4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 631.372
DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_3_48 EDN: VKDOOM

Эффективность использования тракторов с упругодемпфирующими приводами ведущих колес

Олег Иванович Поливаев[1], Олег Сергеевич Ведринский[2], Андрей Викторович Ворохобин[3]✉, Светлана Зиновьевна Манойлина[4]

[1, 2, 3, 4] Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия
[3] dogruzka@rambler.ru✉

Аннотация. Применение энергонасыщенных машинно-тракторных агрегатов сопровождается повышенными динамическими нагрузками как на почву, так и на движители, трансмиссию и силовую установку, что, в свою очередь, приводит к снижению производительности, плавности хода и качества выполнения заданных технологических операций. Кроме того, колебания оказывают негативное влияние на оператора транспортного средства. Вот почему снижение динамических нагрузок на машинно-тракторный агрегат (МТА) и почву является важной задачей, непосредственно связанной с повышением производительности, надежности и стабильности выполнения технологических операций по обработке почвы. Ее решение возможно осуществить за счет совершенствования упругих приводов ведущих колес тракторов. С целью снижения динамических нагрузок на почву, трансмиссию и двигатель вместо жесткой полуоси трактора рассматривается вариант применения упругого привода, который состоит из наружного и внутреннего подвижных трубчатых элементов, имеющих диаметрально противоположные сквозные отверстия, в которых установлены скобообразные пружины. При повороте трубчатых элементов относительно друг друга упругие элементы сжимаются, что приводит к плавному троганию МТА с места, не вызывает значительных колебаний крутящих моментов в трансмиссии и способствует снижению буксования движителей и, как следствие, разрушения почвы. Результаты проведенных экспериментов показали, что за счет установки УДП ведущих колес трактора ЛТЗ-155 при его движении во время выполнения основных видов работ (транспорт, пахота, культивация и работа в составе комбинированного агрегата КРШ-8,1 + ЛТЗ-155 + ССТ-18) амплитуды колебаний крутящих моментов на валу сцепления двигателя смещаются в сторону низких частот и уменьшаются на 20–40%. За счет устранения буксования и перехода к более плавному взаимодействию движителей с почвой энергозатраты на основных видах работ снижаются на 6–12%.

***Ключевые слова*:** машинно-тракторный агрегат, упругодемпфирующий привод, сравнительные испытания, транспортные работы, пахота, культивация, комбинированные агрегаты

***Для цитирования*:** Поливаев О.И., Ведринский О.С., Ворохобин А.В., Манойлина С.З. Эффективность использования тракторов с упругодемпфирующими приводами ведущих колес // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 3(86). С. 48–54. https//:doi.org/10.53914/ issn2071-2243_2025_3_48–54.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR
AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Efficiency of using tractors with elastic damping drives of driving wheels

Oleg I. Polivaev[1], Oleg S. Vedrinsky[2], Andrey V. Vorokhobin[3]✉, Svetlana Z. Manoylina[4]

[1, 2, 3, 4] Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia
[3] dogruzka@rambler.ru✉

Abstract. The use of machine and tractor units with high power/weight ratio is accompanied by increased dynamic loads on both the soil and the propellers, transmission and power plant, which in turn leads to a decrease in productivity, running smoothness and the quality of the specified technological operations. In addition, fluctuations have an impact on the vehicle operators, which increases their fatigue and reduces labor efficiency. That is why reducing the dynamic loads on the machine and tractor unit (MTU) and the soil is an important problem directly related to improving productivity, reliability and stability of the technological parameters of tillage. The solution to this problem is possible by improving the elastic drives of the driving wheels of tractors. In order to reduce dynam-

ic loads on the soil, transmission and engine, instead of a rigid differential tractor axle, an elastic drive option is being considered, which consists of external and internal movable tubular elements having diametrically opposite through holes in which bracket-shaped springs are installed. When the tubular elements are rotated relative to each other, the elastic elements are compressed, which leads to a smooth starting of the vehicle, does not cause significant fluctuations in the transmission torques and makes it possible to reduce the slipping of the propellers and, as a result, the destruction of the soil. The results of the experiments showed that due to the installation of the elastic (non-rigid) damping drives on the LTZ-155 tractor, when it is moving during the main types of work (transport, plowing, cultivation and in a combined unit consisting of the Wide Working Cultivator-Fertilizer (KRSH-8.1) + LTZ-155 Tractor + Sugar-Beet Planter (SST-18), the amplitudes of torque fluctuations on the clutch shaft of the engine are shifted towards low frequencies and decrease by 20-40%. By eliminating wheel slipping and achieving smoother interaction of the propellers with the soil, energy consumption for the main types of work is reduced by 6-12%.

Keywords: machine and tractor unit (MTU), elastic (non-rigid) damping drive, comparative tests, transportation work, plowing, cultivation, combined units

For citation: Polivaev O.I., Vedrinsky O.S., Vorokhobin A.V., Manoylina S.Z. Efficiency of using tractors with elastic damping drives of driving wheels. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(3):48-54. (In Russ.). https//:doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_3_48-54.

Создание энергонасыщенных машинно-тракторных агрегатов сопровождается повышением динамических нагрузок и колебательных процессов в системе «почва – движитель – трансмиссия – двигатель», что, в свою очередь, приводит к снижению производительности, ухудшению управляемости, плавности хода и качества заданных технологических операций при выполнении различных сельскохозяйственных работ, а также приводит к разрушению структуры почвы и ее уплотнению. Динамические процессы возникают в результате неравномерного сопротивления почвы и неровностей поверхности, а также ее физико-механических свойств и других внешних воздействий. Кроме того, колебания оказывают определенное негативное влияние на оператора транспортного средства, что повышает его утомляемость и снижает производительность. Тенденция повышения транспортных скоростей (до 50–60 км/ч), наблюдаемая в последнее время, только усугубляет решение задачи улучшения условия труда работников отрасли сельского хозяйства [4]. Учитывая вышеизложенное, снижение динамических нагрузок на машинно-тракторный агрегат (МТА) и почву является важной задачей, непосредственно связанной с повышением производительности, надежности и стабильности выполнения технологических операций по обработке почвы [2, 5, 6].

Решение данной задачи можно осуществить за счет совершенствования упругих приводов ходовых систем мобильных энергетических средств [5, 11].

Наибольшее число исследований по данной проблеме посвящено анализу применения различных упругих устройств в трансмиссии, приводах ведущих колес, на валу отбора мощности (ВОМ), прицепном и навесном устройствах.

Одним из эффективных способов устранения динамической нагруженности, по мнению В.В. Шеховцова, М.В. Ляшенко, В.П. Шевчука и др., является установка различных упругодемпфирующих устройств в узлы системы, которые подвержены негативным воздействиям [10].

Д.Д. Нехорошев, П.В. Коновалов, А.Ю. Попов и Д.А. Нехорошев рассматривали применение упругого элемента в навеске машинно-тракторного агрегата, что, по их мнению, способствовало уменьшению амплитуды колебаний, коэффициента буксования, теоретической и действительной скоростей МТА и, как следствие, улучшало процесс взаимодействия рабочих органов сельхозмашин и ходовых систем тракторов с почвой [3].

Выявлено, что для снижения неравномерности тягового сопротивления агрегатируемых сельскохозяйственных машин и неровностей поверхности качения необходимо применять упругодемпфирующий привод (УДП), при этом рассчитано, что наиболее эффективным вариантом является установка УДП ближе к ведущим колесам [3, 7, 8, 9].

Упругодемпфирующий привод характеризуется:

- жесткостью при кручении, представляющей собой зависимость относительного угла поворота ведомого и ведущего валов от крутящего момента;

- демпфированием, то есть способностью рассеивать энергию при деформации упругих элементов;

- энергоемкостью, представляющей собой работу упругой деформации при действии крутящего момента.

Анализ опубликованных работ показал, что в настоящее время проблема внедрения упругих приводов в ведущие колеса тракторов не имеет комплексного решения. Это вызвано тем, что нет достаточно простых и надежных конструкций УДП, вписывающихся в существующие трансмиссии. Кроме того, недостаточно проработаны теоретические вопросы, касающиеся выбора характеристик УДП в связи с тем, что методика их выбора не учитывает внешних воздействий при различных видах работ МТА, состава агрегата и ряда других факторов.

Создание новых энергонасыщенных интегральных колесных тракторов вызвало необходимость проведения комплексных исследований по обозначенной проблеме. Особенность конструкции интегрального колесного трактора ЛТЗ состоит в том, что в его трансмиссии возникают повышенные динамические нагрузки, что приводит к ухудшению плавности его хода и, как следствие, эксплуатационных и технологических показателей МТА [1, 4, 6].

В качестве объекта исследований был выбран интегральный трактор ЛТЗ-155 с жесткими и упругодемпфирующими полуосями, оборудованными скобообразными пружинами [5].

Трактор ЛТЗ-155 также был оборудован следующими приборами:

- индукционным датчиком на ведущих колесах и путеизмерительном колесе;
- тензометрическими муфтами для замера крутящих моментов на полуосях;
- акселерометрами, установленными на ведущих мостах;
- расходомером для определения расхода топлива.

В процессе работы МТА регистрировали такие параметры, как:

- крутящие моменты на валу сцепления и полуосях трактора;
- частоту вращения вала двигателя, ведущих колес и путеизмерительного колеса трактора;
- вертикальные ускорения ведущих мостов трактора;
- тяговое усилие переднего и заднего навесного орудия.

При тензометрировании использовали осциллограф К-12-22 и усилитель ПИН-703.

Сравнительные экспериментальные исследования с жесткими и упругодемпфирующими приводами проводили при работе трактора ЛТЗ-155 на пахоте, культивации, транспорте, а также при работе в составе таких комбинированных агрегатов, как КРШ-8,1 + ЛТЗ-155 + ССТ-18 (рис. 1).

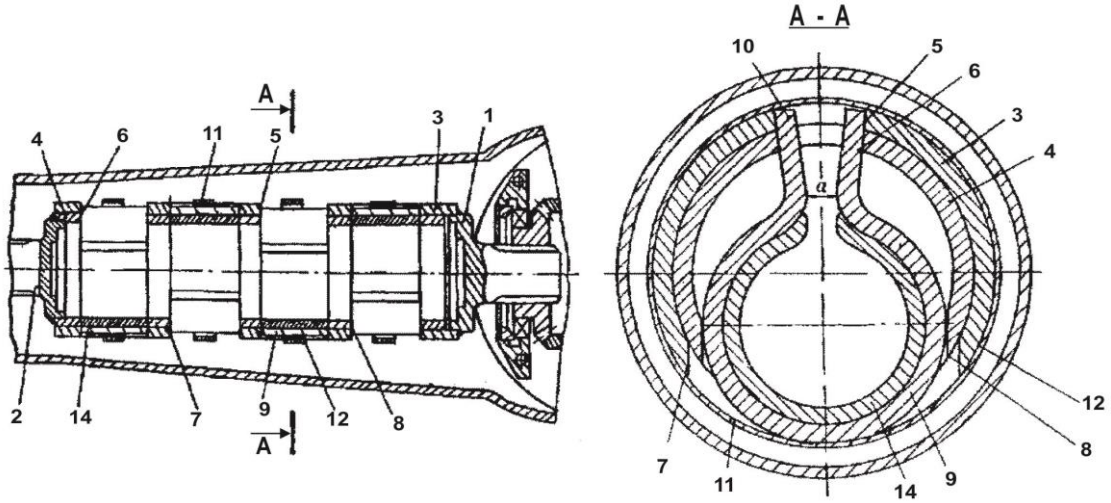

Рис. 1. Схема УДП со скобообразными пружинами на полуосях трактора ЛТЗ-155

На рисунке 1 представлен упругодемпфирующий привод, установленный вместо полуоси трактора ЛТЗ-155. Он состоит из наружного и внутреннего подвижных трубчатых элементов 4 и 3, имеющих диаметрально противоположные сквозные отверстия 5, 6, 7 и 8, в которых установлены скобообразные пружины 9, повернутые относительно друг друга и взаимодействующие опорными концами с сопрягаемыми отверстиями 8 трубчатого элемента 4 и удерживаемые от выпадения кольцами 11. При приложении крутящего момента в прямом и обратном направлениях трубчатый элемент 3 поворачивается на определенный угол относительно трубчатого элемента 4. При этом поверхности отверстия 5 трубчатого элемента 3 воздействуют на опорные концы 10 скобообразных пружин 9, что приводит к сжатию их кольцевой части, а также сжатию дополнительных упругих элементов 14, обеспечивая при этом нелинейность характеристики привода. Скобообразные пружины 9, а также дополнительные пружины 14 сжимаются до тех пор, пока крутящий момент на ступице не превысит момент сопротивления движению мобильной машины. При этом передача крутящего момента от полуоси к колесу происходит плавно, не вызывая динамических нагрузок на трансмиссию, что снижает буксование движителей и сцепления.

Возникающие колебания, передаваемые от движителей, сглаживаются за счет внутреннего трения в упругих элементах 9 и 14 и внешнего трения в местах соприкосновения упругих элементов. При увеличении крутящего момента в скобообразных пружинах 9 выбирается зазор *a*, и они замыкаются на упоры, а в работу вступают их опорные концы 10, которые могут воспринимать значительные перегрузки. Это позволяет защитить трансмиссию и движитель от повышенных динамических нагрузок за счет нелинейности характеристики упругих элементов.

Результаты исследований комбинированного агрегата ЛТЗ-155 с жестким и упругим приводом на полуосях показали, что они смещают частоту собственных колебаний трансмиссии в сторону низких частот и снижают амплитуды колебаний крутящих моментов в трансмиссии на 20–40%, а также ведущих мостов трактора в 1,3–2,0 раза (рис. 2 и 3).

Энергозатраты трактора ЛТЗ-155 оценивали по удельным затратам энергии на единицу пути [11]:

$$E_{уд} = \frac{M \cdot \varphi}{S},$$

где M – ведущий момент на полуосях трактора;

φ – угол поворота полуосей на пути *S*.

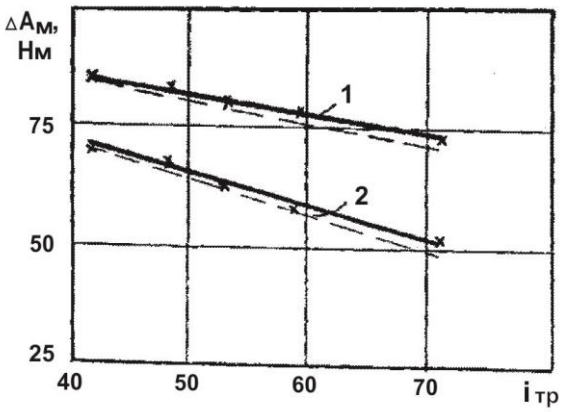

Рис. 2. Зависимость амплитуд колебаний крутящего момента двигателя трактора ЛТЗ-155 от передаточного числа при работе с комбинированным агрегатом: 1 – жесткий привод; 2 – привод с оптимальным УДП; сплошная линия – экспериментальные зависимости; прерывистая линия – теоретические зависимости

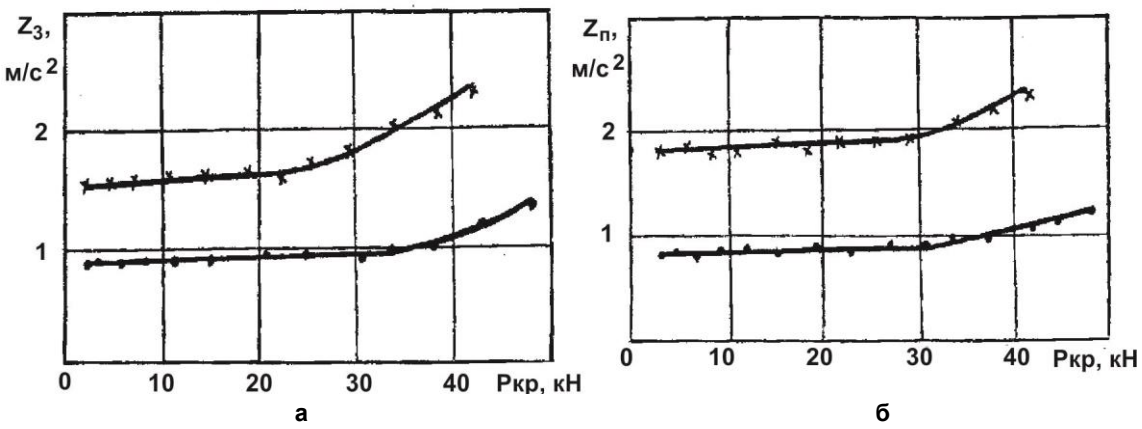

Рис. 3. Зависимость амплитуд вертикальных ускорений ведущих мостов трактора ЛТЗ-155 от крюковой силы при тяговых испытаниях на бетонной дороге (третий диапазон, вторая передача): а – задний мост; б – передний мост; 1 – жесткий привод; 2 – УДП

Результаты анализа энергозатрат трактора ЛТЗ-155 на транспортных работах с прицепом показали, что значение этого показателя при установке УДП снижается по сравнению с жестким приводом на 7–8% (см. табл.).

Зависимость удельных энергозатрат на передвижение трактора ЛТЗ-155 от усилия на крюке при выполнении транспортных оабот

Тип привода ведущих колес	Удельные энергозатраты трактора при работе с прицепом общей массой 13 800 кг, Дж/м	
	***V* = 4,4 м/с**	***V* = 6,8 м/с**
Жесткий	$22{,}1 \cdot 10^3$	$30{,}1 \cdot 10^3$
УДП	$20{,}9 \cdot 10^3$	$27{,}4 \cdot 10^3$

При выполнении культивации и пахоты энергозатраты трактора ЛТЗ-155 при установке УДП снижаются от 6 до 9% по сравнению с жестким приводом (рис. 4).

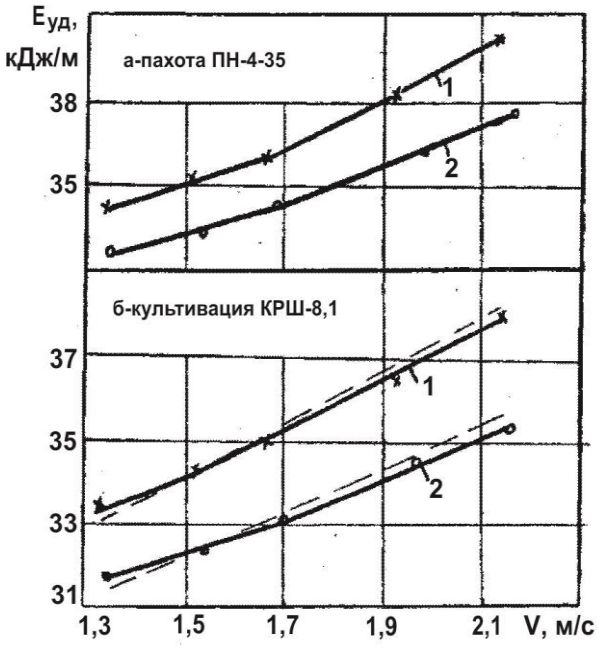

Рис. 4. Зависимость удельных энергозатрат на передвижение трактора ЛТЗ-155 от скорости движения на пахоте и культивации: 1 – жесткий привод; 2 – УДП; сплошная линия – экспериментальные зависимости; прерывистая линия – теоретические зависимости

Экспериментальные данные работы трактора с культиватором КРШ-8,1, установленным на передней навеске, и с сеялкой ССТ-18, установленной на задней навеске, свидетельствуют о том, что за счет наличия УДП на полуосях ведущих колес энергозатраты снизились на 11–12%. Это происходит за счет уменьшения амплитуд колебаний крутящих моментов на валах трансмиссии (рис. 3). При работе трактора ЛТЗ с комбинированными агрегатами значительно возрастает буксование движителей, особенно при скорости движения более 1,7–1,8 м/с. Буксование движителей с жестким приводом возрастает до 11%, а с УДП – до 9% (рис. 5).

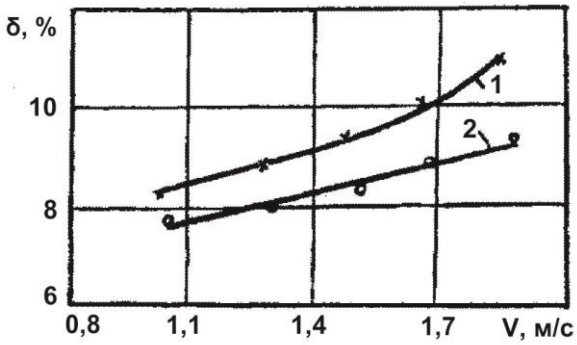

Рис. 5. Зависимость буксования движителей трактора ЛТЗ-155 при работе с комбинированным агрегатом от скорости движения: 1 – жесткий привод; 2 – УДП

Выводы

Результаты проведенных экспериментов показали, что за счет установки УДП ведущих колес трактора ЛТЗ-155 при его движении во время выполнения основных видов работ (транспорт, пахота, культивация и работа в составе комбинированного агрегата КРШ-8,1 + ЛТЗ-155 + ССТ-18) амплитуды колебаний крутящих моментов на валу сцепления двигателя смещаются в сторону низких частот и уменьшаются на 20–40%. За счет устранения буксования и перехода к более плавному взаимодействию движителей с почвой энергозатраты снижаются на 6–12% в зависимости от вида выполняемых работ.

Список источников

1. Волошин Ю.Л. Математические модели колебаний колесных транспортных и тягово-транспортных средств // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 6. С. 37–43.

2. Кутьков Г.М. Тяговая динамика тракторов. Москва: Машиностроение, 1980. 212 с.

3. Нехорошев Д.Д., Коновалов П.В., Попов А.Ю. и др. Особенности улучшения работы машинно-тракторного агрегата за счет снижения колебания нагрузки // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1(53). С. 345–351.

4. Подрубалов В.К., Никитенко А.Н., Подрубалов М.В. Обобщенная математическая модель вибронагруженности мобильной машины при случайном кинематическом возбуждении // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 2(16). С. 203–211.

5. Поливаев О.И., Астанин В.К., Бабанин Н.В. Снижение динамической нагруженности мобильных энергетических средств от внешних воздействий и повышение их тягово-динамических показателей // Лесотехнический журнал. 2013. № 3(11). С. 150–156.

6. Поливаев О.И., Ворохобин А.В. Теория трактора и автомобиля: учебник для вузов. 2-е изд., испр. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 232 с.

7. Сенькевич С.Е. Анализ результатов экспериментальных исследований трактора класса 1.4 модернизированного гидропневматическим демпферным устройством в силовой передаче // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 3(24). С. 8–16.

8. Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Годжаев З.А. и др. Результаты проведения полевых исследований трактора класса тяги 1,4 с упругодемпфирующим механизмом в силовом приводе // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 4(46). С. 76–87. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-46-4-76-87.

9. Сенькевич С.Е., Крюковская Н.С. Анализ экспериментальных исследований трактора, оснащенного упругодемпфирующим механизмом в трансмиссии, при движении в составе транспортного тракторного агрегата // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 59–66. DOI 10.31992/0321- 4443-2020-6-59-66.

10. Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Шевчук В.П. и др. Технические решения упругодемпфирующих устройств подвески кабины трактора // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 7-2(14). С. 122–124.

11. Gohrle C., Schindler A., Wagner A. et al. Design and Vehicle Implementation of Preview Active Suspension Controllers // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2014. Vol. 22(3). Pp. 1135–1142. DOI: 10.1109/TCST.2013.2272342.

References

1. Voloshin Yu.L. Mathematical models of oscillations of wheeled transporting and traction & transport means. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2007;6:37-43. (In Russ.).

2. Kutkov G.M. Traction dynamics of tractors. Moscow: Mashinostroenie Publishers; 1980. 212 p. (In Russ.).

3. Nekhoroshev D.D., Konovalov P.V., Popov A.Yu. et al. Features of improvement of machine-tractor unit during the reduction of the vibration of the load. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2019;1(53):345-351. (In Russ.).

4. Podrubalov V.K., Nikitenko A.N., Podrubalov M.V. Generalized mathematical model of vibration loading of mobile machines with random kinematic excitation. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2013;2(16):203-211. (In Russ.).

5. Polivaev O.I., Astanin V.K., Babanin N.V. Reducing dynamic loading of mobile power equipment from external impacts and increase of their traction and dynamic parameters. *Forestry Engineering Journal*. 2013;3(11):150-156. (In Russ.).

6. Polivaev O.I., Vorokhobin A.V. Theory of tractor and automobile: textbook for universities. 2nd edition, revised. Saint Petersburg: Lan Publishers; 2024. 232 p. (In Russ.).

7. Senkevich S.E. Analysis of the results of experimental researches of the class 1.4 tractor modernized by a hydro-pneumatic damper in a power transmission. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2019;3(24):8-16. (In Russ.).

8. Senkevich S.E., Ilchenko E.N., Godzhayev Z.A. et al. Results of field studies of a tractor of traction class 1.4 with an elastic damping mechanism in a power drive. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2020;4(46):76-87. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-46-4-76-87. (In Russ.).

9. Senkevich S.E., Kryukovskaya N.S. Analysis of experimental researches of the tractor equipped with an elastic-damping mechanism in the transmission when moving in the composition of the transport tractor unit. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;6:59-66. DOI 10.31992/0321- 4443-2020-6-59-66. (In Russ.).

10. Shekhovtsov V.V., Lyashenko M.V., Shevchuk V.P. et al. Experimental determination of tractor cabin vibration isolators characteristics. *International Research Journal*. 2013;7-2(14):122-124. (In Russ.).

11. Gohrle C., Schindler A., Wagner A. et al. Design and Vehicle Implementation of Preview Active Suspension Controllers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology.* 2014;22(3):1135-1142. DOI: 10.1109/TCST.2013.2272342.

Информация об авторах

О.И. Поливаев – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», polivaevoi@icloud.com.

О.С. Ведринский – старший преподаватель кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vos74@mail.ru.

А.В. Ворохобин – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dogruzka@rambler.ru.

С.З. Манойлина – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», s.manoilina@yandex.ru.

Information about the authors

O.I. Polivaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, polivaevoi@icloud.com.

O.S. Vedrinsky, Senior Lecturer, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vos74@mail.ru.

A.V. Vorokhobin Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dogruzka@rambler.ru.

S.Z. Manoylina, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, s.manoilina@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 06.07.2025.

The article was submitted 15.05.2025; approved after reviewing 25.06.2025; accepted for publication 06.07.2025.