



Научная статья

УДК 629.11.02/.098

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-85-99

Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском

В.И. Посметьев, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [Q-1411-2015](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

В.О. Никонов[✉], *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-3510-2019](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

А.Ю. Мануковский, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAR-1976-2020](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.В. Посметьев, *канд. физ.-мат. наук, доц.*; *ResearcherID: [Z-3736-2019](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉], mayu1964@mail.ru, victorvp@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.21 / Одобрена после рецензирования 03.02.22 / Принята к печати 06.02.22

Аннотация. Обоснована необходимость повышения эффективности вывозки длинномерных лесоматериалов лесовозными тягачами с прицепами-ропусками при их эксплуатации в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог, характеризующихся наличием неровностей, дефектов, препятствий, а также частых поворотов, подъемов и спусков. В результате ранее выполненных исследований по разработке и оценке различных рекуперативных сцепных устройств для лесовозных автопоездов, функционирующих в сложных дорожных условиях, предложена оригинальная схема рекуперативного поворотного коникового устройства для лесовозного тягача с прицепом-ропуском. В целях выявления зависимостей изменения во времени таких показателей эффективности работы коникового устройства, как рекуперированная мощность и горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов, а также установления закономерностей влияния на эти показатели исследуемых высот неровностей опорной поверхности лесовозной дороги, скорости движения лесовозного автопоезда и внутреннего диаметра продольных и поперечных гидроцилиндров рекуперативного устройства разработана компьютерная программа. Выявлено, что оснащение лесовозного автопоезда предлагаемым рекуперативным поворотным кониковым устройством имеет обоснованную целесообразность при вывозке длинномерных лесоматериалов, особенно в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. С увеличением скорости лесовозного автопоезда при его движении в сложных дорожных условиях с 10 до 60 км/ч существенно растет рекуперированная мощность – с 3 до 24 кВт, а также изменяется с 0,4 до 2,3 м/с² горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов относительно лесовозного тягача. Установлено, оптимальные

© Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

диаметры поперечных и продольных гидроцилиндров рекуперативного поворотного коникового устройства, обеспечивающие максимальную рекуперлируемую мощность 6,7 кВт и среднее горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов 1 м/с², составляют 50 мм. Полученные результаты могут быть полезны научно-исследовательским и проектно-конструкторским организациям, занимающимся дальнейшим усовершенствованием рекуперативных устройств аналогичного типа, применяемых для лесовозного автомобильного транспорта.

Ключевые слова: лесовозный тягач, лесовозный автопоезд, расход топлива лесовозным тягачем, поворотное кониковое устройство, лесовозная дорога, горизонтальное ускорение лесовозного автопоезда, компьютерная программа, компьютерное моделирование, прицеп-ропуск, рекуперация энергии

Для цитирования: Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 85–99. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

Original article

Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug

Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Vadim O. Nikonov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉], mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru

Received on October 29, 2021 / Approved after reviewing on February 3, 2022 / Accepted on February 6, 2022

Abstract. The article validates the necessity of increasing the transportation efficiency of long-cut timber (LCT) by hauling tractors with timber drugs during their operation in conditions of poorly equipped logging roads with the presence of irregularities, defects, barriers, as well as frequent turns, ascents and descents. An original scheme of a recuperative swivel bunk device (RSBD) for a hauling tractor (HT) with a timber drug (TD) is designed as a result of earlier research on development and evaluation of various recuperative coupling devices for logging trucks operating in difficult road conditions. A computer program has been developed in order to identify the dependences of change in time of such parameters of the bunk device efficiency as recoverable power and horizontal acceleration of an LCT bundle, as well as to determine the regularities of influence of the studied heights of the logging road bearing area, the driving speed of a logging truck and the inner diameter of longitudinal and transverse hydraulic cylinders of the recuperative device on these parameters. It has been found out that equipping a logging truck with the proposed RSBD is reasonable when LCT transporting,



especially in conditions of poorly equipped logging roads. With an increase in speed of the logging truck when it moves in difficult road conditions from 10 to 60 km/h recoverable power increases significantly from 3 to 24 kW, as well as the horizontal acceleration of the LCT bundle relative to HT changes from 0.4 to 2.3 m/s². It is found that the optimum diameters of transverse and longitudinal hydraulic cylinders of RSBD, providing the maximum recoverable power of 6.7 kW and the average horizontal acceleration of the LCT bundle of 1 m/s², is 50 mm. The results obtained can be useful to research and design organizations engaged in further improvement of recuperative devices of similar type used for timber road transport.

Keywords: hauling tractor, logging truck, fuel consumption of a logging truck, swivel bunk device, logging road, horizontal acceleration of a logging truck, computer program, computer simulation, timber drug, energy recovery

For citation: Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 85–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

Введение

Лесной комплекс РФ, в состав которого входят лесное хозяйство и лесная промышленность, вносит значительный вклад в развитие экономики страны. Объем заготовленных в России лесоматериалов в 2019 г. составил 219 млн м³, а в 2020 г. – 217 млн м³. Наибольший процент затрат в технологическом процессе заготовки лесоматериалов приходится на их вывозку с лесосеки на нижние лесные склады лесозаготовительных предприятий. Доля лесоматериалов, вывозимых лесовозными автомобилями, составляет порядка 80 % от суммарного ежегодного объема лесоматериалов, вывозимых всеми видами лесовозного транспорта. В этой связи поиск путей, направленных на сокращение расходов при вывозке лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, является актуальной задачей, решение которой позволит улучшить эффективность работы лесозаготовительных предприятий [4].

В качестве основного вида лесовозного автомобильного транспорта для вывозки длинномерных лесоматериалов (ДЛ) в виде хлыстов на крупных промышленных лесозаготовительных предприятиях используются лесовозные автопоезда (ЛА), состоящие из лесовозных тягачей (ЛТ) с прицепами-ропусками (ПР). Несмотря на преимущества ЛТ с ПР перед другими ЛА, основной их серьезный недостаток – несовершенство конструкции коникового устройства, устанавливаемого на раме ЛТ. Частые и резкие торможения ЛТ с ПР на прямых участках недостаточно обустроенных лесовозных дорог (ЛД), а также преодоление поворотов ЛА в сложных дорожных условиях сопровождаются возникновением значительных по величине и направлению сил инерции массы ПР с ДЛ. Воздействие этих сил на конструкцию поворотного коникового устройства в виде изгибающих и скручивающих моментов приводит к ухудшению плавности хода ЛТ с ПР, росту расхода топлива, снижению надежности ЛА за счет повышенного износа и деформации основных деталей коникового устройства [5].

Одним из перспективных научных направлений, позволяющих повысить эффективность ЛТ с ПР за счет сокращения расхода топлива, увеличения надежности и улучшения плавности хода ЛТ с ПР, является разработка и использование в конструкции поворотного коникового устройства рекуператив-

ных механизмов. Обзор научных работ зарубежных исследователей в области повышения эффективности работы автотранспортных средств за счет оснащения их рекуперативными механизмами, преобразующими, накапливающими и полезно использующими различные виды энергии, подтверждает актуальность данного научного направления [7–20].

Анализ недостатков и преимуществ существующих конструкций поворотных кониковых устройств ЛА, а также ранее выполненные авторами исследования по предварительной оценке различных рекуперативных сцепных устройств ЛА позволили разработать для ЛТ с ПР перспективную конструкцию рекуперативного поворотного коникового устройства (РПКУ) (рис. 1) [5, 6].

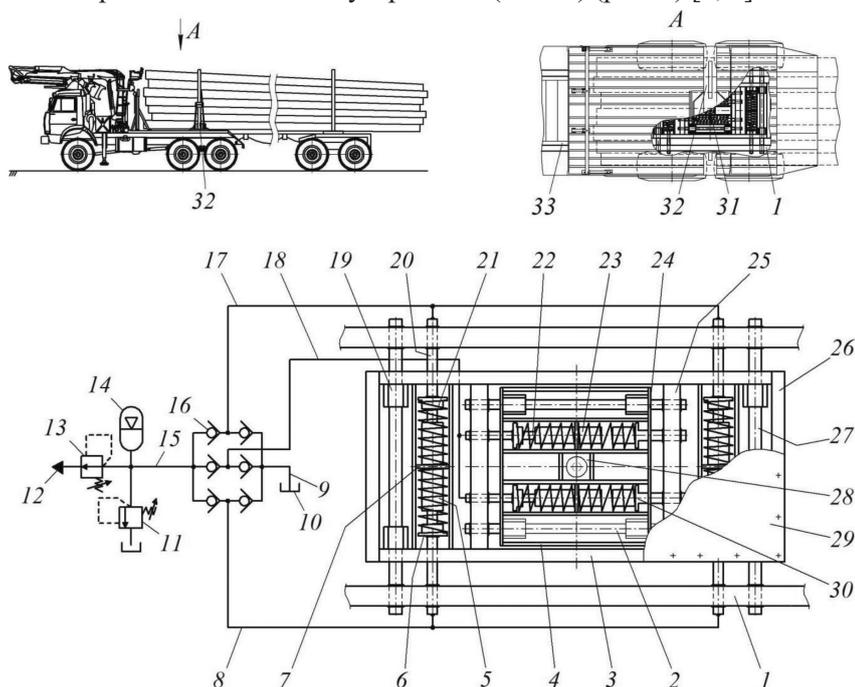


Рис. 1. Перспективная конструкция РПКУ ЛТ с ПР: 1, 33 – продольные лонжероны рамы лесовозной площадки и рамы ЛТ; 2, 3, 4, 22 – продольные швеллеры, стенки, направляющие оси и штоки; 5, 23 – гидроцилиндры двухстороннего и одностороннего действия; 6 – фланцы; 7 – распорки; 8, 17, 18 – гибкие трубопроводы; 9, 15 – всасывающий и напорный трубопроводы; 10 – гидробак; 11, 13 – регулируемые предохранительный и редуцирующий клапаны; 12 – порт подачи рабочей жидкости потребителю; 14 – пневмогидравлический аккумулятор; 16 – обратные клапаны; 19 – опоры; 20, 24–26, 27 – поперечные швеллеры, брусья, стенки, направляющие оси и штоки; 21 – пружины; 28 – траверса; 29 – крышка; 30 – задние фланцы; 31 – шкворень; 32 – поворотный коник

Fig. 1. Advanced design of RSBSD of HT with TD: 1, 33 – longitudinal longerons of the timber flatbed frame and the HT frame; 2, 3, 4, 22 – longitudinal channels, walls, axle guides and rods; 5, 23 – double-acting and single-acting hydraulic cylinders; 6 – flanges; 7 – spacers; 8, 17, 18 – flexible pipelines; 9, 15 – suction and pressure pipelines; 10 – hydraulic tank; 11, 13 – adjustable safety and pressure reducing valves; 12 – port for fluid supply to the consumer; 14 – pneumohydraulic accumulator; 16 – check valves; 19 – supports; 20, 24–26, 27 – transverse channels, walls, axle guides and rods; 21 – springs; 28 – traverse; 29 – cover; 30 – rear flanges; 31 – kingpin; 32 – swivel bunk

Функционирование разработанного РПКУ осуществляется при движении ЛТ с ПР и основывается на использовании кинетической энергии, образующейся при торможении ЛА от силы инерции массы ПР с ДЛ, как на прямом участке недостаточно обустроенной ЛД, так и при поворотах в сложных дорожных условиях. РПКУ может перемещаться в продольном и поперечном направлениях относительно оси ЛТ за счет имеющихся в конструкции направляющих и гидроцилиндров. Двигаясь в этих направлениях, РПКУ одновременно сглаживает нагрузки, передающиеся от сил инерции ПР с ДЛ, и преобразует кинетическую энергию в потенциальную энергию рабочей жидкости, которая благодаря наличию в рекуперативном гидроприводе пневмогидравлического аккумулятора накапливается и полезно используется при дальнейшей работе гидравлического манипулятора в процессе выполнения погрузочных и разгрузочных операций.

С целью предварительной оценки предлагаемого РПКУ ЛТ с ПР, а также ускорения работ по проектированию и изготовлению опытного образца РПКУ, который будет использован в дальнейших исследованиях, требуется на основе ранее разработанных авторами математических моделей движения ЛА по недостаточно обустроенным ЛД создать компьютерную программу для моделирования РПКУ ЛТ с ПР, позволяющую выявить зависимости влияния условий движения ЛА, параметров ЛД, основных конструктивных параметров РПКУ на рекуперированную мощность и горизонтальное ускорение пачки ДЛ относительно ЛТ. Кроме того, необходимо определить оптимальные диаметры продольных и поперечных гидроцилиндров разработанного РПКУ [4–6].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ЛТ с ПР, предметом – РПКУ. Для оценки потенциальной эффективности РПКУ ЛТ с ПР, определения оптимальных конструктивных параметров РПКУ, обеспечивающих наибольшую рекуперированную мощность, создана компьютерная программа на основе ранее разработанных авторами математических моделей движения ЛА по недостаточно обустроенным ЛД [1–3].

Перед созданием компьютерной программы была составлена математическая модель, описывающая движения в процессе вывозки лесоматериалов загруженного ДЛ ЛА, оснащенного РПКУ. При ее разработке применялись методы классической механики, а также выполнялось требование корректности представления движущихся в пространстве исследуемых тел. К ним относятся ЛТ, ПР, пакет ДЛ, подвеска, колеса, ЛД с заданными параметрами рельефа. ЛТ, ПР и пакет лесоматериалов в разработанной математической модели описаны как отдельные абсолютно твердые тела, контактирующие друг с другом при движении по ЛД. На рис. 2 приведена новая расчетная схема, которая использовалась для создания динамической модели ЛТ с ПР, отличающаяся от предыдущих оснащением ЛТ РПКУ. P – это точки, обозначающие пакет бревен Б1–Б6, роспуск Р1–Р3, кониковое устройство Т1–Т3, $c_{ли}$ и $d_{ли}$ – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия колеса с опорной поверхностью; z – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу. ЛТ, ПР и пакет ДЛ обладают соответствующими массами и моментами инерции m_T , m_P , m_B , J_T , J_P , J_B . Положение в пространстве этих объектов в разрабатываемой математической модели описывается декартовыми координатами их центров тяжести (x_T, y_T, z_T) , (x_P, y_P, z_P) и (x_B, y_B, z_B) и углами отклонения локальной системы координат от общей базовой $(\varphi_{xT}, \varphi_{yT}, \varphi_{zT})$, $(\varphi_{xP}, \varphi_{yP}, \varphi_{zP})$ и $(\varphi_{xB}, \varphi_{yB}, \varphi_{zB})$ [4–6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_k \frac{\partial^2 x_k}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{\text{Л}i}^x + \sum_{i=1}^3 F_{\text{П}i}^x + \sum_j F_{kj}^x; \\ m_k \frac{\partial^2 y_k}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{\text{Л}i}^y + \sum_{i=1}^3 F_{\text{П}i}^y + \sum_j F_{kj}^y; \\ m_k \frac{\partial^2 z_k}{\partial t^2} = -m_k g + \sum_{i=1}^3 F_{\text{Л}i}^z + \sum_{i=1}^3 F_{\text{П}i}^z + \sum_j F_{kj}^z; \\ J_{xk} \frac{\partial^2 \phi_{xk}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^x(F_{\text{Л}i}) + \sum_{i=1}^3 M^x(F_{\text{П}i}) + \sum_j M^x(F_{kj}); \\ J_{yk} \frac{\partial^2 \phi_{yk}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^y(F_{\text{Л}i}) + \sum_{i=1}^3 M^y(F_{\text{П}i}) + \sum_j M^y(F_{kj}); \\ J_{zk} \frac{\partial^2 \phi_{zk}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^z(F_{\text{Л}i}) + \sum_{i=1}^3 M^z(F_{\text{П}i}) + \sum_j M^z(F_{kj}), \end{array} \right.$$

где k – индекс тела (может принимать значения «Т», «Р», «Б»); t – время; $F_{\text{Л}i}$ и $F_{\text{П}i}$ – силы, передаваемые от колес через подвеску по левому (индекс «Л») и правому (индекс «П») бортам; F_{kj} – силы взаимодействия тела k с соседними телами j ; M^x, M^y, M^z – моменты перечисленных выше сил относительно оси i .

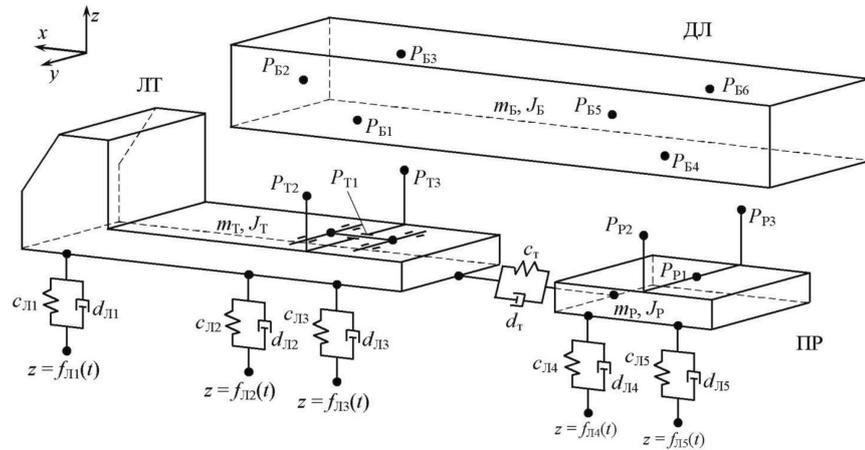


Рис. 2. Расчетная схема ЛТ с ПР, оснащенного РПКУ

Fig. 2. Design scheme of HT with TD equipped with RSBD

Для решения системы дифференциальных уравнений использовали следующие начальные условия: $x_k(t=0) = x_{k0}$; $y_k(t=0) = 0$; $z_k(t=0) = z_{k0}$; $v_{xk}(t=0) = v$; $v_{yk}(t=0) = 0$; $v_{zk}(t=0) = 0$, где x_{k0}, z_{k0} – координаты начального расположения тел ЛА, учитывающие его начальную геометрическую связность; индекс k принимает значения «Т», «Р», «Б»; координаты y_k равны нулю, так как в начальный момент времени все тела ЛА размещены строго над осью OX ; v_{xk}, v_{yk}, v_{zk} – начальные скорости тел; v – заданная скорость движения ЛА, поддерживаемая в дальнейшем постоянной для тягача $v_{xT}(t) = v$, но не фиксируемая для других тел.

Взаимодействие тел в математической модели осуществлялось шарнирно и контактом точки с опорной поверхностью ЛД. В первом случае это взаимодействие ЛТ с ПР. Во втором случае это ЛТ, РПКУ и пакет ДЛ, а также ПР, РПКУ и пакет ДЛ. На начальном этапе исследования была применена упрощенная математическая модель колеса. Ее отличительными особенностями являются отсутствие деформации колеса, а также работа подвески за счет изменения расстояния от корпуса ЛТ с ПР до опорной поверхности ЛД:

$$F_i^z = c_i (z_{\text{П}i}(x_i, y_i) + R_{\text{к}} - z_{\text{К}i}) - d_i \left(\frac{\partial z_{\text{П}i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{\text{К}i}}{\partial t} \right),$$

где i – индекс колеса; c_i , d_i – коэффициенты жесткости и демпфирования вязкоупругого взаимодействия; $z_{\text{П}i}(x, y)$ – вертикальная координата поверхности под колесом, равная координате нижней точки колеса; $R_{\text{к}}$ – радиус колеса; $z_{\text{К}i}$ – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу.

В основе принципа работы РПКУ (точка $P_{\text{T}1}$ на рис. 2) лежит его смещение в продольном и поперечном направлениях относительно оси ЛТ (рис. 3).

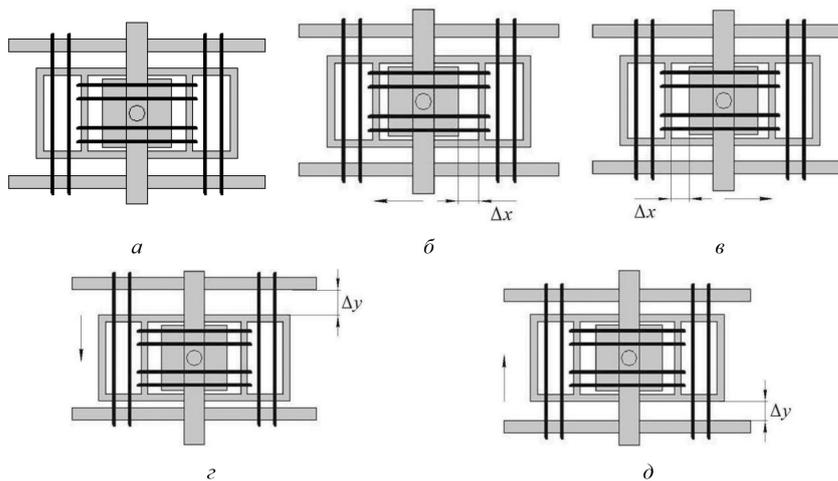


Рис. 3. Варианты размещения РПКУ относительно рамы ЛТ в различных режимах движения ЛА: a – расположение РПКУ в центре при неподвижном состоянии ЛА; $б, в$ – смещение РПКУ вперед и назад относительно продольной оси ЛТ соответственно при торможении и трогании; $г, д$ – смещение РПКУ вперед и назад относительно поперечной оси ЛТ соответственно при поворотах налево и направо

Fig. 3. Layout options of RSBD relative to the HT frame in different modes of the logging truck (LT): a – location of RSBD in the center when LT is stationary; $б, в$ – forward and backward displacement of RSBD relative to the HT longitudinal axis when slowing down and moving off, respectively; $г, д$ – forward and backward displacement of RSBD relative to the HT transverse axis when turning left and right, respectively

При движении ЛТ с ПР в процессе вывозки ДЛ по ровной поверхности ЛД с постоянной скоростью РПКУ располагается в центре относительно продольной и поперечной осей ЛТ (рис. 3, a). В случае торможения ЛТ с ПР или при преодолении вогнутого участка поверхности ЛД пакет ДЛ смещается в направлении

ЛТ, а РПКУ сдвигается вперед относительно продольной оси ЛТ (рис. 3, б). При движении ЛТ с ПР с положительным продольным ускорением или при преодолении выпуклого участка поверхности ЛД пакет ДЛ смещается назад относительно ЛТ, РПКУ сдвигается назад относительно продольной оси ЛТ (рис. 3, в). В процессе поворота ЛТ с ПР направо или при крене ЛА налево из-за разности высот опорной поверхности ЛД под колесами левого и правого бортов пакет ДЛ смещается влево, и вместе с ним сдвигается влево РПКУ (рис. 3, з). При повороте ЛТ с ПР налево или крене ЛА направо пакет ДЛ и РПКУ смещаются вправо (рис. 3, д).

Гидравлическая подсистема РПКУ состоит из совокупности поперечных и продольных гидроцилиндров, которые при перемещении РПКУ перекачивают рабочую жидкость из гидравлической магистрали низкого давления в гидравлическую магистраль высокого давления, соединенную с пневмогидравлическим аккумулятором. С одной стороны, продольные и поперечные гидроцилиндры при работе оказывают сопротивление движению РПКУ. С другой стороны, механические движения поршней поперечных и продольных гидроцилиндров, жестко связанных с РПКУ, приводят к вытеснению рабочей жидкости в напорную гидравлическую магистраль и накоплению энергии этой жидкости в пневмогидравлических аккумуляторах. Упрощенная модель позволяет оценить характерное значение текущей мощности N_{PT} , которую выделяет система рекуперации РПКУ:

$$N_{PT} = \left| \frac{x_{П}^{\tau} - x_{П}^{\tau-1}}{\Delta t} \right| P_p \frac{\pi D_{ГЦ}^2}{4},$$

где $x_{П}^{\tau}$ и $x_{П}^{\tau-1}$ – положения РПКУ в системе координат, связанной с ЛТ, в текущий τ и предыдущий $\tau - 1$ моменты времени; Δt – шаг интегрирования по времени уравнений механического движения тел; P_p – характерное давление в рекуперативной системе (в частности предельное давление пневмогидравлического аккумулятора).

Эта формула применяется для расчета как продольного, так и поперечного движения РПКУ, соответственно получаются продольная N_{PTX} и поперечная N_{PTY} рекуперлируемые мощности. Общая рекуперлируемая мощность находится суммированием:

$$N_{PT} = N_{PTX} + N_{PTY}.$$

Из-за силы сопротивления движению РПКУ, оказываемой со стороны поперечных и продольных гидроцилиндров, ПР и пакет ДЛ могут испытывать дополнительные неблагоприятные ускорения. Для контроля плавности движения ПР и перевозимого пакета ДЛ далее используется такая характеристика, как среднее продольное ускорение $a_{Бс}$ пакета ДЛ:

$$a_{Бс} = \frac{\Delta t}{t_2 - t_1} \sum_{\tau=\left[\frac{t_1}{\Delta t}\right]}^{\left[\frac{t_2}{\Delta t}\right]} \left| \frac{x_p^{\tau} + x_p^{\tau} - 2x_p^{\tau-2}}{(\Delta t)^2} \right|,$$

где x_p – координата ПР в глобальной системе координат.

Аналогичным образом определяется поперечное ускорение ПР $a_{Бсy}$. После чего на основе $a_{Бсx}$ и $a_{Бсy}$ рассчитывается суммарное ускорение $a_{Бс}$ по теореме Пифагора. Необходимо отметить, что в проводимых далее компьютерных экспериментах рассматривается движение ЛТ с ПР с постоянной продольной скоростью v_T .

Чем сложнее рельеф поверхности ЛД, тем больший ход обеспечивается в РПКУ. Это позволяет с помощью ранее разработанной математической модели выполнить проверку работы РПКУ при движении ЛТ с ПР по недостаточно обустроенной ЛД. В данной модели принимался рельеф опорной поверхности ЛД, который включал в себя такие дефекты ЛД, как холмы и препятствия. Протяженность первых составляла 2–5 м, а вторых – 0,2–0,5 м. В разрабатываемой математической модели задавалась функция высоты опорной поверхности ЛД от координат точки контакта колеса $z(x, y)$.

Распределение гауссовых пиков и их параметров ($H_i = 0–0,1$ м и $\sigma_i = 0,05–0,15$ м) на контрольном участке ЛД (500×5 м²) выполнялось по равномерному закону случайным образом. Вследствие того, что функция $z(x, y)$ является функцией двух переменных, преобразуя эту функцию, получали две функции одной переменной: первую – для колес левого борта ЛТ с ПР $z(x, -B/2)$, вторую – для колес правого борта $z(x, B/2)$. Две функции одной переменной зависят от колеи B ЛТ с ПР. Решение дифференциальных уравнений осуществлялось при помощи численного метода Рунге–Кутты.

Для последующего исследования РПКУ ЛТ с ПР авторами была разработана компьютерная программа (рис. 4). Она позволяет имитировать работу РПКУ при движении ЛТ с ПР загруженного ДЛ по недостаточно обустроенной ЛД.

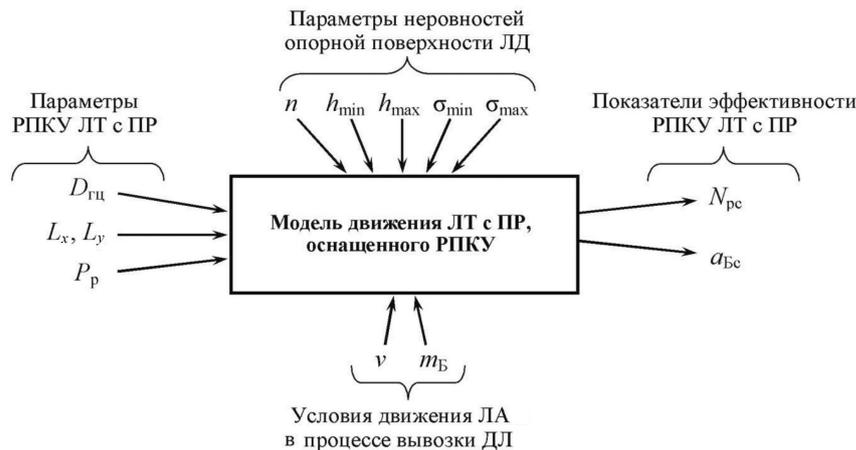


Рис. 4. Входные параметры (факторы) и показатели эффективности (критерии) разработанной компьютерной программы: n – количество неровностей на 1 км пути ЛД; h_{\min} , h_{\max} , σ_{\min} , σ_{\max} – высоты и длины неровностей ЛД; v – скорость движения ЛТ с ПР; $m_{\text{Б}}$ – масса вывозимых ДЛ; $D_{\text{ГЦ}}$ – диаметр поперечных и продольных гидроцилиндров; $L_x = L_y$ – максимальные перемещения РПКУ относительно продольной и поперечной осей ЛТ; P_p – рабочее давление в гидроприводе РПКУ; $N_{\text{рс}}$ – рекуперлируемая мощность при продольных и поперечных перемещениях; $a_{\text{Бс}}$ – ускорение пакета ДЛ в горизонтальном направлении

Fig. 4. Input parameters (factors) and performance indicators (criteria) of the developed computer program: n – number of irregularities per 1 km of the logging road (LR); h_{\min} , h_{\max} , σ_{\min} , σ_{\max} – heights and lengths of LR irregularities; v – driving speed of HT with TD; $m_{\text{Б}}$ – mass of the exported LCT; $D_{\text{ГЦ}}$ – diameter of transverse and longitudinal hydraulic cylinders; $L_x = L_y$ – peak displacement of RSB relative to the HT longitudinal and transverse axes; P_p – working pressure in the RSB hydraulic drive; $N_{\text{рс}}$ – recoverable power at longitudinal and transverse displacements; $a_{\text{Бс}}$ – acceleration of an LCT bundle horizontally

Основной целью такого исследования является оценка эффективности предлагаемого РПКУ, а также определение его оптимальных конструктивных параметров. Разработанная компьютерная программа учитывает большое количество геометрических, механических и гидравлических параметров как ЛТ с ПР, так и РПКУ. Кроме того, она предоставляет широкие возможности для исследования процесса движения ЛТ с ПР по недостаточно обустроенной ЛД. Для выполняемого исследования выбраны три наиболее важных параметра: первый – диаметр рекуперативных продольных и поперечных гидроцилиндров $D_{гц}$ РПКУ, второй – скорость движения ЛТ с ПР v , третий – среднее значение высоты неровностей опорной поверхности ЛД $h_{ср}$. В дальнейшем теоретическом исследовании необходимо установить влияние перечисленных конструктивных и технологических параметров на показатели эффективности РПКУ $N_{рс}$ и $a_{Бс}$.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе теоретического исследования движения ЛТ с ПР, оснащенного РПКУ, по недостаточно обустроенной ЛД проведено более 50 компьютерных экспериментов. В рамках каждого из них модель ЛТ с ПР преодолевала расстояние 500 м по случайному неровному рельефу ЛД. Длительность одного эксперимента составляла около 1 мин машинного времени на типичном персональном компьютере.

В начальный момент времени три основных тела модели (корпус ЛТ, корпус ПР, пакет ДЛ) располагались на определенном удалении друг от друга и заведомо выше опорной поверхности ЛД. В первые 5 с модельного времени отдельные тела соединялись в ЛА, он опускался на опорную поверхность ЛД и приходил в состояние устойчивого равновесия. После этого начинался компьютерный эксперимент (время t_1). При преодолении ЛТ с ПР дистанции 500 м эксперимент прекращался (время t_2). В процессе движения ЛТ с ПР по неровной опорной поверхности ЛД РПКУ совершало колебательные движения в продольном направлении по отношению к корпусу ЛТ с амплитудой около 0,1 м (рис. 5, а) и в поперечном направлении с амплитудой около 0,2 м (рис. 5, б). Выделение мощности системой рекуперации наиболее выражено в моменты существенных перемещений РПКУ из-за насосного эффекта, что приводит к появлению пиков на графике зависимости мгновенной мощности от времени (рис. 5, в). Пиковые значения рекуперированной мощности составляют более 20 кВт. Горизонтальное ускорение пакета ДЛ, обеспечиваемое системой рекуперации, невелико и лежит в пределах 0,3...0,6 м/с² (рис. 5, г).

В большинстве компьютерных экспериментов скорость движения ЛТ с ПР составляла 30 км/ч, средняя высота неровностей опорной поверхности ЛД – 0,5 м, внутренний диаметр поперечных и продольных гидроцилиндров – 60 мм. Теоретическое исследование проводили по «звездообразной» схеме. Основные параметры изменяли по одному, сохраняя остальные параметры на уровне базовых значений.

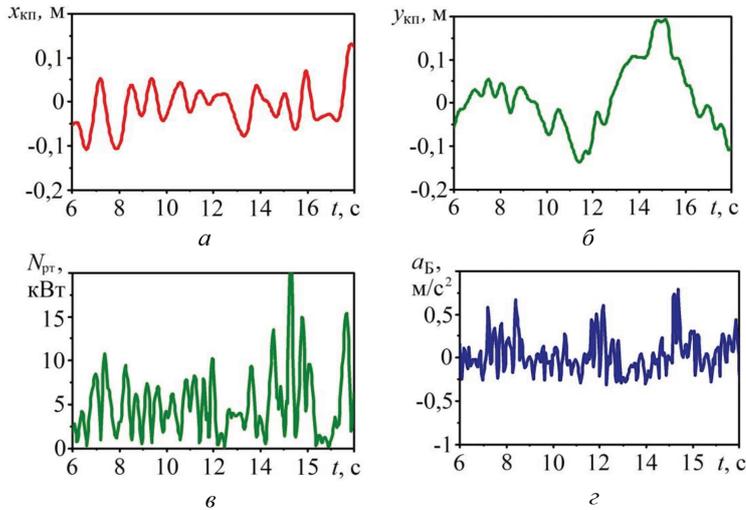


Рис. 5. Зависимости изменения продольного положения $x_{кн}$ (а) и поперечного положения $y_{кн}$ (б) РПКУ, текущего значения рекуперлируемой мощности $N_{рТ}$ (в) и текущего значения ускорения $a_{б}$ (з) пакета ДЛ от времени t

Fig. 5. Dependences of change in the longitudinal position $x_{кн}$ of RSBД (а), the transverse position $y_{кн}$ of RSBД (б), the current value of the recoverable power $N_{рТ}$ (в) and the current value of acceleration $a_{б}$ (з) of the LCT bundle on time t

Чем больше средняя высота неровностей опорной поверхности ЛД, тем больше интенсивность колебаний корпуса ЛТ, ПР и пакета ДЛ (рис. 6), следовательно, большего значения рекуперлируемой мощности, создаваемого РПКУ, можно ожидать. Однако с увеличением средней высоты неровностей опорной поверхности ЛД более выражено неблагоприятное воздействие ускорения пакета ДЛ на ЛТ.

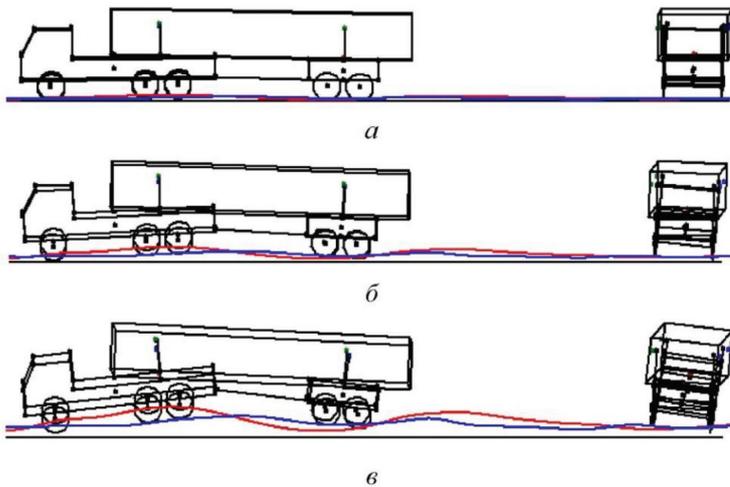


Рис. 6. Рельеф опорной поверхности ЛД при различных средних высотах неровностей: а – 0,2 м; б – 0,5 м; в – 1 м

Fig. 6. Relief of the LR bearing area at different average heights of irregularities: а – 0.2 m; б – 0.5 m; в – 1 m

С целью изучения влияния средней высоты неровностей ЛД на исследуемые показатели эффективности РПКУ выполнены компьютерные эксперименты. В ходе этих экспериментов среднюю высоту неровностей ЛД увеличивали с шагом 0,2 м в интервале 0–1 м. Выявлено, что такое увеличение способствует возрастанию рекуперированной мощности, создаваемой РПКУ (рис. 7, *a*), а также усугублению неблагоприятного воздействия горизонтального ускорения пакета ДЛ на ЛТ (рис. 7, *б*). В этой связи оснащение ЛА предлагаемым РПКУ имеет обоснованную целесообразность при вывозке им ДЛ, особенно в условиях недостаточно обустроенных ЛД. Если при средней высоте неровностей 0,2 м система рекуперации позволяет выделить около 2,5 кВт мощности, то при средней высоте неровностей около 0,6 м – уже примерно 9 кВт. При этом во всем исследованном диапазоне высот неровностей система рекуперации обеспечивает приемлемое горизонтальное ускорение пакета ДЛ (не более 3 м/с²).

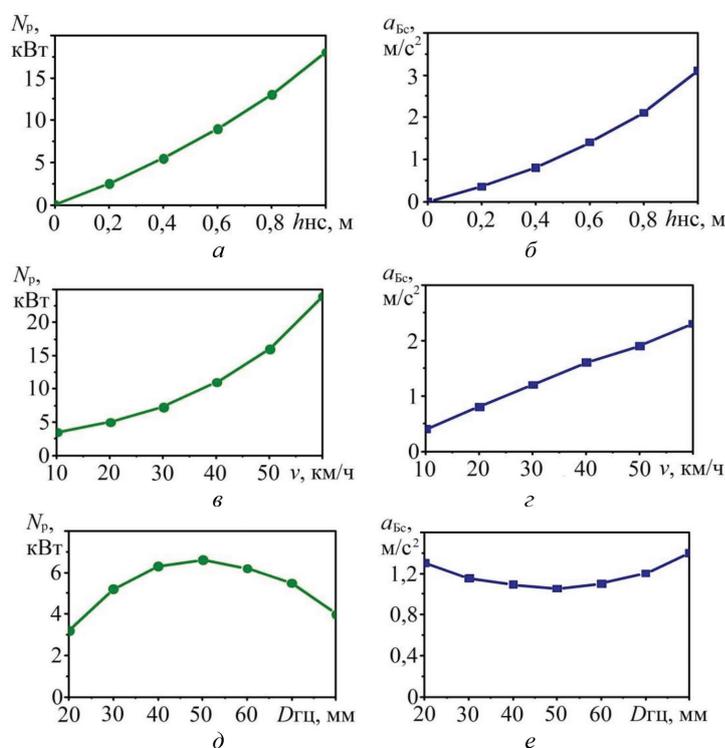


Рис. 7. Зависимости изменения средних значений рекуперированной мощности N_p и горизонтального ускорения пакета ДЛ от средней высоты $h_{НС}$ неровностей опорной поверхности ЛД (*a*, *б*), от скорости движения v ЛА (*в*, *г*) и от внутреннего диаметра $D_{ГЦ}$ продольных и поперечных гидроцилиндров РПКУ (*д*, *е*)

Fig. 7. Dependences of change in the average values of the recoverable power N_p and the horizontal acceleration of the LCT bundle on the average height $h_{НС}$ of the irregularities of the LR bearing area (*a*, *б*), on the driving speed v of LT (*в*, *г*) and on the inner diameter $D_{ГЦ}$ of longitudinal and transverse hydraulic cylinders of RSBD (*д*, *е*)

Скорость движения ЛТ с ПР по недостаточно обустроенной ЛД должна определять интенсивность колебательного движения пакета ДЛ относительно ЛТ. Поэтому скорость должна оказывать существенное влияние как на процесс рекуперирования мощности, так и на гашение взаимных колебаний тел системы в РПКУ. Для исследования влияния скорости на показатели эффективности системы рекуперации провели серию из 6 компьютерных экспериментов, в которых скорость движения ЛТ с ПР изменяли от 10 до 60 км/ч с шагом 10 км/ч. Установлено, что с увеличением скорости движения ЛТ с ПР средняя рекуперлируемая мощность растет в соответствии с квадратичным законом (рис. 7, в), а неблагоприятное горизонтальное ускорение пакета ДЛ – с линейным (рис. 7, в). Разработанное РПКУ может быть использовано в широком диапазоне скоростей движения ЛТ с ПР. Предлагаемая система рекуперации обеспечивает в широком диапазоне скоростей (от 10 до 60 км/ч) достаточно высокий рекуперативный эффект (от 3 до 24 кВт) и достаточно низкое горизонтальное ускорение пакета ДЛ (от 0,4 до 2,3 м/с²).

Параметры гидравлической подсистемы РПКУ должны определять рекуперлируемую мощность и плавность транспортирования ДЛ. Наиболее важным конструктивным параметром РПКУ является внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров. Для исследования влияния этого конструктивного параметра на показатели эффективности РПКУ выполнена серия компьютерных экспериментов, в ходе которых внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров увеличивали от 20 до 80 мм с шагом 10 мм.

Выявлено, что очень малый внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров (20...40 мм) препятствует созданию существенного насосного эффекта, так как мал объем полостей гидроцилиндров, поэтому рекуперлируемая мощность достаточно низкая и составляет 3–6 кВт (рис. 7, д). При таких значениях внутреннего диаметра продольных и поперечных гидроцилиндров наблюдается увеличенное горизонтальное ускорение пакета ДЛ, составляющее от 0,9 до 1,3 м/с². Это объясняется почти полным отсутствием в таких условиях сопротивления перемещению РПКУ (рис. 7, е). При очень большом диаметре продольных и поперечных гидроцилиндров (60...80 мм) для перемещения поршней необходимы высокие усилия, что снижает насосный эффект, поэтому рекуперлируемая мощность в данном диапазоне также мала (4,0...6,0 кВт). Из-за жесткой механической связи между ЛТ и пакетом ДЛ горизонтальное ускорение пакета ДЛ также велико (0,9...1,4 м/с²). Оптимальный внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров составляет 50 мм. При этом наиболее выражен насосный эффект системы рекуперации, обеспечивающий максимум рекуперлируемой мощности – 6,7 кВт, и достигается достаточно хорошая плавность движения пакета ДЛ – горизонтальное ускорение не превышает 1,04 м/с².

Заключение

Результаты теоретического исследования по предварительной оценке эффективности оснащения лесовозного тягача с прицепом-ропуском предлагаемой конструкцией рекуперативного поворотного коникового устройства позволяют сделать вывод, что применение такой конструкции имеет обосно-

ванную целесообразность при вывозке лесовозным автопоездом длинномерных лесоматериалов, особенно в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Установлено, что при движении лесовозного тягача с прицепом-ропуском в сложных дорожных условиях со скоростью в интервале от 10 до 60 км/ч рекуперлируемая мощность изменяется в диапазоне от 3 до 24 кВт, а среднее горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов увеличивается от 0,4 до 2,3 м/с². Выявлено, что оптимальные диаметры поперечных и продольных гидроцилиндров рекуперативного поворотного коникового устройства, обеспечивающие максимальную рекуперлируемую мощность 6,7 кВт и среднее горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов 1 м/с², составляют 50 мм.

Оснащение лесовозного тягача с прицепом-ропуском предлагаемой конструкцией коникового устройства повысит эффективность лесовозного тягача при его движении по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам не только за счет сокращения расхода топлива в процессе накопления и повторного использования энергии рабочей жидкости, но и за счет демпфирующих свойств, способствующих повышению надежности лесовозного тягача, плавности его хода, и, как следствие, создаст более благоприятные условия работы для водителей лесовозных автопоездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.
2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
Granovskiy V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data in Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p.
3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: МП «РАСКО», 1991. 272 с.
Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Basic, Fortran and Pascal*. Tomsk, MR "RASKO" Publ., 1991. 272 p.
4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛУ, 2021. 203 с.
Nikonov V. O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*: Monograph. Voronezh, VGLTU Publ., 2021. 203 p.
5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Матяшов А.Е. Совершенствование системы рекуперации энергии лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 2(42). С. 149–165.
Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Matyashov A.E. Improvement of the Energy Recovery System of a Timber Tractor with a Lumber Truck. *Forestry Engineering Journal*, 2021, vol. 11, no. 2(42), pp. 149–165. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/14>
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Имитационная модель оценки эффективности лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим тягово-сцепным устройством // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 181–196.
Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Sizmin I.V. Simulation Model for Estimation of Forest Truck Performance Equipped with Recuperative Spring-Hydraulic

Fifth-Wheel Coupling. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 181–196. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>

7. Abdelkareem M.A.A., Xu L., Ahmed Ali M.K., El-Daly A.-R.B.M., Hassan M.A., Elagouz A., Bo Y. Analysis of the Prospective Vibrational Energy Harvesting of Heavy-Duty Truck Suspension: A Simulation Approach. *Energy*, 2019, vol. 173, pp. 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.060>

8. Li J., Zhao J. Energy Recovery for Hybrid Hydraulic Excavators: Flywheel-Based Solutions. *Automation in Construction*, 2021, vol. 125, art. 103648. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103648>

9. Luo D., Wang R., Yu W., Sun Z., Meng X. Theoretical Analysis of Energy Recovery Potential for Different Types of Conventional Vehicles with a Thermoelectric Generator. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.061>

10. Morangueira Y.I.A., de C. Pereira J.C. Energy Harvesting Assessment with a Coupled Full Car and Piezoelectric Model. *Energy*, 2020, vol. 210, art. 118668. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118668>

11. Pipitone E., Vitale G. A Regenerative Braking System for Internal Combustion Engine Vehicles Using Supercapacitors as Energy Storage Elements – Part 1: System Analysis and Modelling. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 448, art. 227368. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227368>

12. Pugi L., Pagliali M., Nocentini A., Lutzemberger G., Pretto A. Design of a Hydraulic Servo-Actuation Fed by a Regenerative Braking System. *Applied Energy*, 2017, vol. 187, pp. 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.047>

13. Rakov V., Kapustin A., Danilov I. Study of Braking Energy Recovery Impact on Cost-Efficiency and Environment Safety of Vehicle. *Transportation Research Procedia*, 2020, vol. 50, pp. 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.067>

14. Ranjan P., Wrat G., Bholra M., Mishra S.Kr., Das J. A Novel Approach for the Energy Recovery and Position Control of a Hybrid Hydraulic Excavator. *ISA Transactions*, 2020, vol. 99, pp. 387–402. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.066>

15. Read M.G., Smith R.A., Pullen K.R. Optimization of Flywheel Energy Storage Systems with Geared Transmission for Hybrid Vehicles. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 87, pp. 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.001>

16. Silva Bravo R.R., De Negri V.J., Martins Oliveira A.A. Design and Analysis of a Parallel Hydraulic-Pneumatic Regenerative Braking System for Heavy-Duty Hybrid Vehicles. *Applied Energy*, 2017, vol. 225, pp. 60–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.102>

17. Yu W., Wang R. Development and Performance Evaluation of a Comprehensive Automotive Energy Recovery System with a Refined Energy Management Strategy. *Energy*, 2019, vol. 189, art. 116365. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116365>

18. Yu W., Wang R., Zhou R. A Comparative Research on the Energy Recovery Potential of Different Vehicle Energy Regeneration Technologies. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 2543–2548. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.001>

19. Zhang Y., Zhang X., Zhan M., Guo K., Zhao F., Liu Z. Study on a Novel Hydraulic Pumping Regenerative Suspension for Vehicles. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, vol. 352, iss. 2, pp. 485–499. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.06.005>

20. Zou J., Guo X., Abdelkareem M.A.A., Xu L., Zhang J. Modelling and Ride Analysis of a Hydraulic Interconnected Suspension Based on the Hydraulic Energy Regenerative Shock Absorbers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 127, pp. 345–369. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.047>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article