

Методология исследования системы амортизации кресла оператора мобильного энергетического средства на основе имитационной модели

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

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Улучшение условий труда оператора мобильного энергетического средства за счёт снижения вибрационного воздействия при совершенствовании конструкции и характеристик упругодемпфирующих свойств является актуальной задачей, которая на современном этапе может решаться за счёт использования систем автоматизированного моделирования для разработки имитационных моделей с достаточным уровнем детализации.

Цель — определение методологии исследования для совершенствования системы амортизации кресла оператора мобильного энергетического средства на основе имитационной модели.

Методы. В работе использовалось имитационное компьютерное моделирование и экспериментальные исследования с регистрацией динамически изменяющихся сигналов, методы сглаживания экспериментальных данных, основанные на оптимизации и оценке результатов с помощью дисперсионного анализа. Полученная системная имитационная модель сидения с серийной подвеской проверена на адекватность на основе экспериментальных данных завода-изготовителя для подсистем. Проведены экспериментальные исследования для отладки определения и предварительной обработки входных данных модели для проведения модельного эксперимента, что позволяет создавать сценарии испытаний.

Результаты. Разработанная имитационная модель, при проведении численного эксперимента на основе экспериментально полученных сценариев работы, показала хорошее качество предсказания исследуемых процессов. Это позволило сформулировать методику проведения исследований на основе рассмотренных методов.

Заключение. Предложенная методика дает возможность сократить время исследований и материальные затраты на разработку и оценку новых конструктивных решений, в том числе в области активных и полуактивных упругодемпфирующих элементов. Использование системной модели позволяет заглянуть во внутрь механизма и оценить работу отдельных элементов и подсистем. Кроме того, проведенные численные и натурные эксперименты показали, что серийная подвеска кресла оператора мобильного энергетического средства не во всех случаях справляется с задачей сглаживания ударов в вибрации, что предполагает необходимость дальнейшего развития конструкции. Одним из возможных направлений дальнейших исследований является создание модели подсистемы упругодемпфирующего устройства активного или полуактивного типа и проведение сравнительных испытаний для оценки и оптимизации конструктивных решений.

Ключевые слова: снижение вибрационного воздействия; кресло оператора; упругодемпфирующее устройство; мобильное энергетическое средство; системная имитационная модель; методика исследования.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Химченко А.В., Поливаев О.И., Болотов Д.Б., Кузнецов А.Н., Лощенко А.В. Методология исследования системы амортизации кресла оператора мобильного энергетического средства на основе имитационной модели // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 4. С. x-y. DOI: 10.17816/0321-4443-636951 EDN: NKKABK

Methodology of the Study of the Shock Absorption System of the Operator's Seat of a Mobile Power Unit Based on a Simulation Model

Arkady V. Khimchenko, Oleg I. Polivaev, Dmitry B. Bolotov, Alexey N. Kuznetsov, Alexey V. Loschenko

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Improving the working conditions of the operator of a mobile power unit by reducing vibration impact while improving the design and characteristics of elastic-damping properties is a relevant task that can be solved at the present stage by using automated modeling systems to develop simulation models with a sufficient level of detail.

AIM: Definition of research methodology for improving the shock absorption system of the operator's seat of a mobile power unit based on a simulation model.

METHODS: Computer simulation modeling and experimental studies with the registration of dynamically changing signals, methods of experimental data smoothing based on optimization and evaluation of results using dispersion analysis are used in the study. The resulting system simulation model of a seat with a series-produced suspension is validated based on the manufacturer's experimental data for subsystems. Experimental studies are conducted to debug the definition and preliminary processing of the model's input data for conducting a model experiment, which allows creating test scenarios.

RESULTS: The developed simulation model, when conducting a numerical experiment based on experimentally obtained scenarios of operation, showed good quality of prediction of the processes under study. This made it possible to formulate a methodology for conducting research based on the methods considered.

CONCLUSION: The proposed method makes it possible to reduce the time of research and material costs for the development and evaluation of new design solutions, including in the field of active and semi-active elastic-damping elements. Using a system model allows studying the mechanism and evaluating the operation of individual elements and subsystems. In addition, the numerical and full-scale experiments showed that the series-produced suspension of the operator's chair of a mobile power unit does not always cope with the task of smoothing out shocks in vibration, which suggests the need for further development of the design. One of the possible areas of further research is the creation of a model of a subsystem of an active or semi-active elastic damping device and comparative tests to evaluate and optimize design solutions.

Keywords: vibration reduction; operator's seat; elastic damping device; mobile power units; system simulation model; research methodology.

TO CITE THIS ARTICLE:

Khimchenko AV, Polivaev OI, Bolotov DB, Kuznetsov AN, Loschenko AV. Methodology of the Study of the Shock Absorption System of the Operator's Seat of a Mobile Power Unit Based on a Simulation Model. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(4):x-y. DOI: 10.17816/0321-4443-636951 EDN: NKKABK

ОБОСНОВАНИЕ

В настоящее время в тракторостроении большое внимание уделяется не только увеличению мощности мобильного энергетического средства (МЭС), а также улучшению условий работы оператора трактора. Известно, что при работе трактора, оператор подвержен большому количеству различных вредных воздействий. К данным воздействиям относятся: повышенный шум, запыленность, наличие вредных веществ в отработавших газах двигателя, повышенная вибрация и др. Совокупность данных факторов приводит к возникновению профессиональных заболеваний. В связи с этим, необходимо улучшать условия труда оператора мобильного энергетического средства [1–3].

Одним из наиболее вредных факторов является вибрация, возникающая от двигателя или при движении по профилю дороги и передаваемая на оператора. Для снижения данной вибрации используются различные уровни демпфирования колебаний, однако наиболее эффективным считается использование поддрессорования кресла оператора МЭС [4, 5]. При исследовании системы подвески кресла механизатора, используют методы теоретического и экспериментального исследования. Как правило, с помощью экспериментальных исследований подтверждают полученный эффект или проверяют работоспособность и адекватность математической модели, выполняют её калибровку или идентификацию [6–10]. При использовании математических методов в теоретических исследованиях часто возникает вопрос трудоёмкости решения, потому количество уравнений в модели стараются сократить. Кроме того, при описании системы большим количеством уравнений, среди которых неизбежно будут уравнения в дифференциальной форме, нужный результат получится только при наличии правильных начальных условий. Задать их корректно для вполне определенного интересующего процесса не всегда возможно. Могут возникать сложности и при объединении моделей, описывающих разные физические процессы.

Одним из аспектов, препятствующих широкому применению расчетных теоретических методов, является сложность глубокой детализации моделей. Но с экспериментальными исследованиями далеко не все показатели, характеризующие рабочий процесс исследуемого объекта, возможно измерить и соответственно проанализировать. Одним из путей решения данной проблемы является создание при помощи систем автоматизированного моделирования имитационной модели, с глубокой проработкой интересующих элементов. Исследование такой модели позволяет отследить интересующие параметры, в частности подвески сиденья, провести её испытания и выявить какие факторы и элементы оказывают более существенное воздействие при гашении колебаний, тем самым позволяя эффективно совершенствовать систему амортизации кресла оператора МЭС [11].

Другой проблемой при исследовании новых конструкций, в том числе, подвесок сидений оператора МЭС, является невозможность определения рабочих параметров и поведения элементов конструкции в динамически изменяющейся среде без проведения экспериментальных исследований. Последнее может быть достаточно затратно как с материальной, так и временной точки зрения.

Применение имитационной модели, позволяет создать интересующий уровень детализации и получить возможность изменения и оптимизации конструкции узла на основе численных экспериментов.

Поэтому имитационное моделирование может быть основой методики дальнейших исследований, направленных на совершенствование системы амортизации кресла оператора МЭС.

ЦЕЛЬ

В связи с вышесказанным *целью работы* является определение методологии исследования для совершенствования системы амортизации кресла оператора мобильного энергетического средства на основе имитационной модели.

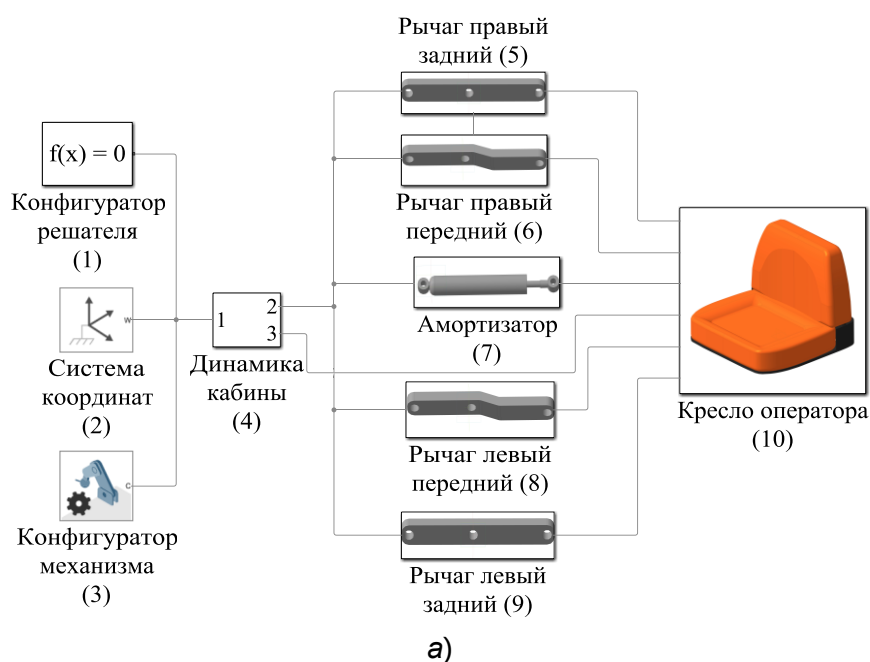
МЕТОДЫ

Для разработки методологии исследования в настоящей работе использовалось имитационное компьютерное моделирование и экспериментальные исследования с регистрацией динамически изменяющихся сигналов, а также методы сглаживания экспериментальных данных, основанные на оптимизации и оценке результатов с помощью дисперсионного анализа.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИДЕНИЯ

Анализ существующих систем автоматизированного моделирования позволяет сделать вывод, что для стоящих задач нужна система невысокого уровня, позволяющая моделировать процессы в элементарных механических устройствах. К таким относятся Matlab Simulink, SimInTech, Engee. Выбор был остановлен на системе автоматизированного моделирования Simulink, так как, во-первых, Matlab и Simulink представляют собой комплексное решение, позволяющее не только разрабатывать системные модели, но и проводить комплексы испытаний в автоматическом режиме с регистрацией данных, с возможностью дальнейшей обработки и анализа. Во-вторых, авторы имеют некоторый опыт работы в данной системе, что существенно сокращает время получения конечного результата.

В связи с этим была разработана имитационная модель, которая представляет собой системную модель, выполненную в графическом виде в среде Simulink (рис. 1) [12]. Модель подвески сиденья оператора трактора включает в себя несколько подсистем, представляющих: модели 4 рычагов подвески сиденья, соединённых по кинематической схеме ножничного подъёмника; демпфирующего элемента, представляющий однотрубный амортизатор со свободно перемещающимся газовым поршнем; кресла оператора трактора, а также платформы, имитирующей пол кабины трактора. В модели учитывался вес оператора, приходящийся на сиденье.



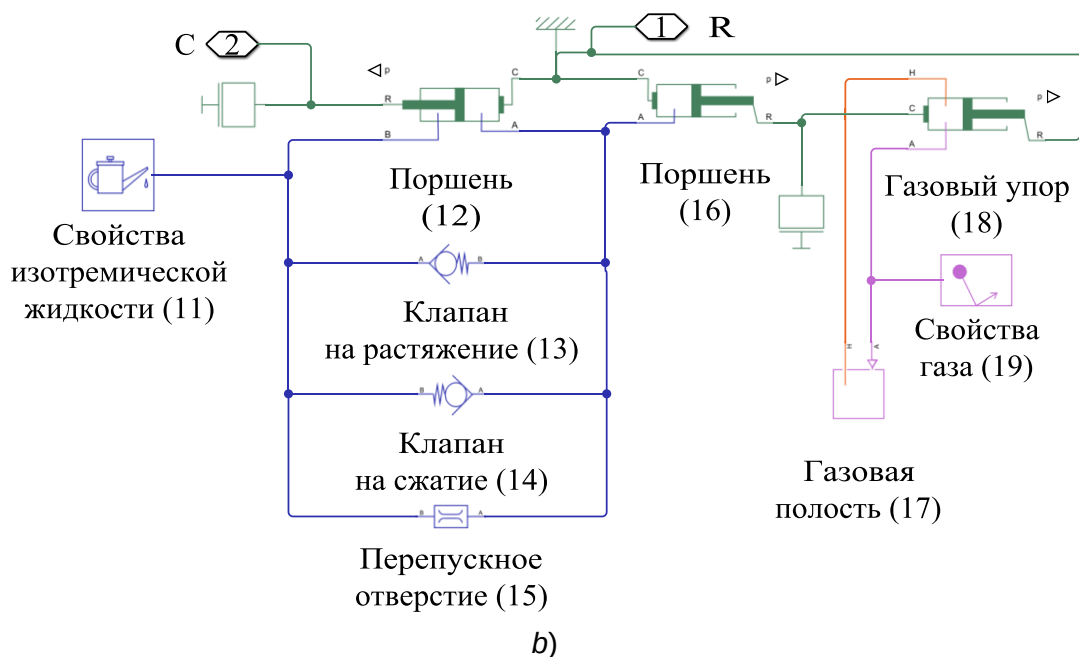


Рис. 1. Имитационная модель кресла оператора трактора Беларус 1221: а — общая модель системы; б — подсистема гидравлической модели амортизатора сиденья.

Fig. 1. Simulation model of the operator's seat of the Belarus 1221 tractor: a, general model of the system; b, subsystem of the hydraulic model of the seat's shock absorber; 1, solver configurator; 2, reference frame; 3, mechanism configurator; 4, cabin dynamics; 5, right rear lever; 6, right front lever; 7, shock absorber; 8, left front lever; 9, left rear lever; 10, operator's seat; 11, properties of isothermic fluid; 12, piston; 13, extension valve; 14, compression valve; 15, bypass hole; 16, piston; 17, gas stop; 18, gas properties; 19, gas cavity.

Выводы о эффективности принятых решений могут быть получены только в результате сравнения новой конструкции с базовой. Поэтому подсистема демпфирующего устройства представляет собой схему однострубного гидропневматического амортизатора двустороннего действия, соответствующую серийному варианту. В подмодели были учтены геометрические параметры существующей конструкции: рабочий диаметр поршня в каждой из камер, объём жидкости, объём газа, а также его предварительное давление, ход поршня и другие. При этом в качестве рабочей жидкости использовалось гидравлическое масло. В качестве газа, которым заполнена газовая часть амортизатора подвески сиденья, выступает технический азот [13].

Подсистемы рычагов подвески механизма подрессоривания кресла оператора трактора выполнены попарно (два передних и два задних). Вне зависимости от места расположения рычагов математическая подмодель данных узлов представляет собой кинематическую схему ножничного соединения с тремя шарнирами вращения и двумя, позволяющими вращение и поступательное движение вдоль пола и кресла оператора, в которой учтены массогабаритные параметры.

Подсистема кресла оператора трактора включает в себя основные элементы данного узла, а именно спинка, сиденье и корпус, которые соединены в единый элемент, а также учтен вес оператора, который приложен к сиденью.

Адекватность работы имитационной модели амортизатора была обеспечена сравнением результатов численных экспериментов по поведению амортизатора в известных условиях и при известных его характеристиках. Модель проверялась при работе в статическом состоянии, а также при сжатии и растяжении. Фактически параметры работы модели амортизатора сравнивались с техническими данными завода изготовителя. Для этого имитировалось постоянная скорость движения штока 0,4 м/с и определялось усилие при растяжении и сжатии демпфирующего устройства, которое по данным завода-изготовителя должно иметь значения $800 \text{ Н} \pm 100 \text{ Н}$ при растяжении и $900 \text{ Н} \pm 100 \text{ Н}$ при сжатии. Кроме того, определялось усилие на штоке при его неподвижном состоянии. В середине хода штока выталкивающее усилие по данным завода-изготовителя $230 \text{ Н} \pm 40 \text{ Н}$. Значения при моделировании находились в пределах, определённых заводом-

THEORY, DESIGN, TESTING

изготовителем. Жёсткость торсионной пружины, устанавливаемой для гашения колебаний подвески сиденья оператора, замерялась экспериментально и данное значение заносилось в модель.

При этом в имитационной модели кресло оператора МЭС установлено на подвижной платформе, которая может перемещаться в соответствии с заданным сигналом, который включает в себя перемещения, виброскорости и виброускорения на полу кабины или в любой точке силового каркаса трактора (рис. 2).

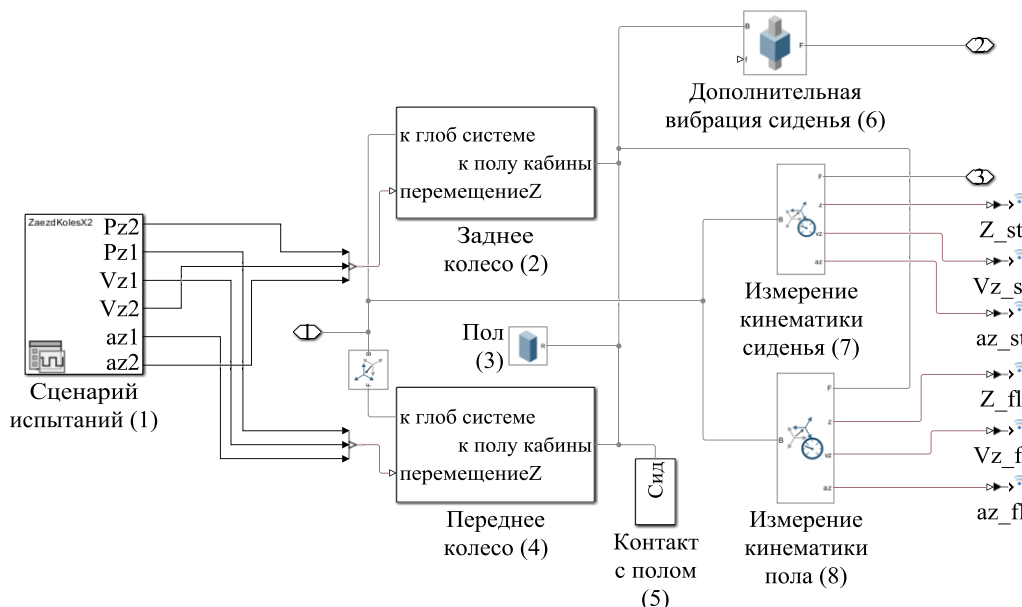


Рис. 2. Подсистема модели, задающая динамику кабины трактора.

Fig. 2. A model subsystem that defines the dynamics of a tractor cabin: 1, test scenario; 2, rear wheel; 3, floor; 4, front wheel; 5, contact with the floor; 6, additional seat vibration; 7, measurement of seat kinematics; 8, measurement of floor kinematics.

На полученной модели возможно проведение испытаний и анализ поведения кресла в разных условиях, которые задаются сигналами, описывающими кинематику ключевых точек силового каркаса. На рис. 2 показаны 2 подсистемы с шарнирами, задающие движение каркаса трактора. На вход подаются зависимости перемещения этих точек от времени. Для качественного моделирования, кроме перемещения должны быть заданы 1 и 2-я производные, т.е. скорость и ускорение.

Такие данные с минимальными затратами и с высокой достоверностью могут быть получены в ходе экспериментальных исследований. Это позволит определить сценарий испытаний.

Полученная модель позволяет не только проводить испытания работы кресла МЭС, определять характер перемещений оператора, характер зависимостей изменения параметров демфирующего устройства, но и, при необходимости, производить замену отдельных подсистем и сравнивать работу нескольких вариантов подвесок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЦЕНАРИЯ ИСПЫТАНИЙ РАБОТЫ КРЕСЛА

Для создания сценария симуляции движения тракторно-транспортного агрегата по неровностям был проведен эксперимент, в котором производили замеры уровней колебаний в определённых точках трактора при проезде единичной неровности. В качестве датчиков для замера виброускорений были выбраны тензометрические акселерометры АТ-1 (рис. 3). Данный прибор позволяет производить замеры ускорений в диапазоне ускорений от $-2g$ до $+2g$. Принцип работы датчика заключается в определении тензодатчиками деформации упругой балки, на которой закреплен груз вызывающий её прогиб, возникающий при воздействии ускорений.

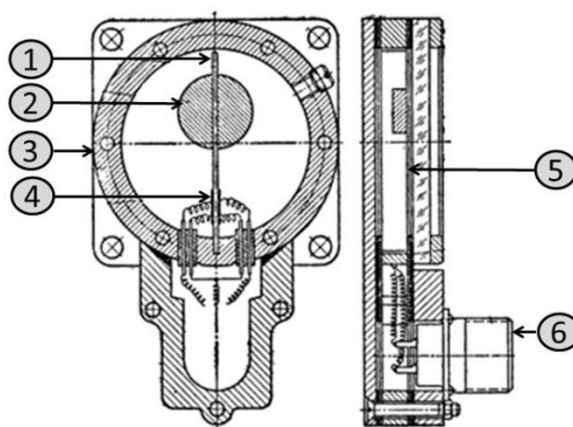


Рис. 3. Тензометрический акселерометр АТ-1: 1 — балка; 2 — груз; 3 — корпус; 4 — тензодатчик; 5 — прокладка; 6 — разъём.

Fig. 3. The AT-1 strain gauge accelerometer: 1, beam; 2, load; 3, housing; 4, strain gauge; 5, gasket; 6, connector.

Тензометрические датчики были установлены на переднем и заднем мостах трактора, а также в центре масс (рис. 4). Места установки датчиков выбирались, исходя из удобства и повышения точности измерения. В районе переднего и заднего мостов наблюдаются близкие к максимальным перемещения и ускорения. Эта схема соответствует параметрам подсистемы, представленным на рис. 2. В модели в точках установки датчиков предусмотрены шарниры, позволяющие задавать вертикальные перемещения остова трактора.

Информация с данных датчиков при движении трактора по контрольному участку, была записана с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) Lcard.

После обработки сигналы подавались в виде входящего сигнала на платформу кресла оператора МЭС с целью имитации колебания пола.

Особенность регистрации сигналов с помощью АЦП заключается в их дискретности. Поэтому для моделирования они должны быть сглажены.

Эта первоначальная обработка заключалась в применении сглаживающего сплайна из пакета Curve Fitting Toolbox. Этот метод, на наш взгляд, наиболее предпочтителен. В силу того, что нет необходимости иметь функцию, описывающую колебания, регрессионный анализ представляется лишним, хотя на основе ряда Фурье или функции, определённой как сумма синусов, и может неплохо описать данные. Интерполяционные функции имеют коэффициент детерминации $R^2=1$ и проходят через все точки. Это неприменимо, т.к. данные должны быть сглажены. В противном случае могут возникать слишком высокие значения производных, что определяется методическими ошибками, а не характером изменения физической величины. Сглаживающий сплайн является также кусочно-заданной функцией, но позволяет задавать коэффициент сглаживания.

Модель, описанная выше, при имитации в начальный момент времени находится в положении с полностью сжатым амортизатором. Поэтому в течение первой секунды она принимает рабочее положение и программу испытаний следует начинать с задержкой, например, после 2 с моделирования. Для этого в экспериментальные необходимо добавить точки, соответствующие отсутствию перемещений колес в первые 2 с.

Для создания входных данных и моделирования сценария проезда трактора через единичную неровность в виде сектора цилиндра типа лежащего полицейского высотой 0,2 м с воздействием попарно на передние и задние колёса, был проведён эксперимент при скорости движения тракторно-транспортного агрегата 10 км/ч.

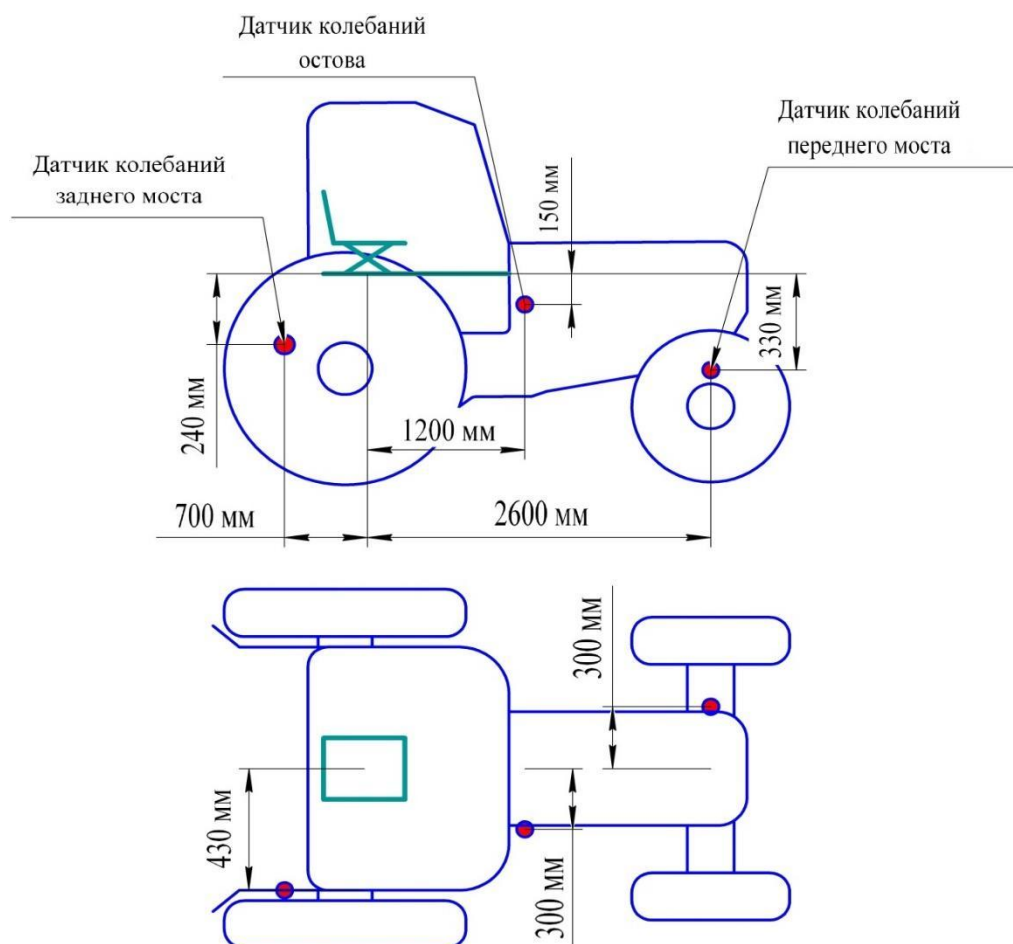


Рис. 4. Схема установки датчиков виброускорения на тракторе.

Fig. 4. Installation diagram of vibration acceleration sensors installation on a tractor.

Результаты данного эксперимента, а именно скорость, ускорение и величина перемещения колёс трактора представлены на рис. 5 и 6. Дальнейшие приведенные примеры и результаты соответствуют выбранному сценарию движения.

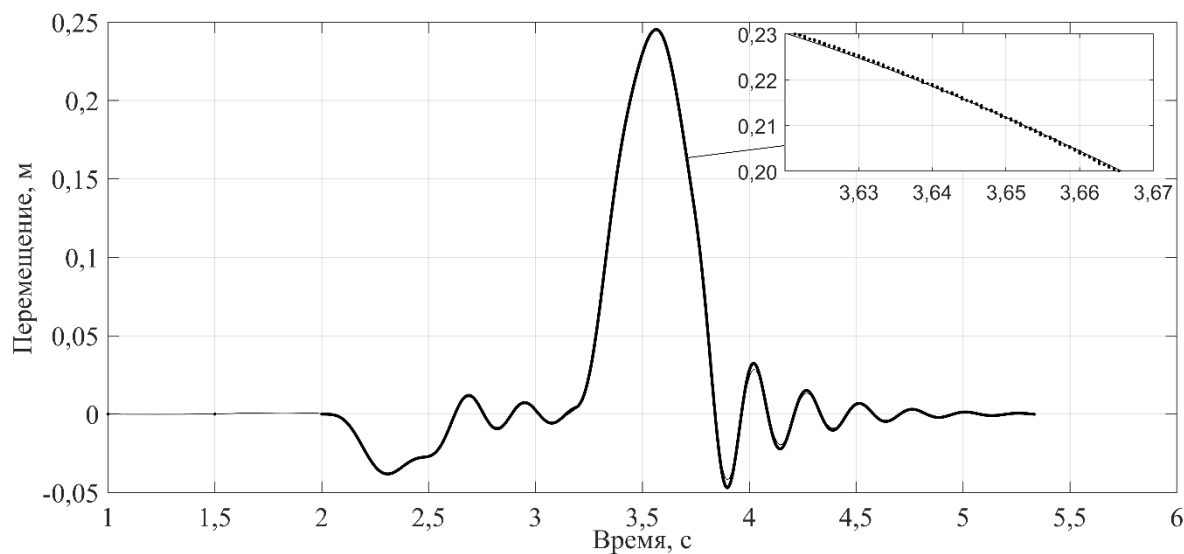


Рис. 5. Перемещение заднего колеса трактора при проезде единичной неровности: дискретный сигнал, ———— сглаженный сигнал.

Fig. 5. Moving of the rear wheel of a tractor when driving over a single unevenness: discrete signal, ———— smoothed signal.

Попытка применения необработанных данных привела к наличию не корректных значений скоростей и ускорений, что связано с дискретностью и погрешностями

измерений. Для решения этой проблемы выполнялась предобработка сигналов.

На рис. 5, для примера, показаны графики дискретных данных и результат сглаживания с коэффициентом 0,999 для вертикального перемещения заднего колеса. Полученная сглаживающая функция имеет следующие статистические величины: сумма квадратов отклонений — $0,0145 \text{ м}^2$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,9997$, число степеней свободы $d_f = 9950$, скорректированный коэффициент детерминации $R_{кор}^2 = 0,9997$, среднее квадратичное отклонение $r_{mse} = 0,0012 \text{ м}^2$. Последнее означает, что средняя ошибка вертикального перемещения колеса составляет 1,2 мм.

После выполнения предобработки некорректные значения скоростей и ускорений, характерных для дискретных данных, при моделировании не наблюдались.

Полученная функция позволяет создать набор данных для численных экспериментов, в том числе значения первой и второй производных перемещения мест установки датчиков. Эти данные представляют собой сценарий для проведения испытаний в численном эксперименте (рис. 6).

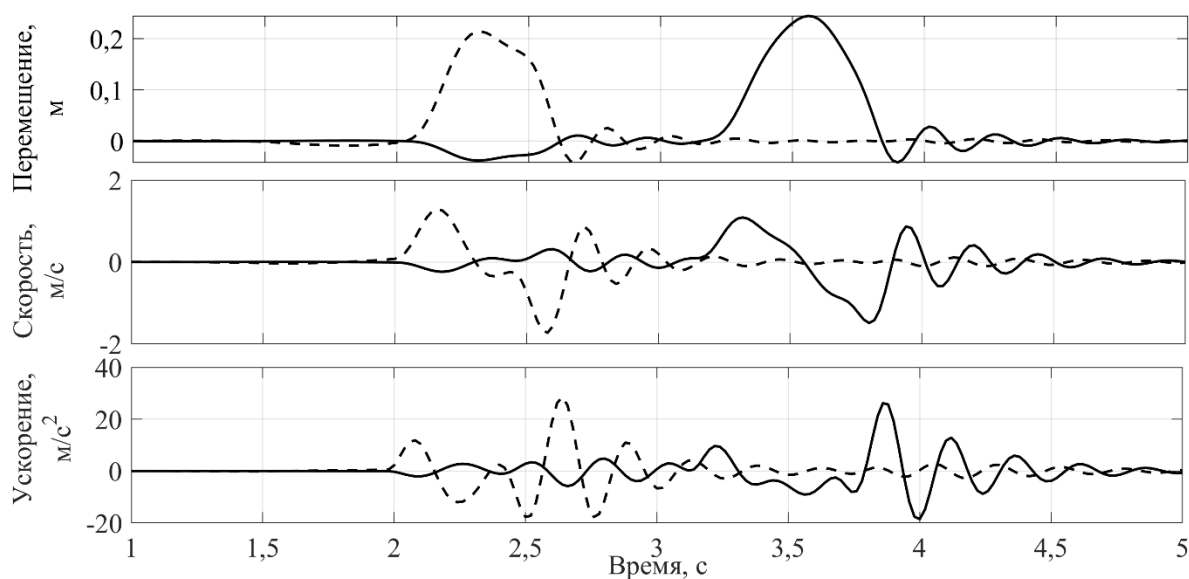


Рис. 6. Параметры, определяющие сценарий испытаний при проезде единичной неровности в численном эксперименте: - - - передний, — задний.

Fig. 6. Parameters defining the test scenario when driving over a single unevenness in a numerical experiment: - - - front, — rear.

Использование в имитационной модели платформы, колебания которой имитируют колебания, возникающие при движении трактора по неровностям дорожного профиля, позволяет провести численные эксперименты по проезду трактором любых неровностей, а приведенная методика экспериментальных исследований и обработки результатов позволяет с помощью не сложных экспериментов получить данные для широкого спектра испытаний на имитационной модели.

Таким образом, теоретические исследования работы подвески сиденья оператора трактора, а также совершенствование её конструкции можно проводить на численных экспериментах по заранее созданному сценарию. Необходимые данные для сценария могут быть получены из вышеописанного эксперимента.

В данной работе с учётом ограниченного объёма, воздержимся от анализа и описания методики обработки результатов численного эксперимента, а рассмотрим некоторые из этих результатов в первоначальном виде.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим результаты численного эксперимента, полученные при движении тракторно-транспортного агрегата со скоростью 10 км/ч.

Моделирование позволило определить уровень ускорений и скорости вертикального

перемещения сиденья и пола кабины мобильного энергетического средства (рис. 7). Данные параметры являются основными при определении уровня вибронагруженности оператора трактора.

Видно, что в определенный момент на сидении присутствует всплеск ускорения. Это соответствует пробою подвески сидения, что в действительности и наблюдалось в натурном эксперименте при поезде неровности задними колесами. При прекращении воздействия подвеска сидения незначительно, но снижает колебания, которые передаются на пол от колёс трактора.

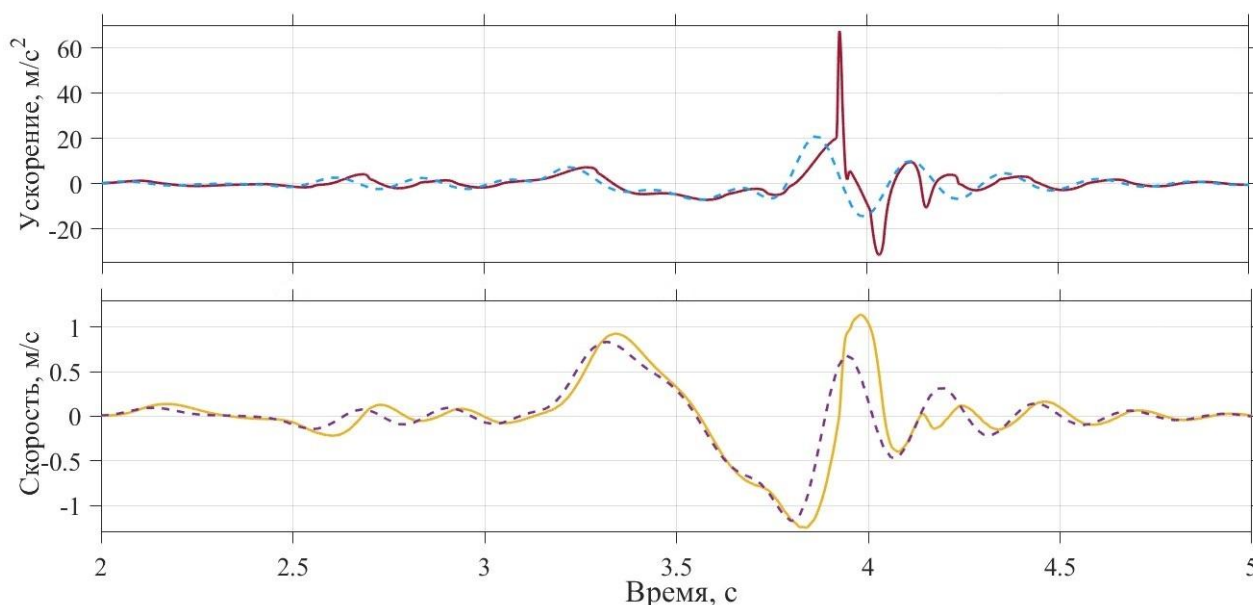


Рис. 7. Ускорение и скорость перемещения сиденья и пола кабины: --- пол кабины, — сиденье.

Fig. 7. Motion acceleration and velocity of the seat and cabin floor: --- cabin floor, — seat.

Особенностью выбранной методики является возможность оценить процессы в подсистемах, например изменение давления в полостях амортизатора, расходы через клапаны и дроссельные отверстия и т.д. Такие параметры получить при натурном эксперименте измерениями достаточно сложно или вовсе невозможно. В качестве примера на рис. 8 приведены графики изменения давления жидкости в подпоршневой и надпоршневой полостях, а также газовой полости амортизатора подвески сиденья.

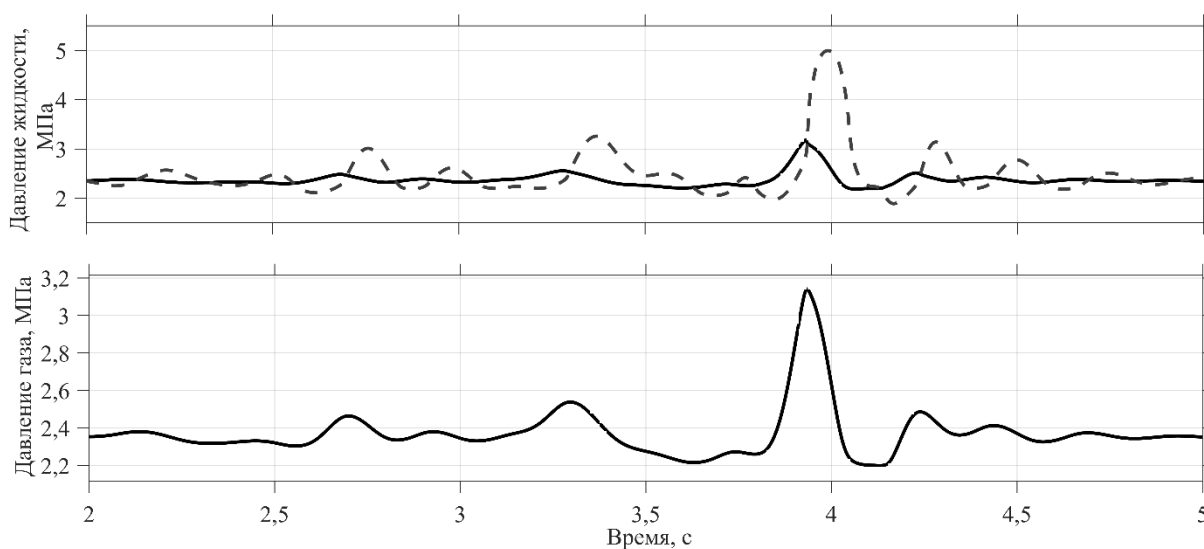


Рис. 8. Изменение давления жидкости и газа в амортизаторе: --- штоковая полость, — поршневая полость.

Fig. 8. Change in liquid and gas pressure in the shock absorber: --- rod cavity, — piston cavity.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из представленных выше графиков (см. рис. 7), можно сделать вывод, что серийная подвеска позволяет снизить уровень вибронегруженности на оператора МЭС, хотя и присутствует резкое увеличение ускорения сиденья оператора трактора на 4-й секунде эксперимента, которое объясняется пробоем подвески о резиновый упор. В данном эксперименте нет режимов, на которых амортизатор не справляется с задачей гашения свободных колебаний.

Однако, в данной статье приведены некоторые результаты испытания только для сиденья с серийной подвеской. При разработке принципиально новой конструкции планируется создание модели иного упругодемпфирующего элемента подвески. Замена соответствующих подсистем моделей и проведение сравнительных испытаний.

Учитывая, что эффективность работы подвески сиденья трактора является различной, при различной скорости движения мобильного энергетического средства, могут понадобиться искусственно сгенерированные режимы колебаний пола кабины. В таком случае использование в исследованиях, направленных на изучение уровня вибронегруженности кресла оператора трактора, разработанной имитационной модели выглядит еще более перспективным.

Учитывая результаты проведенных натурных и численных экспериментов, можно утверждать, что описанная методология позволит получить необходимый результат при проведении исследований по совершенствованию конструкции подвески сиденья оператора МЭС. Предлагаемая методика исследования состоит из следующих этапов:

- создание имитационной модели подвески кресла оператора;
- проверка адекватности отдельных подсистем модели на основе натурального эксперимента;
- определение воздействий на пол кабины мобильного энергетического средства на основе натурального эксперимента с тракторно-транспортным агрегатом;
- сглаживание экспериментальных дискретных данных;
- проведение численного эксперимента для оценки поведения подвески кресла в интересующих условиях;
- разработка модели нового конструктивного решения для упругодемпфирующего элемента подвески;
- проведение сравнительных испытаний с помощью численного эксперимента.

В итоге на основе результатов сравнительных испытаний могут приниматься решения о внесении изменений в конструкцию, а полученные модели могут быть использованы для разработки системы управления активной и полупассивной подвесок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований системы амортизации кресла оператора мобильного энергетического средства было установлено, что существующие серийные подвески не всегда эффективно справляются со сглаживанием вибрационных и ударных нагрузок, что подтверждается как натурными, так и численными экспериментами. Это указывает на необходимость дальнейшего совершенствования конструктивных решений, особенно в области активных и полупассивных демпфирующих систем. Ключевой нерешенной проблемой остаётся отсутствие доступных и точных методов прогнозирования динамики сложных упругодемпфирующих систем без проведения дорогостоящих натурных испытаний, а также недостаточная изученность поведения таких систем в условиях реальной эксплуатации.

В данной работе была разработана и верифицирована системная имитационная модель подвески кресла оператора, позволяющая с высокой точностью прогнозировать её поведение при различных сценариях нагрузки. Модель была реализована в среде Simulink и включает детализированные подсистемы рычагов, амортизатора и кресла с учётом реальных параметров. Отлажена методика использования экспериментальных данных в численных экспериментах и проведена их предобработка с использованием сглаживающих сплайнов, что позволило избежать некорректных режимов и результатов, связанных с дискретностью измерений. Численные эксперименты показали, что модель адекватно отражает динамику системы, включая критические режимы, такие как пробой

THEORY, DESIGN, TESTING

подвески. Это даёт возможность анализировать внутренние процессы (например, изменение давлений в полостях амортизатора), которые сложно или невозможно измерить экспериментально.

Проведённая работа позволила определить методы и приёмы, необходимые для проведения исследования, и порядок их применения. Предложенная методика даёт возможность сократить время исследований и материальные затраты на разработку и оценку новых конструктивных решений, в том числе в области активных и полупассивных упругодемпфирующих элементов.

В дальнейших исследованиях планируется создание модели подсистемы упругодемпфирующего устройства активного или полупассивного типа на основе полученной системной модели и проведение сравнительных численных экспериментов для оценки и оптимизации конструктивных решений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Вклад распределён следующим образом: А.В. Химченко — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, создание и отладка имитационной модели, проведение численных экспериментов и анализ численных результатов, подготовка и редактирование статьи; О.И. Поливаев — сбор и анализ литературных источников, анализ численных результатов, редактирование статьи; Д.В. Болотов — сбор литературных источников, создание и отладка имитационной модели, проведение численных экспериментов и написание текста статьи; А.Н. Кузнецов — подготовка оборудования, проведение натурных экспериментов и первичная обработка результатов; А.В. Лощенко — подготовка оборудования, проведение натурных экспериментов и редактирование статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: A.V. Khimchenko: literature review, collection and analysis of literary sources, creation and debugging of a simulation model, conducting numerical experiments and analyzing numerical results, preparing and editing the manuscript; O.I. Polivaev: collection and analysis of literary sources, analysis of numerical results, editing the article; D.V. Bolotov: collection of literary sources, creation and debugging of a simulation model, conducting numerical experiments and writing the manuscript; A.N. Kuznetsov: preparation of equipment, conducting full-scale experiments and primary processing of results; A.V. Loshchenko: preparation of equipment, conducting full-scale experiments and editing the manuscript. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Godjaev ZA, Lyashenko MV, Shekhovtsev VV, et al. Vibration loading of the operator's workplace and vibration-protective properties of seat suspensions. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2021;15(1):2–11. doi: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-2-11 (In Russ.) EDN: TXILGU
2. Zelenko NG, Malayan KR, Rusak ON. *Life Safety: textbook for universities*. Saint Petersburg: Lan; 2012.
3. Ustinov YuF, Kalinin YuI, Ulyanov AV, et al. Improving vibroacoustic parameters of transport and technological machines. *High technologies in the construction complex*. 2021(1):172–176. (In Russ.) EDN: IBFSRY.
4. Voloshin YuV. Application of suspension systems in foreign tractors. *Tractors and agricultural machinery*. 2000;(2):36–37.
5. Loshchenko AV. *Improving the seat suspension of an agricultural wheeled tractor* [dissertation] Voronezh; 2022. (In Russ.) EDN: UZEBYE
6. Abraham MT, Satyam N, Pradhan B, Tian H. Debris flow simulation 2D (DFS 2D): Numerical modelling of debris flows and calibration of friction parameters. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(6):1747–1760. doi: 10.1016/j.jrmge.2022.01.004
7. Guan J, Liu J, Duan X, et al. Effect of the novel continuous variable compression ratio (CVCR) configuration coupled with spark assisted induced ignition (SAII) combustion mode on the performance behavior of the spark ignition engine. *Applied Thermal Engineering*. 2021;197:117410. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117410
8. Kass RE, Dennis JE, Schnabel RB. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. *Journal of the American Statistical Association*. 1985;80(389):247. doi: 10.2307/2288097
9. Ljung L. *Modeling of dynamic systems*. New Jersey: PTR Prentice Hall; 1994. doi: 10.1016/0967-0661(95)90022-5
10. Sjöberg J, Zhang Q, Ljung L, et al. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview. *Automatica*. 1995;31(12):1691–1724. doi: 10.1016/0005-1098(95)00120-8
11. Polivaev OI, Afonichev DN, Pilyaev SN, et al. Simulation model of vertical oscillations of the tractor operator's seat in the SiminTech software package. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(4):79–87. doi 10.17238/issn2071-2243.2020.4.79 (In Russ.) EDN: LFGMBR.
12. Certificate of state registration of computer program RUS No. 2024619829 / 27.04.2024. Khimchenko AV, Bolotov DB, Polivaev OI. *Simulation model for testing the shock absorber of the suspension of the vehicle operator's seat*. (In Russ.) EDN: VMRVYA
13. Certificate of state registration of computer program RUS No. 2024681543 / 11.09.2024. Khimchenko AV, Bolotov DB, Polivaev OI. *Program for optimizing the elastic-damping properties of a tractor operator's seat*. (In Russ.) EDN: AMGHAX

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* **Химченко Аркадий Васильевич**,
канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей;
адрес: Россия, 394087, Воронеж, ул.
Мичурина, д. 1;

* **Arkady V. Khimchenko**,
Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Agricultural Machines,
Tractors and Automobiles Department;
address: 1 Michurina st, Voronezh, Russia, 394087;
ORCID: 0000-0002-9340-4252;

THEORY, DESIGN, TESTING

ORCID: 0000-0002-9340-4252;
eLibrary SPIN: 4568-1757;
e-mail: himch.arkady@yandex.ru
Соавторы:

Поливаев Олег Иванович,

д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей;
ORCID: 0000-0002-3610-6339;
eLibrary SPIN: 1423-0193;
e-mail: polivaevoi@icloud.com

Болотов Дмитрий Борисович,

ассистент кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей;
ORCID: 0000-0002-3925-1419;
eLibrary SPIN: 6368-0059;
e-mail: BDB1998@ya.ru

Кузнецов Алексей Николаевич,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей;
ORCID: 0009-0001-9065-2971;
eLibrary SPIN: 1035-3981;
e-mail: kuz-basss@yandex.ru

Лощенко Алексей Владиславович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры сельскохозяйственных
машин, тракторов и автомобилей;
ORCID: 0009-0008-7616-4198;
eLibrary SPIN: 7983-1059;
e-mail: Loshenko.av@mail.ru

eLibrary SPIN: 4568-1757;
e-mail: himch.arkady@yandex.ru

Co-Authors:

Oleg I. Polivaev,

Dr. Sci. (Engineering), professor,
Professor of the Agricultural Machines, Tractors
and Automobiles Department;
ORCID: 0000-0002-3610-6339;
eLibrary SPIN: 1423-0193;
e-mail: polivaevoi@icloud.com

Dmitry B. Bolotov,

Assistant lecturer of the Agricultural Machines,
Tractors and Automobiles Department;
ORCID: 0000-0002-3925-1419;
eLibrary SPIN: 6368-0059;
e-mail: BDB1998@ya.ru

Aleksey N. Kuznetsov,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Agricultural Machines,
Tractors and Automobiles Department;
ORCID: 0009-0001-9065-2971;
eLibrary SPIN: 1035-3981;
e-mail: kuz-basss@yandex.ru

Alexey V. Loshenko,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Agricultural Machines,
Tractors and Automobiles Department;
ORCID: 0009-0008-7616-4198;
eLibrary SPIN: 7983-1059;
e-mail: Loshenko.av@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author