

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 631.531.17-52:633(470.31)
DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_4_11

**Анализ способов снижения уровня вибрационной нагруженности
рабочего места оператора тракторно-транспортного агрегата**

**Олег Иванович Поливаев¹, Алексей Николаевич Кузнецов^{2✉}, Алексей Владиславович Лощенко³,
Дмитрий Борисович Болотов⁴**

^{1, 2, 3, 4} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия
²kuz-basss@yandex.ru[✉]

Аннотация. С целью снижения уровня вибрационной нагруженности рабочего места оператора тракторно-транспортного агрегата выполнен анализ известных конструкций подвесок сиденья, который позволил выявить следующие недостатки: у электромагнитной подвески сиденья по патенту РФ на полезную модель № 176370 – большое потребление электроэнергии, у конструкции подвески сиденья по патенту на полезную модель РФ № 139995 – наличие линейной упругой характеристики из-за использования в качестве упругого элемента цилиндрической пружины. На основании изучения различных вариантов подвесок разработана конструкция с оптимальными показателями, особенностью которой является использование в качестве упругого элемента трех пневмогидравлических аккумуляторов (ПГА), установленных с возможностью изменения упругой характеристики за счет изменения суммарных объемов газовых полостей ПГА. Управление демпфированием осуществляется изменением проходного сечения управляемого регулируемого дросселя, связанного с надпоршневой полостью гидроцилиндра. С целью определения эффективности работы данной конструкции были проведены сравнительные полевые испытания, объектом которых являлся тракторно-транспортный агрегат (ТТА) в составе МТЗ-82.1 + 2ПТС-4,5. Испытания выполнялись на транспортных операциях с опытной и серийной конструкциями подвесок сиденья. Результаты экспериментальных исследований выявили, что максимальные значения ускорений находятся в октавной полосе с частотой 2–4 Гц, при которых скорость движения ТТА повышается на 3,5–5,5 км/ч. Это происходит за счет упругих характеристик шин, подвески сиденья и скорости движения ТТА. Модернизированная подвеска снижает вертикальные ускорения на 12–20% при скоростях движения от 15 до 30 км/ч. Результаты экспериментальных и теоретических исследований были приняты ООО «Брянский тракторный завод» при выборе конструктивных параметров сиденья с более эффективной виброзащитой.

Ключевые слова: тракторно-транспортный агрегат, подвеска сиденья, сравнительные испытания, уровни виброускорений, электромагнитный демпфер

Для цитирования: Поливаев О.И., Кузнецов А.Н., Лощенко А.В., Болотов Д.Б. Анализ способов снижения уровня вибрационной нагруженности рабочего места оператора тракторно-транспортного агрегата // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14, № 4(71). С. 11–20. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_4_11–20.

TECHNOLOGIES AND MECHANICAL MEANS
IN AGRICULTURE (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

**Observation of methods reducing the level of vibration
loading of tractor-transport unit driver's compartment**

Oleg I. Polivaev¹, Aleksey N. Kuznetsov^{2✉}, Aleksey V. Loshchenko³, Dmitriy B. Bolotov⁴

^{1, 2, 3, 4}Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia
²kuz-basss@yandex.ru[✉]

Abstract. In order to reduce the level of vibration loading of tractor-transport unit driver's compartment, an analysis of the known designs of seat suspensions was performed, which revealed the following disadvantages: patent-protected electromagnetic suspension of the seat (utility model patent 176370 RF) has a large power consumption; patent-protected suspension design of the seat (utility model patent 139995 RF) has a linear elastic characteristic due to the use of a cylindrical spring as an elastic element. Based on the study of various suspension options, a design with optimal performance has been developed, the feature of which is the use as an elastic element of three pneumohydraulic accumulators (PHA) installed with the possibility of changing the elastic

characteristics by changing the total volumes of gas cavities of the PHA. Damping control is carried out by changing the orifice size of the controlled adjustable throttle connected to the head-end chamber of the hydraulic cylinder. In order to determine the effectiveness of this design, comparative field tests were conducted, the object of which was a tractor-transport unit (TTA) consisting of MTZ-82.1 + 2PTS-4.5. The tests were carried out on transport operations with experimental and serial designs of seat suspensions. The results of experimental studies have revealed that the maximum acceleration values are in the octave bandwidth with a frequency of 2-4 Hz, at which the speed of the TTA increases by 3.5–5.5 km/h. This is due to the elastic characteristics of the tires, the seat suspension and the speed of the TTA. The upgraded suspension reduces vertical acceleration by 12-20% at speeds from 15 to 30 km/h. The results of experimental and theoretical studies were accepted by Bryansk Tractor Plant when choosing the design parameters of a seat with more effective vibration protection.

Keywords: tractor-transport unit, seat suspension, comparative tests, vibration acceleration levels, electromagnetic damper

For citation: Polivaev O.I., Kuznetsov A.N., Loshchenko A.V., Bolotov D.B. Observation of methods to reduce the level of vibration loading of tractor-transport unit driver's compartment. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14(4):11-20. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_4_11-20.

В настоящее время практически все виды работ в сельскохозяйственном производстве выполняются тракторами. Сельскохозяйственные тракторы общего назначения используют при выполнении энергоемких технологических операций в растениеводстве (пахота, сплошная культивация, рыхление, фрезерование, внесение удобрений, дискование тяжелыми боронами и т.д.), а также в кормопроизводстве; пропашные – при посеве, уходе, уборке пропашных культур в междурядьях различной ширины; универсально-пропашные синтезируют функции двух предыдущих групп тракторов, но имеют ограниченное использование на работах по подготовке почвы.

Однако использование универсально-пропашных тракторов сопровождается повышенными вибрационными нагрузками на оператора. Это оказывает негативное влияние на организм и приводит к снижению производительности его труда и всего агрегата в целом. Как известно, возникающая при работе тракторного агрегата вибрация в основном зависит от рельефа дороги и крюковой нагрузки [3, 4, 5, 6].

Основными показателями вибрационной нагрузки на оператора являются:

- амплитуды виброускорений (виброскорости);
- диапазон возмущающих частот;
- время воздействия вибрации [9, 10, 13].

Для оценки соответствия действительного уровня вибраций требованиям санитарных норм используется в октавных или треть-октавных полосах частот среднеквадратическое значение виброускорения, а также их логарифмические уровни в децибелах L_a октавных или третьоктавных полосах частот [5].

Предельные нормы вибрации на сиденье оператора в вертикальном направлении приведены в таблице 1.

Таблица 1. Предельные параметры вибрации в вертикальном направлении на сиденье оператора трактора

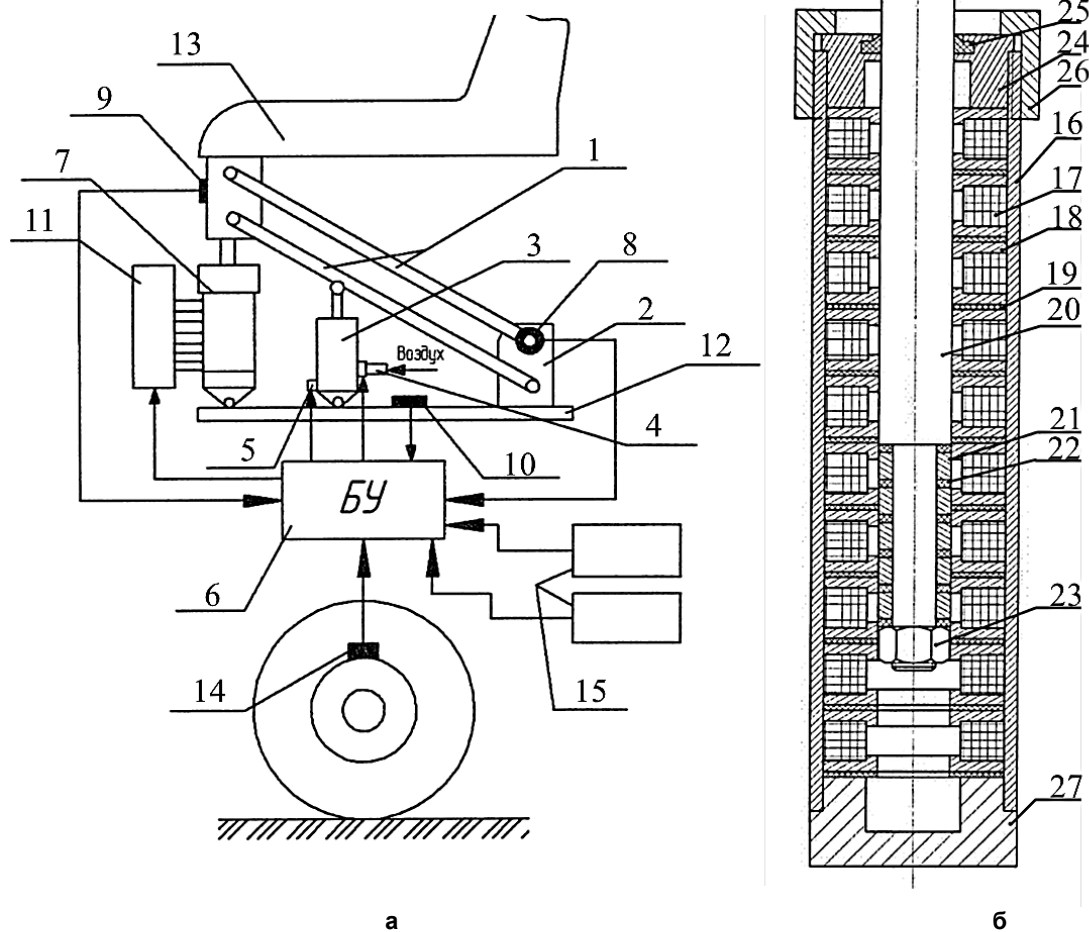
Класс трактора	Среднеквадратические значения ускорений a , m/c^2 (L_a) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц			
	2	4	8	16
0,6	1,15 (121,2)	0,80 (118,1)	0,60 (115,6)	1,14 (121,1)
0,9; 1,4	1,30 (122,3)	0,60 (115,6)	0,50 (114,0)	0,40 (112,0)
2	1,20 (121,6)	0,60 (115,6)	0,50 (114,0)	0,40 (112,0)
3	1,30 (122,3)	0,45 (113,1)	0,35 (110,9)	0,40 (112,0)
5	1,30 (122,3)	0,40 (112,0)	0,25 (108,0)	0,25 (108,0)

Результаты испытаний, проведенных на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей Воронежского ГАУ, показали, что наибольшей вибрационной нагруженности подвергаются тракторно-транспортные агрегаты (ТТА), работающие на высоких скоростях движения. Учитывая тот факт, что низкочастотные колебания на рабочем месте оператора ТТА можно снизить за счет поддрессоривания либо остова, либо кабины, а также применения эффективных подвесок сиденья, выполнен анализ различных источников информации, в которых опубликованы описания известных конструкций подвесок сиденья [7, 11, 12]. При создании тракторов, работающих на скоростях до 15–20 км/ч, в качестве упругого элемента подвески сиденья используются цилиндрические пружины или торсионы. Однако при работе тракторных агрегатов на более высоких скоростях такие подвески не удовлетворяют требованиям санитарных норм из-за повышенных колебаний на рабочем месте оператора [5, 14, 15].

Наиболее перспективными являются полуактивные и активные подвески сиденья [1, 2, 8], разработанные сотрудниками Воронежского ГАУ под руководством проф. О.И. Поливаева. Подробно остановимся на анализе активных подвесок сидений операторов транспортных средств. На рисунке 1 представлена электромагнитная подвеска сиденья по патенту РФ на полезную модель 176370 [8].

Работает подвеска следующим образом. При возникновении вертикальных перемещений сиденья 13 с датчика ускорений 9, датчика углового перемещения 8 и датчика вертикальных ускорений кабины 10 поступает электрический сигнал, который подается на блок управления (ЭБУ) 6. Также в ЭБУ передается сигнал с датчика ускорения переднего моста 14. В зависимости от уровня сигнала, поступающего от переднего моста 14, ЭБУ принимает решение о режиме гашения. В процессе работы при незначительных колебаниях в качестве упругого элемента выступает пневмоцилиндр 3, а в качестве гасителя колебаний – электромагнитный демпфер (рис. 1, б), в котором активна лишь одна катушка, что обеспечивает экономию энергии. Когда уровень колебаний достигает значительных величин, ЭБУ принимает решение о невозможности эффективно снижения вибрации при использовании пневмоцилиндра в качестве упругого элемента, впускной клапан 4 перекрывается, а из выпускного клапана 5 воздух стравливается в атмосферу. Это позволяет поршню 3 свободно перемещаться, в связи с чем активизируется работа электромагнитного демпфера, теперь он одновременно выполняет функцию упругого элемента и гасящего устройства. Энергопотребление при этом значительно возрастает.

Электромагнитный демпфер выполнен в виде цилиндра 16, в котором установлены катушки индуктивности 17, разделенные магнитными 18 и немагнитными 19 кольцами. Шток 20, на котором крепятся магниты 21, разделен немагнитными кольцами 22, все эти элементы стянуты гайкой 25. Работа демпфера основана на электромагнитном взаимодействии катушек индуктивности 17 с магнитами 21 штока 20. При работе в качестве гасителя колебаний упругого элемента шток фиксируется и перемещается под действием магнитных полей катушек 17. Положение штока 20 осуществляется подачей управляющего тока на три соседние катушки. При движении штока, в зависимости от направления и скорости, ЭБУ рассчитывает скорость убывания тока из катушек. Положение рабочих катушек, сила тока в них, а также скорость ее нарастания (убывания) определяется ЭБУ после обработки сигналов с датчиков 8, 9 и 10.



а – принципиальная схема подвески; б – электромагнитный демпфер

Рис. 1. Электромагнитная подвеска сиденья транспортного средства:
 1 – рычаг; 2 – кронштейн; 3 – пневмоцилиндр; 4 и 5 – впускной и выпускной клапаны;
 6 – блок управления; 7 – электромагнитный демпфер; 8 – потенциометрический датчик
 углового положения рычага; 9 – датчик ускорения; 10 – датчик вертикальных ускорений
 кабины; 11 – преобразователь сигналов; 12 – основание; 13 – каркас подвески сиденья;
 14 – датчик ускорения переднего моста; 15 – сигналы бортовой системы; 16 – цилиндр;
 17 – катушки индуктивности; 18 и 19 – магнитные и немагнитные кольца; 20 – шток;
 21 – магниты; 22 – немагнитные кольца; 23 – гайка; 24 – уплотнительный элемент
 штока; 25 – упор; 26 – гайка; 27 – нижний стакан

Такие электромагнитные подвески нашли применение в подвесках мостов машин (Lexus LS 400). Однако из-за большого потребления электроэнергии пока широкого внедрения в подвесках сидений и мостов не получили.

На рисунке 2 представлена схема подвески сиденья, описанная в патенте на полезную модель РФ 139995 [1].

Принцип работы подвески сиденья следующий. При колебаниях сиденья срабатывает датчик 7, с которого электрический сигнал поступает на ЭБУ 8. ЭБУ подает сигнал на преобразователь 5, за счет чего изменяется сила тока в электромагнитной катушке амортизатора. Это позволяет в зависимости от частоты и амплитуды колебаний изменять свойства магнитореологической жидкости амортизатора, следовательно, гасить вибрацию в нужный момент. Недостатком данной конструкции является то, что пружина имеет линейную характеристику и может вызвать резонансные колебания.

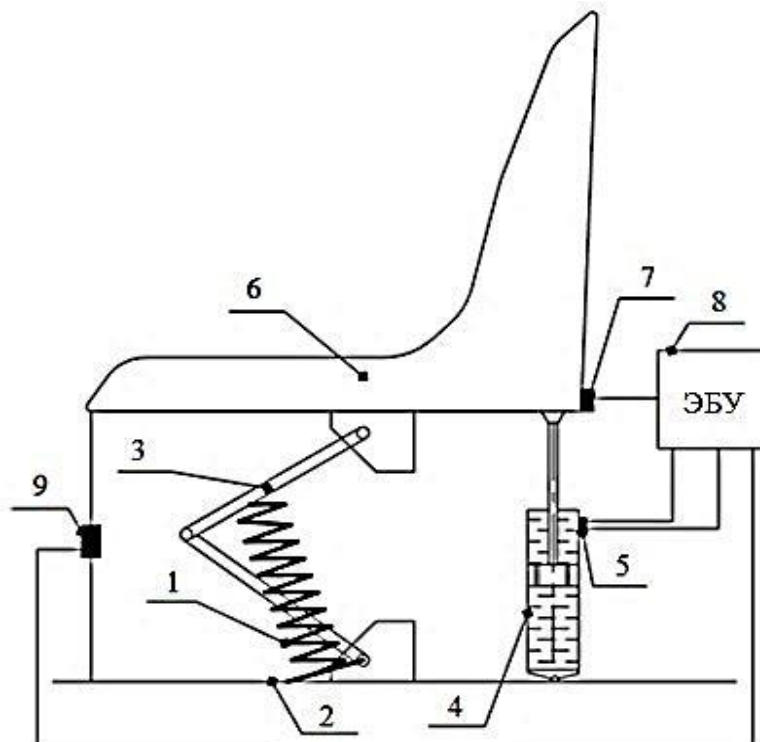


Рис. 2. Схема подвески сиденья:
 1 – цилиндрическая пружина; 2 – основание; 3 – верхняя пара планок;
 4 – гидравлический демпфер; 5 – преобразователь; 6 – основание сиденья;
 7 – датчик вибрации; 8 – электронный блок управления; 9 – датчик положения

На рисунке 3 схематично представлена активная подвеска сиденья транспортного средства, на которую получен патент РФ 206649 [2]. Данная конструкция призвана устранить недостатки, присущие двум вышеописанным.

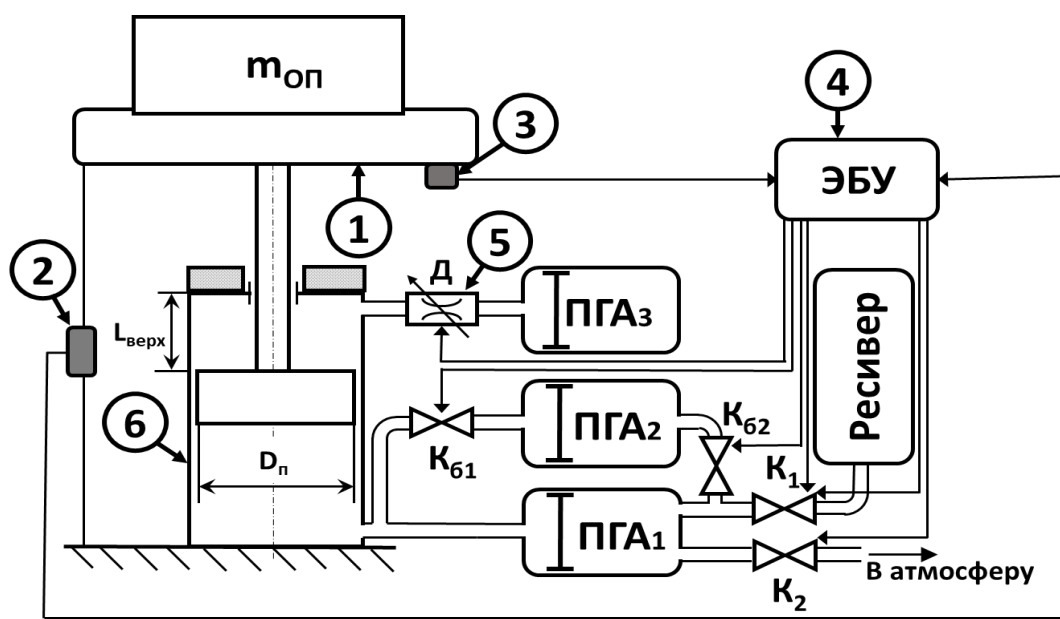


Рис. 3. Схема подвески сиденья:
 1 – сиденье; 2 – датчик перемещения; 3 – датчик ускорения; 4 – электронный блок управления (ЭБУ); 5 – регулируемый дроссель; 6 – гидроцилиндр

Подвеска работает следующим образом. При посадке водителя на сиденье производится оценка передаточной функции системы «мост – подвеска – кабина». Цифровая оценка данной передаточной функции сохраняется в весовых коэффициентах блока управления. После проведения калибровки можно начинать непосредственную эксплуатацию транспортного средства.

При включении замка зажигания и в зависимости от веса оператора запускается режим автоматической подстройки высоты положения подвески сиденья. При этом электронный блок управления считывает сигнал с датчика ускорения 3 и в зависимости от отклонения положения подрессоренной части сиденья от центрального положения происходит подача сигнала на регулируемый дроссель 5 и быстродействующие клапаны $K_{б1}$, $K_{б2}$, K_1 и K_2 .

Вес оператора компенсируется пневмогидроаккумуляторами ПГА₁ и ПГА₂ при движении вниз, а при движении вверх – ПГА₃ с регулируемым дросселем 5. Корректировка положения оператора прекращается при установлении подрессоренной части сиденья в центральном положении.

Сигнал с датчика ускорений 3 позволяет блоку управления рассчитать предполагаемое направление и уровень ускорений, которые передаются на основание подвески сиденья. Блок управления 4 получает сигнал с датчика положения сиденья 2, информирующий о текущем положении водителя. Основываясь на величинах ожидаемых виброускорений, передаваемых от пола кабины к сиденью и текущему положению сиденья, ЭБУ, согласно заложенному алгоритму, подбирает наиболее оптимальную величину жесткости и демпфирования подвески, а также формирует управляющий сигнал, который позволяет соответствующим образом изменять положение регулируемого дросселя 5, что способствует качественному управлению демпфированием за счет изменения проходного сечения.

При сжатии подвески рабочая жидкость вытесняется из подпоршневой полости гидроцилиндра, по гидромагистрали поступает в ПГА₁ и ПГА₂, сжимая газ в их пневматической полости, при этом клапаны $K_{б1}$ и $K_{б2}$ открыты, закрыт только клапан сброса давления воздуха в атмосферу K_2 .

При повышенных колебаниях сиденья 1 быстродействующий клапан $K_{б1}$, управляемый ЭБУ, закрывается, исключая из работы ПГА₂, вследствие чего уменьшается суммарный объем газовых полостей, что приводит к увеличению жесткости подвески сиденья. ПГА₃ связан гидромагистралью с надпоршневой полостью гидроцилиндра 6 через управляемый гидравлический дроссель 5.

Интенсивность перетекания рабочей жидкости и ее количество определяются блоком управления 4. Таким образом, быстрое изменение площади рабочего канала за счет регулируемого дросселя 5 позволяет эффективно регулировать коэффициент демпфирования разработанной конструкции, а отключение клапаном $K_{б1}$ ПГА₂ изменяет жесткость подвески, что устраняет резонанс.

С целью определения эффективности работы данной конструкции были проведены сравнительные полевые испытания, объектом которых являлся тракторно-транспортный агрегат (ТТА) в составе МТЗ-82.1 + 2ПТС-4,5. Испытания выполнялись на транспортных операциях с опытной и серийной конструкциями подвесок сиденья.

На тракторно-транспортном агрегате была установлена следующая измерительная аппаратура (рис. 4):

- ИСР датчик ускорений, который установлен на сиденье оператора;
- тензометрические виброакселерометры, установленные на переднем и заднем мостах, а также в центральной точке остова трактора;
- тензобалки для замера крюкового усилия трактора;

- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- усилитель сигналов тензометрических акселерометров ПИН-703;
- персональный компьютер, установленный в кабине трактора для записи данных, полученных от датчиков.

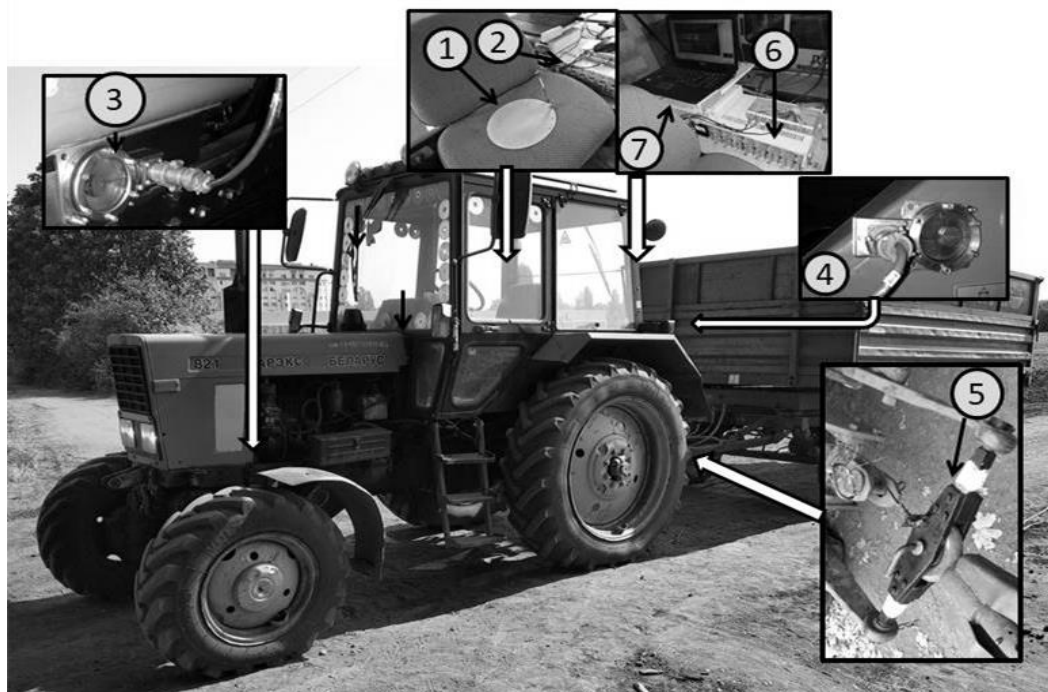


Рис. 4. ТТА на дорожных испытаниях: 1 – посадочный диск; 2 – ICP датчик ускорений, установленный на сиденье оператора; 3 – тензометрический виброакселерометр переднего моста трактора; 4 – тензометрический виброакселерометр заднего моста трактора; 5 – тензобалка; 6 – усилитель сигналов тензометрических акселерометров

Сравнительные результаты полевых испытаний на грунтовой дороге при движении от 15 до 30 км/ч приведены на рисунках 5, 6, 7, 8.

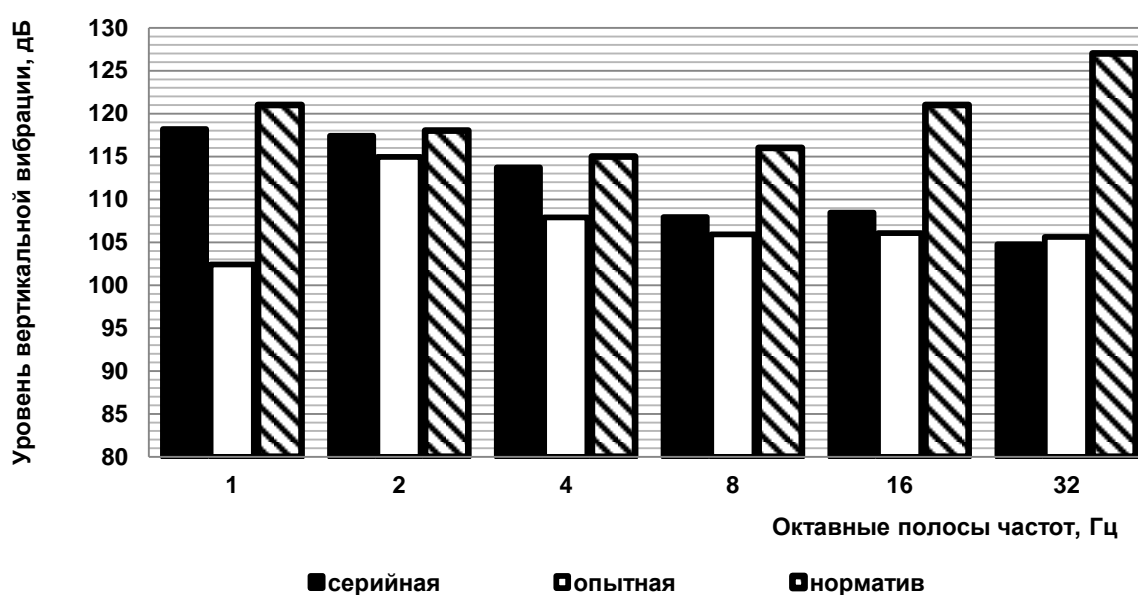


Рис. 5. Уровень вертикальной вибрации при скорости движения ТТА 15 км/ч

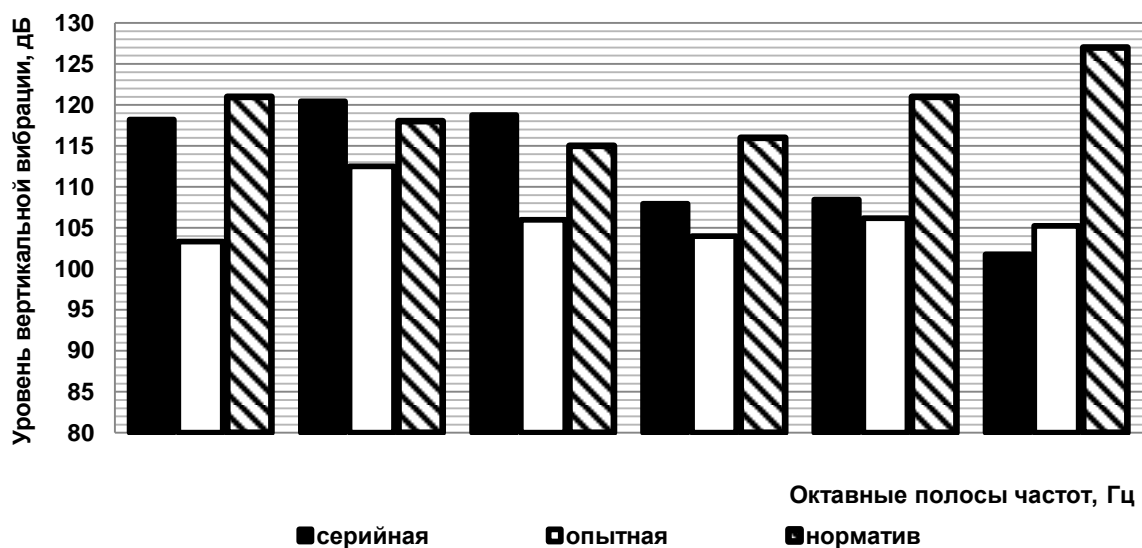


Рис. 6. Уровень вертикальной вибрации при скорости движения ТТА 20 км/ч

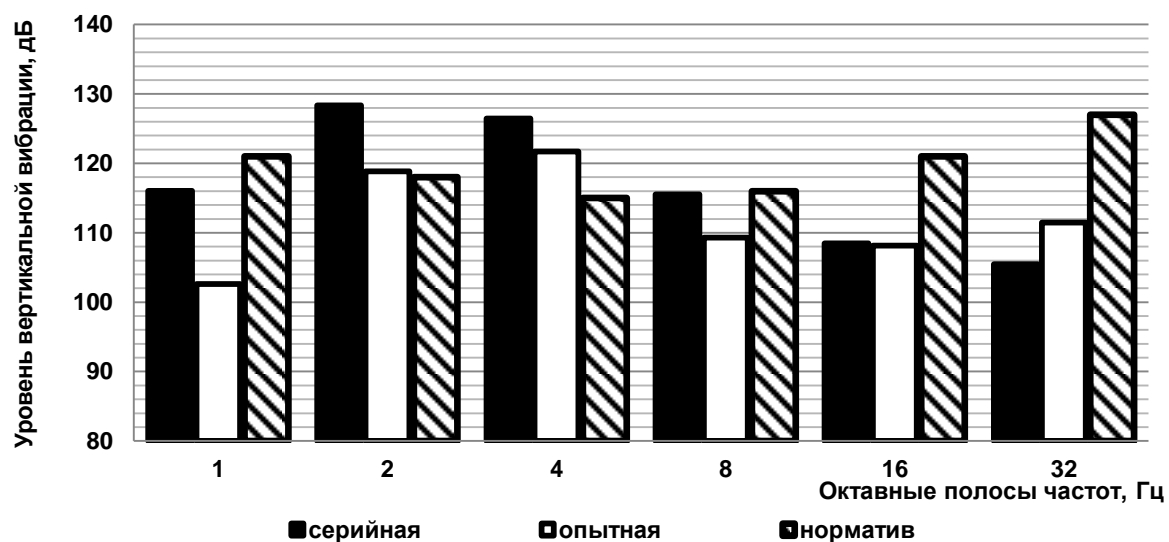


Рис. 7. Уровень вертикальной вибрации при скорости движения ТТА 25 км/ч

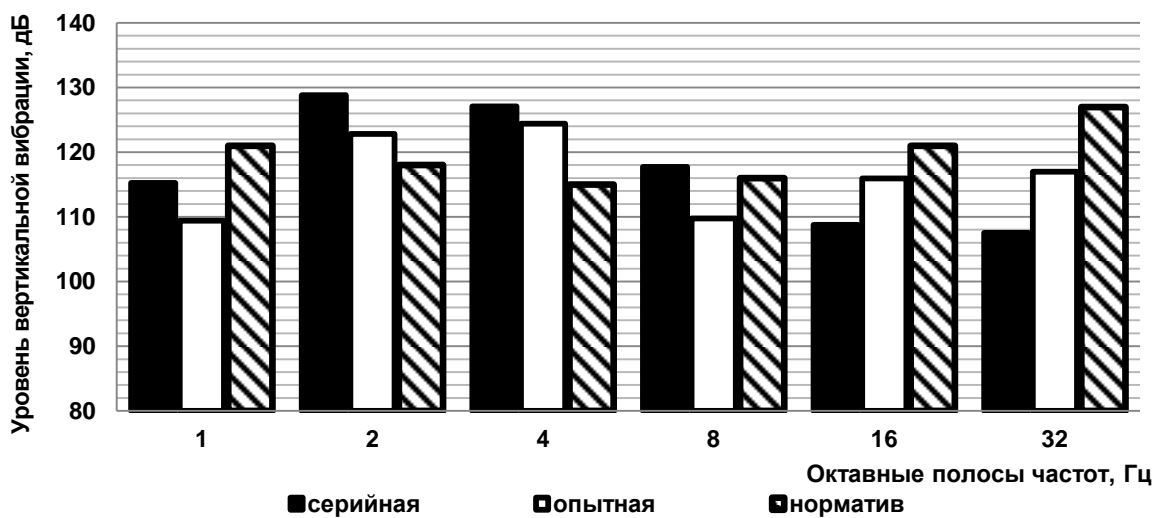


Рис. 8. Уровень вертикальной вибрации, при скорости движения ТТА 30 км/ч

Результаты экспериментальных исследований выявили, что максимальные значения ускорений находятся в октавной полосе с частотой 2–4 Гц, при этом скорость движения тракторно-транспортного агрегата повышается на 3,5–5,5 км/ч, что происходит за счет упругих характеристик шин, подвески сиденья и скорости движения ТТА.

Модернизированная подвеска сиденья снижает уровень виброускорений оператора на 12–20% при движении ТТА по грунтовой дороге, а также повышает скорость движения от 15 до 30 км/ч, или на 3,5–5,0 км/ч.

Комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований создал базу для разработки опытной подвески сиденья. Результаты экспериментальных и теоретических исследований были приняты ООО «Брянский тракторный завод» при выборе конструктивных параметров сиденья с более эффективной виброзащитой.

Список источников

1. Активная подвеска сиденья транспортного средства: пат. на полезную модель 139995 Рос. Федерация. № 2013152536; заявл. 26.11.2013; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. 3 с.
2. Активная подвеска сиденья транспортного средств : пат. на полезную модель 206649 Рос. Федерация. № 2021108357; заявл. 26.03.2021; опубл. 21.09.2021, Бюл. № 27. 6 с.
3. Ванин В.С. Виброзащита рабочего места оператора // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1983. № 11. С. 15–17.
4. Волошин Ю.В. Применение систем подрессоривания в зарубежных тракторах // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2000. № 2. С. 36.
5. ГОСТ 20062-96. Сиденье тракторное. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2000. 13 с.
6. Зеленко Н.Г., Малаяя К.Р., Русак О.Н. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 667 с.
7. Ляшенко М.В. Методы оптимизационного синтеза систем подрессоривания и элементов ходовых систем гусеничных сельскохозяйственных тракторов, адаптированных к условиям эксплуатации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01. Волгоград: ВолгГТУ, 2003. 36 с.
8. Подвеска сиденья транспортного средства: пат. на полезную модель 176370 Рос. Федерация. № 2017115483; заявл. 02.05.2017; опубл. 17.01.2008, Бюл. № 2. 7 с.
9. Росляков В.П., Нахтичаль Н.Г. Выбор параметров виброзащитной системы с нелинейной характеристикой // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1975. № 10. С. 36–37.
10. Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 192 с.
11. Устинов Ю.Ф., Калинин Ю.И., Ульянов А.В. и др. Улучшение виброакустических параметров транспортно-технологических машин // Высокие технологии в строительном комплексе. 2021. № 1. С. 172–176.
12. Чернышов К.В., Новиков В.В., Рябов И.М. Оптимальное управление демпфированием подвески на основе принципа максимума // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 2. С. 13–15.
13. Chaparro L.F., Akan A. Signals and Systems Using MATLAB. UK: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2019. 820 p.
14. Du H., Sze K, Lam J. Semi-active H^∞ control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 283(3-5). P. 981–996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2004.05.030>.
15. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. CRC Press, 2018. 832 p.

References

1. Aktivnaya podveska siden'ya transportnogo sredstva [Active suspension of the vehicle seat]: patent na poleznuyu model' 139995 Ros. Federatsiya. № 2013152536; zayavleno 26.11.2013; opublikovano 27.04.2014, Byul. № 12 = Utility Model Patent 139995 Russian Federation. No. 2013152536, claimed 26.11.2013; published 27.04.2014, Bulletin 12. 3 p. (In Russ.).
2. Aktivnaya podveska siden'ya transportnogo sredstva [Active suspension of the vehicle seat]: patent na poleznuyu model' 206649 Ros. Federatsiya. № 2021108357; zayavleno 26.03.2021; opublikovano 21.09.2021, Byul. № 27 = Utility Model Patent 206649 Russian Federation. No. 2021108357, claimed 26.03.2021; published 21.09.2021, Bulletin 27. 6 p. (In Russ.).
3. Vanin V.S. Vibrozashchita rabocheho mesta operatora [Vibration protection of the operator's compartment]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyajstva = Mechanization and Electrification of Agriculture*. 1983;(11):15-17. (In Russ.).

4. Voloshin Yu.V. Primenenie sistem podressorivaniya v zarubezhnykh traktorakh [Application of spring suspension systems in foreign tractors]. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2000;(2):36. (In Russ.).
5. GOST 20062-96. Siden'e traktornoe. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Tractor seat. General specifications]. Moscow: Standartinform Press; 2000. 13 p. (In Russ.).
6. Zelen'ko N.G., Malayan K.R., Rusak O.N. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: uchebnyk dlya vuzov [Health and Wellness. Textbook for higher education]. Saint Petersburg: Lan' Press; 2012. 667 p. (In Russ.).
7. Lyashenko M.V. Metody optimizatsionnogo sinteza sistem podressorivaniya i elementov khodovykh sistem gusenichnykh sel'skohozyajstvennykh traktorov, adaptirovannykh k usloviyam ekspluatatsii [Methods of optimization synthesis of spring suspension systems and elements of ground drive systems of track type agricultural tractors adapted to operating conditions]: avtoreferat dissertatsii ... doctora tekhnicheskikh nauk = author's abstract of Doctor of Engineering Sciences: 05.20.01. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2003. 36 p. (In Russ.).
8. Podveska siden'ya transportnogo sredstva [Vehicle seat suspension]: patent na poleznuyu model' 176370 Ros. Federatsiya. № 2017115483; zayavleno 02.05.2017; opublikovano 17.01.2008, Byul. № 2 = Utility Model Patent 176370 Russian Federation. No. 2017115483, claimed 02.05.2017; published 17.01.2017, Bulletin 2. 7 p. (In Russ.).
9. Roslyakov V.P., Nakhtichal' N.G. Vybor parametrov vibrozashchitnoj sistemy s nelinejnoj kharakteristikoj [Selection of vibration isolation system parameters with nonlinear characteristic]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyajstva = Mechanization and Electrification of Agriculture*. 1975;(10):36-37. (In Russ.).
10. Silaev A.A. Spektral'naya teoriya podressorivaniya transportnykh mashin [Spectral theory of transport vehicles spring suspension]. Moscow: Mashinostroenie Press; 1972. 192 p. (In Russ.).
11. Ustinov Yu.F., Kalinin Yu.I., Ulyanov A.V., et al. Uluchshenie vibroakusticheskikh parametrov transportno-tekhnologicheskikh mashin [Improvement of vibroacoustic parameters of transport and technological machines]. *Vysokie tekhnologii v stroitel'nom komplekse = High Technologies in Construction Complex*. 2021;(1):172-176. (In Russ.).
12. Chernyshov K.V., Novikov V.V., Ryabov I.M. Optimal'noe upravlenie dempfirovaniem podveski na osnove printsipa maksimuma [Optimal control of suspension damping based on the maximum principle]. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2006;(2):13-15. (In Russ.).
13. Chaparro L.F., Akan A. Signals and Systems Using MATLAB. UK: Academic Press is an imprint of Elsevier; 2019. 820 p.
14. Du H., Sze K, Lam J. Semi-active H_{∞} control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers. *Journal of Sound and Vibration*. 2005;283(3-5):981-996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2004.05.030>.
15. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. CRC Press; 2018. 832 p.

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.

А.Н. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», kuz-basss@yandex.ru.

А.В. Лощенко – старший преподаватель кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», loshenko.av@mail.ru.

Д.Б. Болотов – магистрант агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», BDB 1998@ya.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 Peter the Great, smachin@agroeng.vsau.ru.

A.N. Kuznetsov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, kuz-basss@yandex.ru.

A.V. Loshchenko, Senior Lecturer, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, loshenko.av@mail.ru.

D.B. Bolotov, Master's Degree Student, Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, BDB 1998@ya.ru.

Статья поступила в редакцию 21.09.2021; одобрена после рецензирования 30.10.2021; принята к публикации 20.11.2021.

The article was submitted 21.09.2021; approved after revision 30.10.2021; accepted for publication 20.11.2021.

© Поливаев О.И., Кузнецов А.Н., Лощенко А.В., Болотов Д.Б., 2021