - F_{2i} L_x)^2 + (y_n - F_{3i} L_y)^2}{2(\sigma_{hil.min} + F_{4i} (\sigma_{hil.max} - \sigma_{hil.min}))^2} \right) + \\ & + \sum_{j=1}^{N_j} (H_{obst.min} + F_{1j} (H_{obst.max} - H_{obst.min})) \cdot \\ & \cdot \exp \left(- \frac{(x - F_{2j} L_x)^2 + (y_n - F_{3j} L_y)^2}{2(\sigma_{obst.min} + F_{4j} (\sigma_{obst.max} - \sigma_{obst.min}))^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $H_{hil.max}$ и $H_{hil.min}$ – максимальное и минимальное значения высот холмов; $\sigma_{hil.max}$ и $\sigma_{hil.min}$ – среднеквадратическое отклонение максимального и минимального значений высот холмов; $H_{obst.max}$ и $H_{obst.min}$ – максимальное и минимальное значения высот препятствий; $\sigma_{obst.max}$ и $\sigma_{obst.min}$ – среднеквадратическое отклонение максимального и минимального значений

высот препятствий; $N_{obst.}$ и $N_{hil.}$ – количество препятствий и холмов; F_{1i} , ... F_{4i} и F_{1j} , ... F_{4j} – последовательные реализации случайной величины F ; L_y и L_x – ширина и длина моделируемого участка опорной поверхности.

В процессе выполнения серий компьютерных экспериментов, колесный трактор, оснащенный рекуперативной навесной системой, движется с заданной скоростью относительно моделируемой опорной поверхности. На каждом шаге интегрирования осуществляется расчет координат x , z центров дисков навесного оборудования, а также центров колес трактора. Силы, действующие на диск навесного оборудования трактора и колесо трактора, рассчитываются на основе упруго-вязкой модели почвы по следующим зависимостям (рис. 4):

$$\begin{aligned} F_x(x_{cir.}, y_{cir.}) &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} F_{ix} - \alpha v_a = \\ &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} c_{rig.} (R_k - r_i) \frac{x_{cir.} - x_i}{r_i} - \alpha v_a; \\ F_z(x_{cir.}, y_{cir.}) &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} F_{iz} - \alpha \frac{dz_0}{dt} = \\ &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} c_{rig.} (R_k - r_i) \frac{z_{cir.} - z_i}{r_i} - \alpha \frac{dz_0}{dt}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $(x_{cir.}, z_{cir.})$ – координаты центра, описываемого диска или колеса трактора; $R_{cir.}$ – радиус диска или колеса трактора; $N_{num.dot.}$ – количество точек поверхности моделируемой почвы, одновременно контактирующих с диском или колесом трактора; (x_i, z_i) – координаты i -й материальной точки; $c_{rig.}$ – коэффициент жесткости взаимодействия диска или колеса трактора с поверхностью почвы; r_i – расстояние между стержнем и центром диска или колеса трактора.

Условие, характеризующее контакт i -й точки опорной поверхности почвы с диском или колесом трактора имеет следующий вид:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (z_i - z_k)^2} < R_{cir.}. \quad (5)$$

Несколько серий экспериментов, проведенных в компьютерной программе заключались в исследовании изменения показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора при его

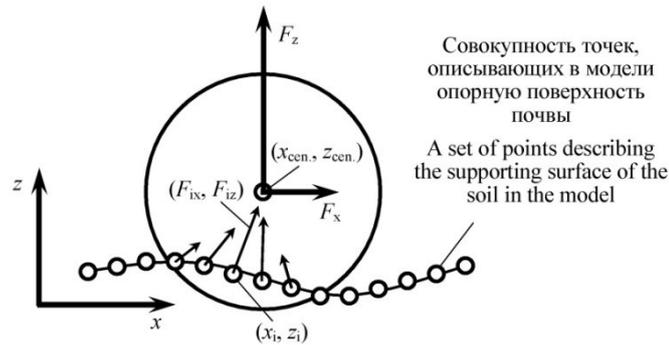


Рисунок 4. Схема сил, действующих на дисковое орудие трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой трактора
 Figure 4. Diagram of forces acting on a disk implement of a tractor equipped with a regenerative tractor mounted system

Источник: собственная схема авторов
 Source: authors' own schema

прямолинейном движении по поверхности почвы с различным количеством пней и изменяемым расстоянием между ними (рис. 5). Функция, описывающая пень в форме трапеции, располагаемый на опорной поверхности почвы, при преодолении его левым бортом трактора, имеет следующий вид:

$$z_{lef.}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_{st}; \\ \frac{h_{st.}}{b_{st.}}(x - x_{st.}), & x_{st.} < x \leq x_{st.} + b_{st.}; \\ h_{st.}, & x_{st.} + b_{st.} < x \leq x_{st.} + b_{st.} + d_{st.}; \\ h_{st.} - \frac{h_{st.}}{b_{st.}}(x - (x_{st.} + b_{st.} + d_{st.})), & \\ x_{st.} + b_{st.} + d_{st.} < x \leq x_{st.} + 2b_{st.} + d_{st.}; \\ 0, & x > x_{st.} + 2b_{st.} + d_{st.}; \end{cases} \quad (6)$$

где $h_{st.}$ – высота пня; $d_{st.}$ – диаметр пня; $x_{st.}$ – координата нижней части пня; $b_{st.}$ – половина сбега пня.

Основным показателем, характеризующим эффективность рекуперативной навесной системы, является энергия E_p , запасаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе:

$$E_p = \int_{t_1}^{t_2} P_{pn.}(t) Q_{pn.}(t) dt, \quad (7)$$

где t_1 и t_2 – начало и конец промежутка времени, за который оценивается накопление энергии; $P_{pn.}$ – давление в пневмогидравлическом аккумуляторе; $Q_{pn.}$ – скорость поступления (расход) рабочей жидкости в пневмогидравлический аккумулятор.

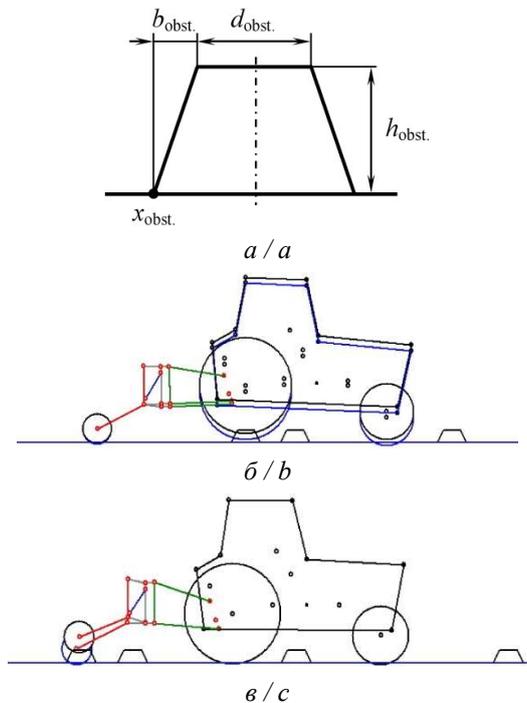


Рисунок 5. Схемы представления в математической модели препятствия в виде пня – a , моделируемого в компьютерной программе трактора, преодолеваемого колесами – b и дисковым орудием – c моделируемых препятствий

Figure 5. Schemes of representation in a mathematical model of an obstacle in the form of a stump – a , modeled in a computer program of a tractor, overcome by wheels – b and a disk tool – c in modeled obstacles

Источник: собственные схемы авторов
 Source: authors' own schemes

Необходимо отметить, что один из наиболее целесообразных режимов использования рекуперативной навесной системы является циклическое использование при движении агрегата по обрабатываемым рядкам с накоплением энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе и подъемом орудия для разворота в конце ряда с расходом энергии из пневмогидравлического аккумулятора. После того, как энергия пневмогидравлического аккумулятора частично или полностью израсходована, по мере движения агрегата рекуперированная энергия E_p сначала максимальна, затем постепенно снижается при последующих колебаниях в навесном механизме по мере заполнения рабочей жидкостью пневмогидравлического аккумулятора и повышения давления. При этом можно ожидать близкую к экспоненциальной зависимости от времени накопленной в пневмогидравлическом аккумуляторе энергии.

Также, важным показателем является средняя рекуперированная мощность, рассчитываемая при условии незаряженного пневмогидравлического аккумулятора:

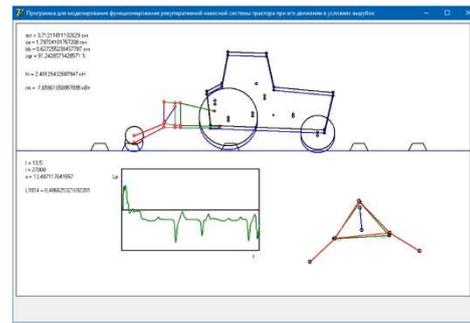
$$N_{reg.pov.} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{pn.0} \cdot Q_{pn.0}(t) dt, \quad (8)$$

где $t_1 \dots t_2$ – интервал усреднения; $P_{pn.0}$ – давление начала зарядки незаряженного пневмогидравлического аккумулятора; $Q_{pn.0}$ – поступление (расход) рабочей жидкости в полость пневмогидравлического аккумулятора в предположении о постоянном (максимальном) объеме полости.

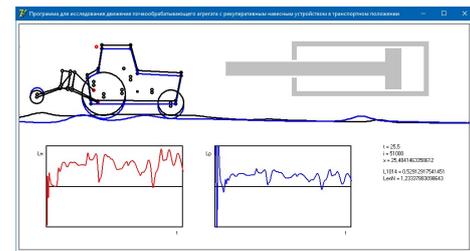
Разработаны две компьютерные программы для проведения компьютерных экспериментов по движению лесного почвообрабатывающего агрегата, оснащенного рекуперативной навесной системой трактора с обработкой почвы и преодолением препятствий, а также по движению с поднятым орудием по неровной опорной поверхности (рис. 6). Программы позволяют исследовать эффективность разработанной рекуперативной навесной системы трактора в различных режимах работы.

Результаты

Разработанная модель позволила изучить два режима работы почвообрабатывающего агрегата, оснащенного рекуперативной навесной системой:



a / a



б / б

Рисунок 6. Интерфейсные формы компьютерных программ для исследования рекуперативной навесной системы трактора при его движении в условиях вырубок – а и при движении по неровностям трактора с поднятым в транспортное положение дисковым орудием – б

Figure 6. Interface forms of computer programs for studying the recuperative mounted system of a tractor during its movement in clearing conditions – а and during movement over uneven surfaces of a tractor with a disk tool raised to the transport position – б

Источник: собственные схемы авторов
Source: authors' own schemes

обработка почвы с периодическим контактом с препятствиями (пнями, корнями или камнями). При этом рекуперация энергии контакта с препятствием и вертикального подъема орудия осуществляется с помощью гидроцилиндра орудия, а гидроцилиндр навесного механизма трактора удерживался заблокированным. Базовыми параметрами в этом случае были: высота препятствия 0,2 м, средняя дистанция между препятствиями 5 м, скорость движения агрегата 1 м/с; движение трактора по неровной опорной поверхности с поднятым орудием (в транспортном положении). При этом заблокирован гидроцилиндр орудия, и рекуперация энергии вертикальных колебаний орудия осуществляется с помощью гидроцилиндра навесного механизма трактора. Базовыми параметрами в этом случае были:

максимальная высота неровностей опорной поверхности 0,5 м, скорость движения трактора 1 м/с.

При обработке почвы на вырубках дисковым культиватором высота не перерезаемых препятствий h_{obst} оказывает существенную роль на траекторию движения дисковой батареи, контактирующей с препятствием, и дополнительное силовое воздействие на навесной механизм. Для изучения влияния высоты h_{obst} препятствий, имеющих на поверхности почвы на изменение рекуперированной мощности $N_{\text{reg.pow.}}$ рекуперативной навесной системой трактора, выполнена серия экспериментов в компьютерной программе, при осуществлении которых высота h_{obst} препятствий последовательно с шагом 0,05 м увеличивалась в диапазоне от 0 до 0,4 м (рис. 7).

Обсуждение

Обнаружено, что с увеличением высоты препятствий рекуперированная мощность резко уве-

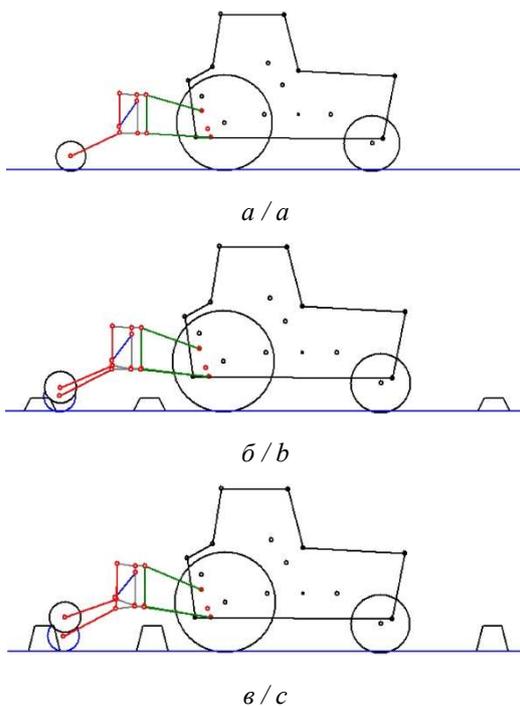


Рисунок 7. Результаты компьютерных экспериментов с препятствиями различной высоты h_{obst} :

$a - h_{\text{obst.}} = 0 \text{ м}; б - h_{\text{obst.}} = 0,2 \text{ м}; в - h_{\text{obst.}} = 0,4 \text{ м}$

Figure 7. Results of computer experiments with obstacles of different heights $h_{\text{obst.}}$: $a - h_{\text{obst.}} = 0 \text{ m};$

$b - h_{\text{obst.}} = 0.2 \text{ m}; c - h_{\text{obst.}} = 0.4 \text{ m}$

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

личивается (по степенному закону с показателем степени около 3) (рис. 8). Если при высоте препятствия 0,1 м рекуперированная мощность составляет 0,83 кВт, то при высоте 0,15 м – уже 1,61 кВт, а при высоте 0,2 м – 6,8 кВт. Такая резкая зависимость связана с тем, что при увеличении высоты препятствия происходит изменение характера процесса рекуперации. При малых h_{obst} дисковая батарея только перекачивается через препятствие, что приводит к незначительному изменению хода штока гидроцилиндра орудия, и, соответственно, малой рекуперированной мощности. При больших же высотах h_{obst} дисковая батарея упирается в препятствие и поэтому необходима значительная сила, чтобы поднять батарею вверх по препятствию. При этом существенно изменяется ход штока гидроцилиндра орудия, и соответственно рекуперированная мощность оказывается значительно выше. Статистическая достоверность границ доверительного интервала для всех приведенных зависимостей на рисунках 8, 10, 11 и 13 достигала 0,95, а статистическая надежность границ интервала прогнозирования – 0,95.

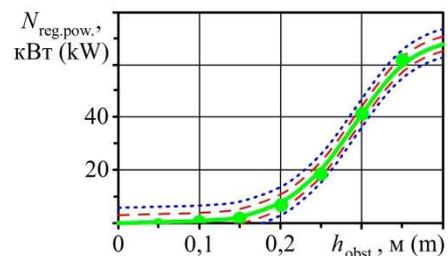


Рисунок 8. График влияния высоты h_{obst} преодолеваемого препятствия рекуперативной навесной системой трактора на рекуперированную устройством мощность $N_{\text{reg.pow.}}$

Figure 8. Graph of the influence of the height $h_{\text{obst.}}$ of the obstacle overcome by the regenerative mounted system of the tractor on the power

$N_{\text{reg.pow.}}$ recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Можно ожидать, что рекуперированная мощность будет зависеть от частоты встреч орудия с препятствиями. Для исследования данной закономерности проведена серия компьютерных экспериментов, в которой варьировали среднюю дистанцию d_{dist} между препятствиями на уровнях 1, 1,25,

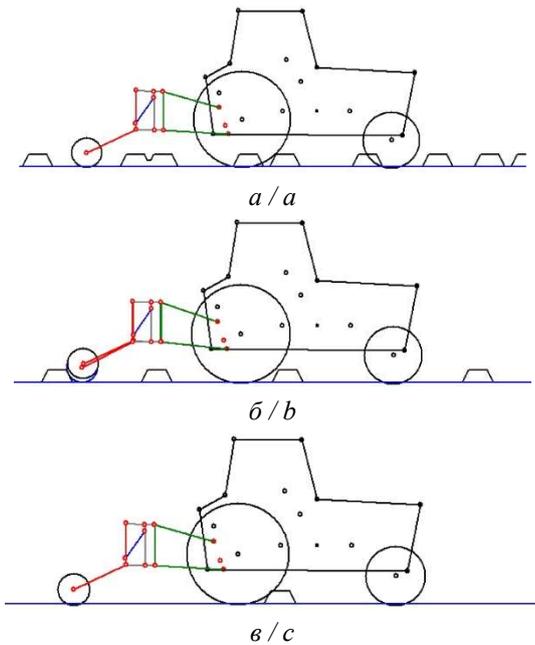


Рисунок 9. Результаты компьютерных

экспериментов с различной средней дистанцией между препятствиями d_{dist} : $a - d_{\text{dist}} = 1$ м;

$б - d_{\text{dist}} = 2,5$ м; $в - d_{\text{dist}} = 10$ м

Figure 9. Results of computer experiments with different average distances between obstacles d_{dist} :

$a - d_{\text{dist}} = 1$ m; $b - d_{\text{dist}} = 2.5$ m; $c - d_{\text{dist}} = 10$ m

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

2,5, 3,75, 5, 6,25, 7,5, 10 м (рис. 9).

Обнаружено, что рекуперированная мощность $N_{\text{reg.pow.}}$ зависит от дистанции между препятствиями d_{dist} по обратно-пропорциональному закону (рис. 10). В частности, при уменьшении дистанции d_{dist} между препятствиями с 10 до 2,5 м рекуперированная мощность возрастает с 1,91 до 13,3 кВт.

Скорость движения трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой, оказывает значительное влияние на частоту встречи дискового орудия с имеющимися на опорной поверхности почвы препятствиями. Для исследования влияния скорости v движения трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой на изменение рекуперированной мощности $N_{\text{reg.pow.}}$ выполнена серия экспериментов, при выполнении которых скорость трактора последовательно увеличивали с шагом 0,5 м/с в диапазоне от 0 до 3 м/с. Выявленная в результате компьютерных экспериментов зависимость в целом близка к линейной: при увеличении скорости

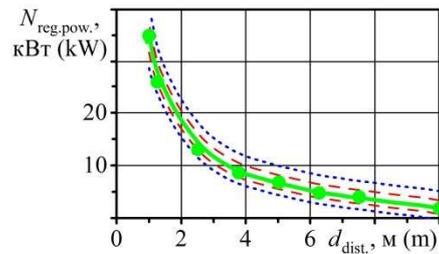


Рисунок 10. График влияния средней дистанции между препятствиями d_{dist} при движении трактора на рекуперированную устройством мощность $N_{\text{reg.pow.}}$

Figure 10. Graph of the influence of the average distance between obstacles d_{dist} when the tractor is moving on the power $N_{\text{reg.pow.}}$ recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

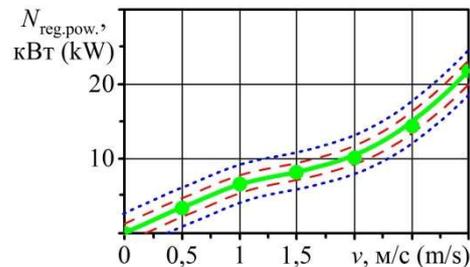


Рисунок 11. График влияния скорости v движения агрегата на рекуперированную устройством мощность $N_{\text{reg.pow.}}$

Figure 11. Graph of the influence of the speed v of the unit on the power $N_{\text{reg.pow.}}$ recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

с 0,5 до 3 м/с рекуперированная мощность $N_{\text{reg.pow.}}$ повышается с 3,4 до 21,7 кВт (рис. 11).

При движении трактора с орудием в транспортном положении с увеличением высоты h_{unev} неровностей опорной поверхности увеличиваются вертикальные колебания поднятого орудия, и, соответственно, можно ожидать увеличение рекуперированной мощности $N_{\text{reg.pow.}}$ за счет уменьшения и сглаживания колебаний. Для исследования данных закономерностей выполнена серия экспериментов, в которых последовательно с шагом 0,1 м увеличивали высоту h_{unev} неровностей в диапазоне от 0 до 1 (рис. 12). С увеличением высоты h_{unev} неровностей

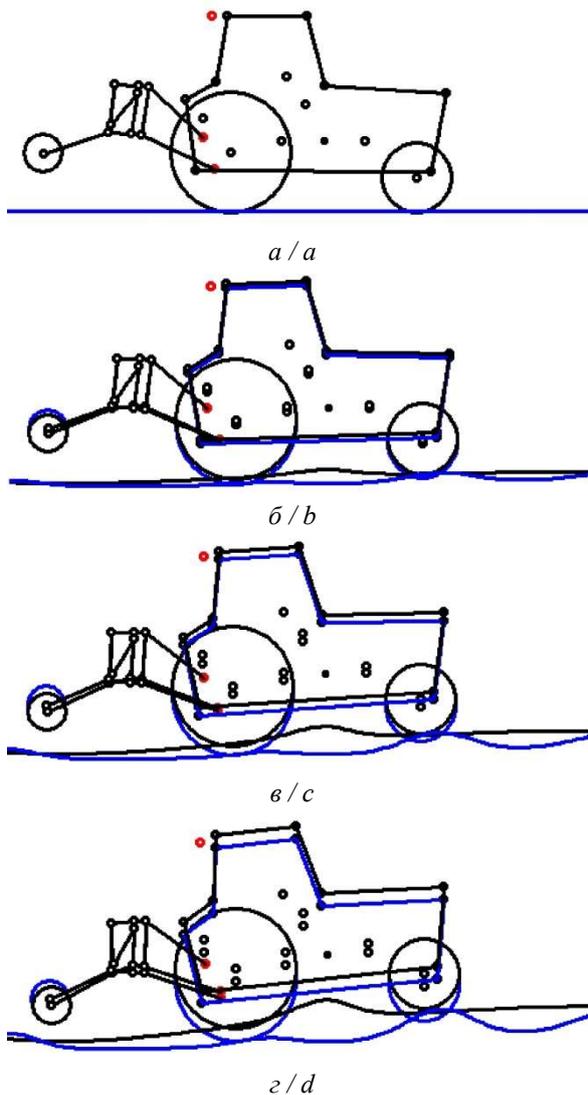


Рисунок 12. Результаты компьютерных экспериментов с различной высотой неровностей

$h_{\text{unev.}}$: $a - h_{\text{unev.}} = 0 \text{ м}$; $b - h_{\text{unev.}} = 0,2 \text{ м}$;
 $c - h_{\text{unev.}} = 0,4 \text{ м}$; $d - h_{\text{unev.}} = 0,6 \text{ м}$

Figure 12. Results of computer experiments with different heights of irregularities

$h_{\text{unev.}}$: $a - h_{\text{unev.}} = 0 \text{ m}$; $b - h_{\text{unev.}} = 0.2 \text{ m}$;
 $c - h_{\text{unev.}} = 0.4 \text{ m}$; $d - h_{\text{unev.}} = 0.6 \text{ m}$

Источник: собственные вычисления авторов
 Source: authors' own calculations

от 0 до 0,3 м рекуперированная мощность $N_{\text{reg.pow.}}$ возрастает по квадратичному закону с 0 до 0,38 кВт. Однако дальнейшее увеличение высоты $h_{\text{unev.}}$ неровностей с 0,3 до 1 м происходит по линейному закону с 0,38 до 2,75 кВт (рис. 13, a).

Для оценки влияния скорости v движения трактора с поднятым орудием на эффективность рекуперации энергии рекуперативной навесной системой проведена серия из девяти компьютерных экспериментов, в которых варьировали скорость v на уровнях 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 2, 2,5, 3 м/с. С увеличением скорости трактора от 0,5 до 3 м/с рекуперированная мощность повышается с 0,4 до 4,9 кВт.

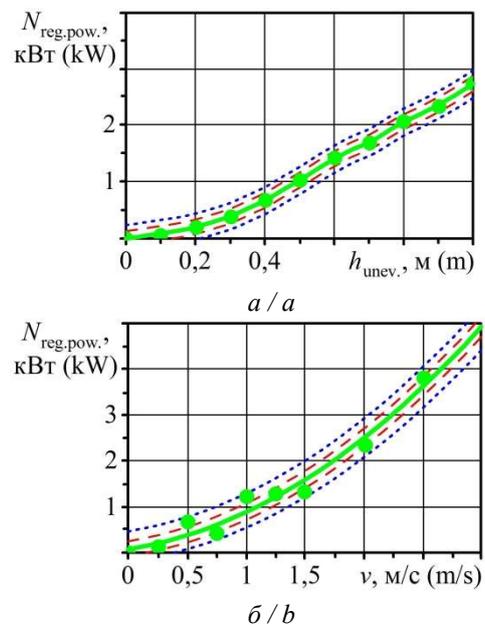


Рисунок 13. Графики влияния высоты неровностей $h_{\text{unev.}}$ опорной поверхности – a и скорости v движения трактора с дисковым орудием в транспортном положении – b на рекуперированную устройством мощность $N_{\text{reg.pow.}}$

Figure 13. Graphs of the influence of the height of unevenness $h_{\text{unev.}}$ of the supporting surface – a and the speed v of movement of the tractor with a disk implement in the transport position – b on the power $N_{\text{reg.pow.}}$ recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов
 Source: authors' own calculations

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании аналогичных рекуперативных навесных систем различных по тяговому классу тракторов. Дальнейшее исследование будет направлено на экспериментальную проверку разработанной математической модели, которая позволит более точно определить влияние исследуемых факторов на изменение показателей эффективности раз-

рабочанной рекуперативной навесной системы трактора.

Заключение

Анализ результатов исследования позволяет сделать заключение, что повысить эффективность тракторов, агрегируемых с навесными почвообрабатывающими орудиями можно за счет использования: оптимального соотношения глубины обработки почвы и скорости движения трактора в зависимости от влажности почвы; интеллектуальных систем дистанционного мониторинга, отслеживающих в режиме реального времени параметры неровностей на поверхности обрабатываемой почвы, и принимающих на этой основе решения об изменении углов поворота рычагов навесной системы, корректирующих за счет управления гидравлической системой глубину обработки почвы; многопараметрического метода регулировки и интеллектуального алгоритма управления глубиной обработки почвы; активного управления демпфированием между трактором и гидравлическим навесным механизмом; метода управления давлением рабочей жидкости в гидроцилиндре навесной системы трактора в зависимости от глубины обработки почвы; усовершенствованных конструкций трехточечных сцепок.

Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы трактора, использование которой позволяет: снизить расход топлива трактором за счет преобразования потенциальной энергии массы дискового орудия в энергию рабочей жидкости с последующим ее накоплением в пневмогидроаккумуляторе и

полезным использованием в рабочем процессе; повысить производительность обработки почвы; снизить динамические нагрузки, воспринимаемые навесным устройством и дисковыми орудиями; дистанционно изменять и удерживать дисковые орудия на заданной глубине обработки почвы, и, тем самым, повысить качество ее обработки.

Предлагаемая навесная система трактора обеспечивает эффективную рекуперацию энергии в широком диапазоне частоты встреч дискового орудия с препятствиями, скоростей обработки почвы и высот неровностей опорной поверхности. Навесная система позволяет рекуперировать мощность порядка 21,7 кВт при наибольшей исследуемой скорости движения трактора.

Использование предлагаемой навесной системы трактора позволяет существенно повысить эффективность работы почвообрабатывающего агрегата на вырубках. Результаты теоретического исследования показывают, что рекуперативная навесная система обеспечивает снижение затрат труда и расхода топлива агрегируемого трактора на 30 %. Полученные результаты могут быть применены в процессе проектирования аналогичных навесных систем трактора. Дальнейшее исследование будет связано с оптимизацией конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора, а также с обоснованием перспективных конструкций рекуперативных гидроприводов для поддресоренных масс колесных и гусеничных тракторов.

Список литературы

1. Бартенев И. М., Драпалюк М. В. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 5 (383). – С. 117-133. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>.
2. Мясищев Д. Г., Шостенко Д. Н., Серебренников А. В. Потребление топлива порталным лесохозяйственным трактором с учетом стохастических факторов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 5 (377). – С. 145-154. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-145-154>.
3. Посметьев В. И., Никонов В. О., Савинков М. А., Снятков Е. В. Перспективы разработки рекуперативного навесного механизма трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями. Проблемы эксплуатации и перспективы развития автомобильного транспорта : Материалы всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 05-06 октября 2023 года / Отв. редактор В. О. Никонов. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2023. – С. 101-111. DOI: https://doi.org/10.58168/OPPRTD_101-111.
4. Посметьев В. И., Никонов В. О., Посметьев В. В., Зеликов В. А., Колодий П. В. Компьютерное

моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 158-178. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>.

5. Посметьев В. И., Никонов В. О., Посметьев В. В., Зеликов В. А., Попиков П. И., Колодий П. В., Михайлов А. А. Обоснование перспективной схемы кривошипного гидромотора для гидропривода опорно-поворотного устройства манипулятора лесовозного автопоезда. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 3(51). – С. 180-199. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>.

6. Побединский В. В., Иовлев Г. А., Ляхов С. В., Голдина И. И. Нейро-нечеткая сеть для оценки остаточного ресурса тракторных двигателей. Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 120-130. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-120-130>.

7. Теринов Н. Н., Герц Э. Ф., Мехренцев А. В., Залесов С. В., Терехов Г. Г., Толкач О. В. Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом. Resources and Technology. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.7263>.

8. Беляев А. Н., Тришина Т. В., Афоничев Д. Н. Анализ боковых реакций почвы на колесах трактора при повороте. Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 44-56. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6363>.

9. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernandez-Hernandez J. L., Penna A. F., Herrera-Miranda I. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators. Agriculture 2020, 10, 145. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>.

10. Zhou M., Xia J., Zhang S., Hu M., Liu Z., Liu G. Development of a Depth Control System Based on Variable-Gain Single-Neuron PID for Rotary Burying of Stubbles. Agriculture 2022, 12, 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>.

11. Luo C., Chen J., Guo S., An X., Xin Y., Wen C., Liu H., Meng Z., Zhao C. Development and Application of a Remote Monitoring System for Agricultural Machinery Operation in Conservation Tillage. Agriculture 2022, 12, 1460. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091460>.

12. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System. Agriculture 2022, 12, 1547. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>.

13. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Mao E. A Vibration Reduction control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback. Agriculture 2023, 13, 1546. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>.

14. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydraulic Hitch System of Electric Tractors. Agriculture 2023, 13, 1555. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>.

15. Sun X., Song Y., Wang Y., Qian J., Lu Z., Wang T. Design and Test of a Tractor Electro-Hydraulic-Suspension Tillage-Depth and Loading-Control System Test Bench. Agriculture 2023, 13, 1884. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101884>.

16. Gao Y., Yang Y., Fu S., Feng K., Han X., Hu Y., Zhu Q., Wei X. Analysis of Vibration Characteristics of Tractor-Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain. Agriculture 2024, 14, 1139. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071139>.

17. Chukewad Y. M., Chadha S., Jagdale K. S., Elkunchwar N., Rosa U. A. Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System. AgriEngineering 2024, 6, 1725-1746. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>.

18. Khaehanchanpong Y., Ahamed T., Takigawa T. Design, Fabrication and Performance Evaluation of an Inter-Row Cultivator for Sugarcane Fields. Inventions 2017, 2, 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions2030025>.

19. Xu J., Li R., Li Y., Zhang Y., Sun H., Ding X., Ma Y. Research on Variable-Universe Fuzzy Control Technology of an Electro-Hydraulic Hitch System. Processes 2021, 9, 1920. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9111920>.

20. Kim Y-S, Kim W-S., Baek S-Y., Baek S-M., Kim Y-J., Lee S-D., Kim Y-J. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. Sensors 2020, 20, 2450. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092450>.

21. Md-Tahir H., Zhang J., Xia J., Zhou Y., Zhou H., Du J., Sultan M., Mamona H. Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. *Agronomy* 2021, 11, 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>.
22. Shrivastava P., Tewari V. K., Gupta C., Chouriya A. HMI-assisted visual interface-cum-embedded system for measurement of tractor-implement performance parameters. *J Field Robotics*. 2024 ; 41 : 2147-2168. DOI: <https://doi.org/0.1002/rob.22221>.
23. Koo Y. M., Kang Y. Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation. *Journal of Biosystems Engineering* (2021) 46 : 496-507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00122-w>.

References

1. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V. *Sovershenstvovanie tekhnologii lesovosstanovleniya na virubkakh primeneniem energonasischennih traktorov* [Improving the technology of reforestation in clearings using energy-intensive tractors]. *Lesnoy zhurnal = Russian forestry journal*. 2021. № 5(383). pp. 117-133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>.
2. Myasishev D. G., Shostenko D. N., Serebrennikov A. V. *Potreblenie topliva portalnim lesohozyaistvennim traktorom s uchetom stohasticheskikh faktorov* [Fuel consumption of a portal forestry tractor taking into account stochastic factors]. *Lesnoy zhurnal = Russian forestry journal*. 2020. № 5(377). pp. 145-154. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-145-154>.
3. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Savinkov M. A., Snyatkov E. V. *Perspektivi razrabotki rekuperativnogo navesnogo mehanizma traktora s prisposobleniem dlya agregatirovaniya ego s lesnimi diskovimi orudiyami* [Prospects for the development of a recuperative tractor mounted mechanism with a device for its aggregation with forest disk tools]. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 5-6, 2023*. pp. 101-111. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.58168/OPPRTD_101-111.
4. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Kolodii P. V. *Obosnovanie perspektivnoi shemi krivoshipnogo gidromotora dlya gidroprivoda oporno-povorotnogo ustroystva manipulyatora lesovoznogo avtopoezda* [Computer modeling of a recuperative crank mechanism for turning a timber truck manipulator column]. *Forestry Engineering Journal*. 2023. Vol. 13, № 2(50). pp. 158-178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>.
5. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Popikov P. I., Kolodii P. V., Mihailov A. A. *Obosnovanie perspektivnoi shemi krivoshipnogo gidromotora dlya gidroprivoda oporno-povorotnogo ustroystva manipulyatora lesovoznogo avtopoezda* [Justification of a promising scheme of a crank hydraulic motor for a hydraulic drive of a support-slewing device of a timber road train manipulator]. *Forestry Engineering Journal*. 2023. Vol. 13, № 3(51). pp. 180-199. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>.
6. Pobedinskii V. V., Iovlev G. A., Lyahov S. V., Goldina I. I. *Neiro-nechetkaya set dlya ocenki ostatochnogo resursa traktornih dvigatelei* [Neuro-fuzzy network for assessing the residual life of tractor engines]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2022. Vol. 26, № 2. pp. 120-130. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-120-130>.
7. Terinov N. N., Gerc E. F., Mehrencev A. V., Zalesov S. V., Terehov G. G., Tolkach O. V. *Tekhnologicheskie shemi ispolzovaniya mini traktorov na rubkah uhoda za lesom* [Technological schemes for using mini-tractors in forest thinning]. *Resources and Technology*. 2023. Vol. 20, № 4. pp. 1-27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.7263>.
8. Belyaev A. N., Trishina T. V., Afonichev D. N. *Analiz bokovih reakcii pochvi na kolesah traktora pri povorote* [Analysis of lateral soil reactions on tractor wheels during turning]. *Resources and Technology*. 2022. Vol. 19, № 3. pp. 44-56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6363>.
9. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernandez-Hernandez J. L., Penna A. F., Herrera-Miranda I. *Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators*. *Agriculture* 2020, 10, 145. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>.
10. Zhou M., Xia J., Zhang S., Hu M., Liu Z., Liu G. *Development of a Depth Control System Based on Variable-*

- Gain Single-Neuron PID for Rotary Burying of Stubbles.* Agriculture 2022, 12, 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>.
11. Luo C., Chen J., Guo S., An X., Xin Y., Wen C., Liu H., Meng Z., Zhao C. *Development and Application of a Remote Monitoring System for Agricultural Machinery Operation in Conservation Tillage.* Agriculture 2022, 12, 1460. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091460>.
12. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. *Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System.* Agriculture 2022, 12, 1547. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>.
13. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Mao E. *A Vibration Reduction control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback.* Agriculture 2023, 13, 1546. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>.
14. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. *Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydraulic Hitch System of Electric Tractors.* Agriculture 2023, 13, 1555. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>.
15. Sun X., Song Y., Wang Y., Qian J., Lu Z., Wang T. *Design and Test of a Tractor Electro-Hydraulic-Suspension Tillage-Depth and Loading-Control System Test Bench.* Agriculture 2023, 13, 1884. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101884>.
16. Gao Y., Yang Y., Fu S., Feng K., Han X., Hu Y., Zhu Q., Wei X. *Analysis of Vibration Characteristics of Tractor-Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain.* Agriculture 2024, 14, 1139. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071139>.
17. Chukewad Y. M., Chadha S., Jagdale K. S., Elkunchwar N., Rosa U. A. *Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System.* AgriEngineering 2024, 6, 1725-1746. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>.
18. Khaehanchanpong Y., Ahamed T., Takigawa T. *Design, Fabrication and Performance Evaluation of an Inter-Row Cultivator for Sugarcane Fields.* Inventions 2017, 2, 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions2030025>.
19. Xu J., Li R., Li Y., Zhang Y., Sun H., Ding X., Ma Y. *Research on Variable-Universe Fuzzy Control Technology of an Electro-Hydraulic Hitch System.* Processes 2021, 9, 1920. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9111920>.
20. Kim Y-S, Kim W-S., Baek S-Y., Baek S-M., Kim Y-J., Lee S-D., Kim Y-J. *Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System.* Sensors 2020, 20, 2450. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092450>.
21. Md-Tahir H., Zhang J., Xia J., Zhou Y., Zhou H., Du J., Sultan M., Mamona H. *Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations.* Agronomy 2021, 11, 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>.
22. Shrivastava P., Tewari V. K., Gupta C., Chouriya A. *HMI-assisted visual interface-cum-embedded system for measurement of tractor-implement performance parameters.* J Field Robotics. 2024 ; 41 : 2147-2168. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22221>.
23. Koo Y. M., Kang Y. *Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation.* Journal of Biosystems Engineering (2021) 46 : 496-507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00122-w>.

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Савинков Максим Александрович – аспирант кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6331-8136>, e-mail: savinkov99max03@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Поздняков Евгений Владиславович – кандидат технических наук, научный сотрудник патентного сектора научно-исследовательского отдела, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: pozd.ev@yandex.ru.

Information about the authors

Valerii I. Posmetev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Maksim A. Savinkov – The Post-Graduate Student of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6331-8136>, e-mail: savinkov99max03@mail.ru.

Viktor V. Posmetev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

✉ *Vadim O. Nikonov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Vladimir A. Zelikov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Evgeny V. Pozdnyakov – Candidate of Technical Sciences, Research Fellow of the Patent Sector of the Research Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: pozd.ev@yandex.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author