

И. А. Заковьрин¹, С. П. Круглов¹

¹ *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аннотация: Представлено решение по созданию установки-макета автомобильной подвески «четверть автомобиля» для задач исследования алгоритмов управления магнитоэологическим демпфером подвески (полуактивной системой управления подвеской). На основе анализа ряда работ, приводится краткое описание принципа работы стендов для испытания подвески транспортного средства. В соответствии с целевой задачей предлагается построить установку на основе электромеханического принципа возбуждения с кривошипно-шатунным механизмом. Для простоты и доступности ее изготовления размеры установки предполагают настольное исполнение. Параметры установки приближены к параметрам подвески типового автомобиля. Также рассматриваются дополнительные вопросы создания аппаратной части установки. Все это позволит исследовать различные алгоритмы управления подвески с амортизатором с магнитоэологической жидкостью, включая адаптивные методы управления.

Ключевые слова: управляемая подвеска, полуактивная система управления подвеской, магнитоэологическая жидкость, вибростенд.

I. A. Zakovyryn¹, S. P. Kruglov¹

¹ *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation*

INSTALLATION FOR RESEARCHING THE ADAPTIVE CONTROL OF THE SUSPENSION OF THE VEHICLE.

Abstract: A solution is presented for creating an installation-model of a car suspension "quarter of a car" for the study of algorithms for controlling the magnetorheological suspension damper (semi-active suspension control system). Based on the analysis of a number of works, a brief description of the principle of operation of the stands for testing the vehicle suspension is given. In accordance with the set target task, it is proposed to build an installation based on the electromechanical principle of excitation with a crank mechanism. For simplicity and accessibility of its production, the installation dimensions assume a desktop version. The installation parameters are close to the suspension parameters of a typical car. Additional issues of creating the hardware part of the installation are also considered. All this will allow us to explore various control algorithms for suspension with shock absorbers with magnetorheological fluid, including adaptive control methods.

Keywords: controlled suspension, semi-active suspension control system, magnetorheological fluid, vibration stand.

Введение. К недостаткам существующих пассивных систем поддресоривания автомобиля можно отнести их неспособность обеспечивать качественные показатели для текущих дорожных условий и режимов движения из-за того, что их характеристики рассчитываются по усредненным показателям. Для решения этой проблемы были разработаны управляемые подвески с возможностью изменения параметров, а также множество различных систем управления этими подвесками. Однако для того, чтобы на этапе разработки, оценить эффективность работы, как неуправляемых, так и управляемых подвесок, необходимо проверить их свойства не только на компьютерной модели, но и на

практике. Для этих целей идеально подходят испытательные стенды. В этой статье на основе анализа ряда работ, приводится краткая классификация и описание принципа работы вибростендов, а также их преимущества и недостатки. Во второй части работы рассматривается процесс создания установки, на которой возможно исследовать различные алгоритмы управления адаптивной подвески с амортизатором с магнитоэологической жидкостью. Данная работа является продолжением [1] и [2].

Общая классификация вибростендов

Для исследования поведения подвески используют различные стенды, такие как, электромеханические вибростенды с кулачковыми механизмами [3], электродинамические стенды [4], а также стенды с пневматическим или гидравлическим [5] приводом.

Электромеханические стенды являются низкочастотными (от 8 до 90 Гц), так как их частота ограничена прочностью звеньев передаточного механизма, а также наличием в механизме своих резонансных частот. К основным достоинствам можно отнести относительно высокую грузоподъемность, возможность изготовления широкого рабочего стола. К недостаткам – невозможность генерации случайного входного воздействия. Возможно лишь динамически менять частоту, во время цикла колебаний. Как правило, именно такой тип наиболее распространен среди испытательных стендов. Используется при исследовании, разработки и ремонте автомобильной подвески.

Типовая схема построения электромеханического стенда схематично изображена на рисунке 1.

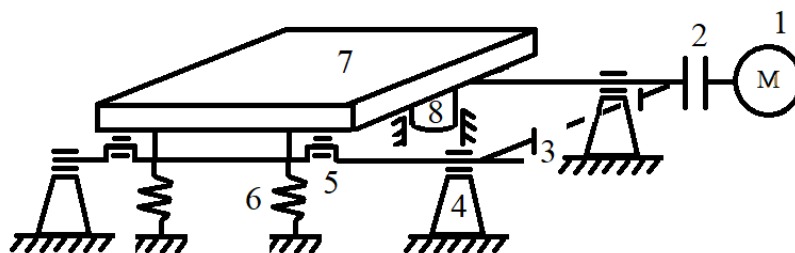


Рис. 1. Кулачковый электромеханический стенд.

На рисунке обозначено: 1 – электродвигатель, 2 – муфта, 3 – ременная передача, распределяющая момент между валами, 4 – подшипниковая опора вала, 5 – кулачок, 6 – пружина, 7 – рабочая платформа, 8 – линейная направляющая опора.

Электродинамический стенд – работает по принципу динамика. Конструкцию условно можно разделить на подвижную и неподвижную части. Стенд изображен на рис. 2. Здесь 1 – это постоянный магнит, 2 – магнитопровод, 3 – катушка, намотанная на подвижный сердечник, 4 – подвижная часть с рабочей поверхностью, 5 – подвес.

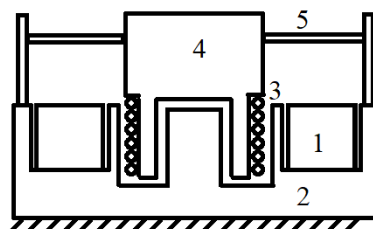


Рис. 2. Электродинамический стенд

Такая система способна генерировать широкий спектр частот (до 10 000 Гц), сигналы практически любой формы. Из недостатков – относительно небольшой вес испытуемого изделия. Такие стенды используются как правило для испытаний отдельных от остальной

конструкции транспортного средства частей подвески, например, одного из амортизаторов [4].

Пневматические, сервогидравлические стенды. В качестве рабочей части здесь выступает шток гидро- или пневмоцилиндра. Способны выдавать диапазон частот колебаний от 0 до 150 Гц. Имеют различную, аппаратную часть. Применяются при исследовании состояния подвески при ремонте, а также при имитации профиля дорожного полотна в [5].

Создание стенда для исследования адаптивного алгоритма управления подвеской транспортного средства

Главной задачей установки является исследование по [2] адаптивного управления на основе идентификационного алгоритма. Технические требования, предъявляемые к проектируемому стенду, – возможность исследования поведения амортизатора на основных окolorезонансных частотах (определяются в зависимости от собственной частоты системы). Для типового автомобиля, соответствующего стандарту [6], это 4...13 рад/с). Для этих задач было принято решение собрать макет, который бы описывал поведение одномассовой одноопорной подвески «четверть автомобиля» с возбуждением подвески гармоническими колебаниями. То есть исследовать свойства амортизатора, управляемого описанным выше алгоритмом, в плане снижения амплитуды колебаний и ускорений подрессоренной массы, а также отрыва колеса от опоры (см. рис.3). В силу только исследовательской направленности указанного макета, а также для упрощения изготовления, решено было сделать его относительно миниатюрным с «настольным» исполнением.

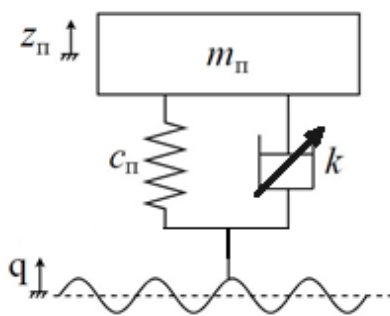


Рис. 3. Схема одномассовой одноопорной подвески «четверть автомобиля» с изменяемым коэффициентом демпфирования

На рис.3 обозначено: $m_п$ – масса автомобиля, присоединенная к одному колесу (подрессоренная масса); $z_п$ – линейные перемещения подрессоренной массы; $c_п$ – коэффициент жесткости пружины амортизатора; k – коэффициент демпфирования амортизатора; q – гармонические входные колебания.

По источнику возникновения колебаний рабочей поверхности (имитация неровностей дороги) стенд является электромеханическим. В классических электромеханических вибростендах не используются такие преимущества кулачкового механизма, как, например, задание сложной кинематики движения. А для подробного исследования работы алгоритма управления, необходимо подавать не только гармонический входной сигнал, но и случайное кинематическое воздействие. Поэтому первоначальная идея создания поступательного движения заключалась в создании сменных кулачков, профиль которых задавал бы разные кинематические движения. Например, описывал бы зацикленную часть профиля, созданной по методике, описанной в [7] дороги класса E по стандарту [8]. Однако от этой идеи пришлось отказаться по ряду причин. Во-первых, из-за предъявляемых к такому кулачку прочностных характеристик материала, из которого он должен был быть сделан. Так как кинематика, например, грунтовой дороги формируется случайным сигналом, пропущенным через фильтр. Из-за этого профиль кулака имеет «острые» выступы, которые вызывают

биение о роликовый толкатель, а также деформируются при соприкосновении. Во-вторых, потребовался бы более мощный мотор, для проворачивания кулака и отработки всех последующих ударов. Так же и-за решения сделать стенд миниатюрным, кулачковый механизм было принято заменить кривошипно-шатунным, из-за возможности получения большей амплитуды колебаний при тех же размерах вращающихся частей (рис. 4).

На рисунке обозначено: 1 – толкатель, 2 – кулак, 3 – кривошип, 4 – шатун, 5 – толкаемая поверхность, 6 – кулак, повернутый вокруг своей оси на 90 градусов вправо, 7 – кривошип повернутый на 180 градусов вокруг своей оси вращения.

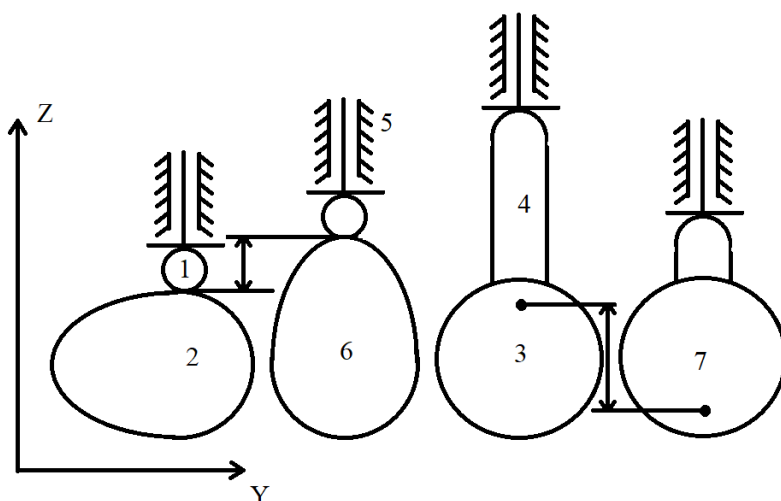


Рис. 4. Сравнение кинематических особенностей кулачкового и кривошипно-шатунного механизма

При этом общая конструкция толкающей части в этом случае будет меньшей по ширине (ось Y), но большей по высоте (ось Z).

Общее схематичное изображение стенда изображено на рисунке 5.

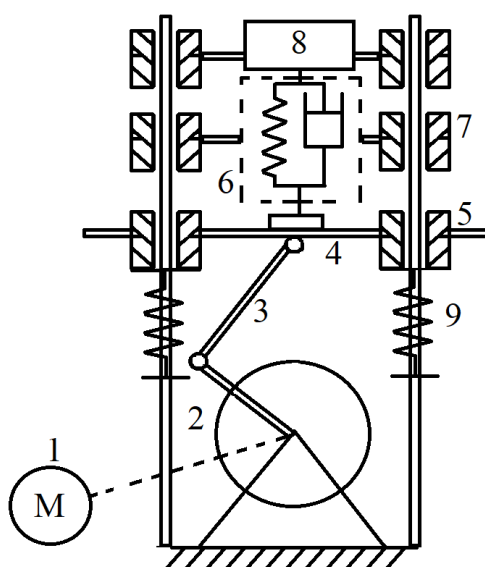


Рис. 5. Схематичное изображение установки

На рисунке обозначено: 1 – электромотор, который через редуктор и муфту соединен с кривошипом 2; 3 – шатун; 4 – рабочая поверхность, совершающая колебания; 5 – линейные подшипники на направляющей; 6 – корпус амортизатора, который крепится к линейным подшипникам, и опирается на линейную платформу через резиновую прослойку; 7 – линейные подшипники; 8 – имитация подрессоренной массы кузова; 9 – пружины поддерживающие рабочую платформу.

В начальном состоянии покоя рабочая платформа опирается на пружины. При подаче напряжения на двигатель, он через редуктор начинает вращать кривошипно-шатунный механизм, который в свою очередь заставляет рабочую платформу совершать колебания. Так как корпус амортизатора взаимодействует с рабочей платформой через резиновую прослойку (нужна здесь для избежания ударов корпуса амортизатора об рабочую поверхность), то корпус повторяет входные гармонические колебания, которые в свою очередь через пружину и демпфер передаются подрессоренной массе.

Основным материалом, из которого изготовлен стенд, является пластик PLA [9], по причине его достаточных прочностных характеристик, относительной простоты печати, а также по причине того, что после изготовления частей макета минимизируются риски возникновения проблем с размещением направляющих, или соосностью вращающихся частей (например, при печати редуктора).

В качестве объекта, на котором будет исследоваться алгоритм, выступает самодельный амортизатор (рис. 6). Корпусом амортизатора является стальная, хромированная труба (отмечена цифрой 1 на рисунке) с внутренним диаметром 24 мм, высотой 130 мм и толщиной стенки 1 мм. Труба закрыта с двух сторон крышками из пластика (2) и уплотнена герметиком, так же, для фиксации, крышки поджаты с двух сторон трубками с резьбой (на рисунке показана одна из них, под номером 3). Внутренний объем трубы заполнен ферромагнитной жидкостью на основе силиконового масла носителя [10].

В качестве поршня выступает катушка (4), профиль магнитопровода которой выполнен в виде буквы «Н». Диаметр катушки и её полюсов – 22 мм, толщина обмотки – 4 мм, высота – 5 см. Шток выполнен из полый (для прокладки управляющих катушкой пары проводов) алюминиевой трубы (5) с наружным диаметром 8 мм и высотой – 160 мм. Верхняя часть штока посредством резьбового соединения закреплена к опоре (6) с подрессоренной массой (7). Пружина (8), с коэффициентом демпфирования около 600 Н/м, размещается между верхней крышкой корпуса и опорой подрессоренной массы (3 кг). Внутри верхней крышки имеется уплотнение (9), которое удерживает ферромагнитную жидкость внутри, а также направляющая (10) для штока. Общий ход поршня составляет 5 см.

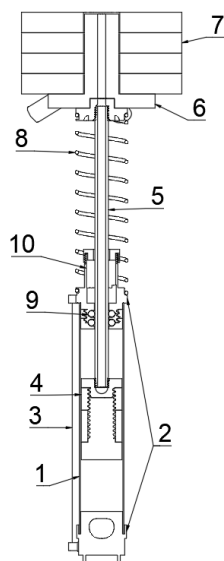


Рис. 6. Конструкция амортизатора в разрезе

Параметры амортизатора должны соответствовать параметрам типичной подвески, указанным в стандарте [6]. Однако эти соотношения подходят лишь для амортизаторов высотой пружины свыше 20 см, так как просадка пружины в таком случае составляет около 15.5 см. Высота пружины в установке – 10 см, при данных соотношениях подрессоренная масса просто продавит пружину. Поэтому принято решение подобрать такой вес, который бы соответствовал просадке пружины в половину её длины, то есть 3 кг (рис. 7).

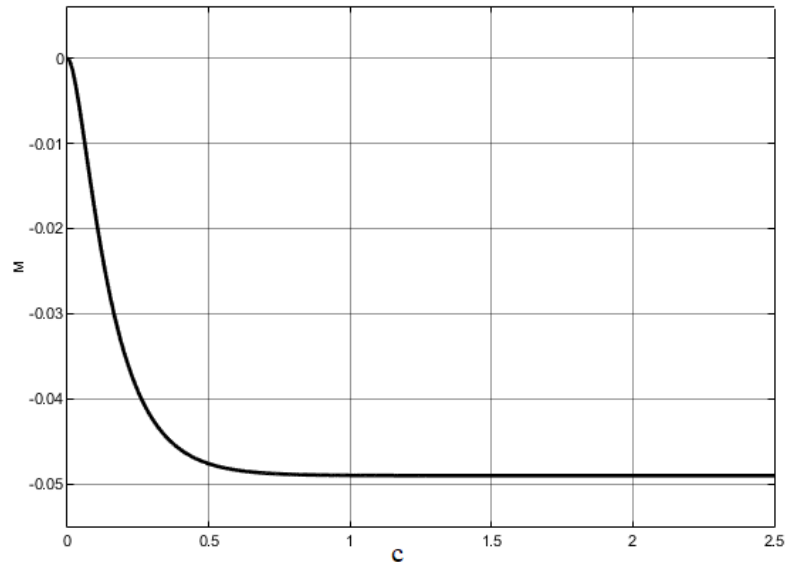


Рис. 7. Просадка пружины при массе в 3 кг, коэффициент жесткости пружины - 600 Н/м, и коэффициент демпфирования - 100 Нс/м.

Собственная частота колебаний системы определяется как:

$$\omega_c = \sqrt{c_n / m_n},$$

в таком случае, собственная частота амортизатора с подрессоренной массой $\omega_c = 14.1$ рад/с. Согласно амплитудно-частотной характеристике модели установки, построенной в среде Matlab (рис. 8), двигатель установки должен обеспечивать частоту колебаний рабочей платформы от 4-20 рад/с. В стенде используется двигатель с частотой вращения 2500 об/мин и двухступенчатый редуктор с передаточным отношением 12:1. В таком случае верхняя частотная граница стенда составляет 22 рад/с, что позволяет исследовать поведение на основных окolorезонансных частотах.

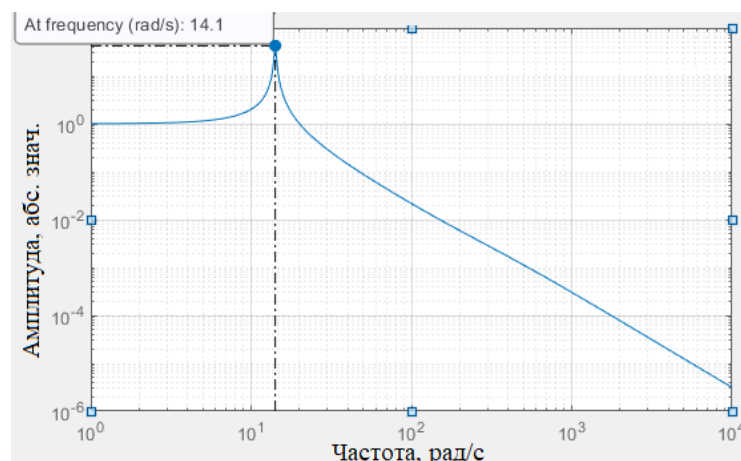


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика амортизатора с подрессоренной массой

Фотография установки в сборе показана на рис. 9. Общий ход рабочей платформы составляет 2.2 см, высота установки 46 см.



Рис. 9. Фотография стенда в сборе

В качестве измерительного оборудования используются два лазерных дальномера VL53L0X, которые фиксируют перемещение входного кинематического сигнала и подрессоренной массы. На рис. 10 представлены предварительные измерения амплитуды колебаний: желтый сигнал – входное кинематическое воздействие, красный – перемещения подрессоренной массы. Без учета погрешностей, амплитуда входного воздействия составляет – 2.2 мм, подрессоренной массы – 2.1 мм при частоте 6 рад/с.

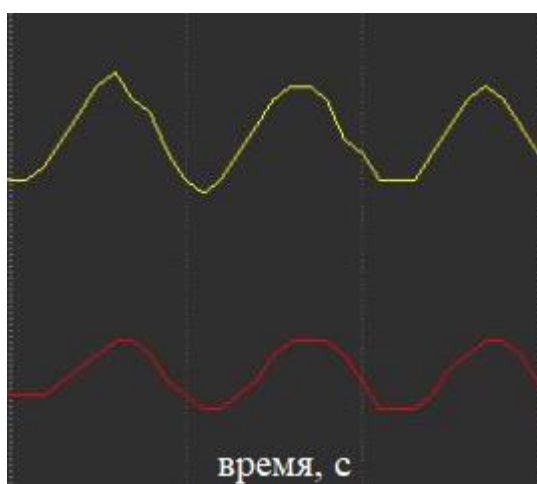


Рис. 10. Показания с дальномеров

Заключение

Описанная выше установка позволяет исследовать поведение амортизатора с магнитореологической жидкостью, как при кинематическом, так и силовом входном воздействии (путем увеличения подрессоренной массы), в наиболее важной для определения комфортности зоне частот. Дальнейшая работа над стендом предполагает установку энкодера, эмпирическое исследование характеристик используемой магнитореологической жидкости, систему и алгоритм управления двигателем (выходной сигнал колебаний должен быть равен входному), при необходимости, проведение оптимизации конструкции демпфера по методике, описанной в [11], а также непосредственное практическое исследование алгоритма, описанного в [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заковырин И.А., Круглов С.П. Вопрос о реализации самонастройки в системе управления адаптивной полуактивной подвески транспортного средства [Электронный ресурс] // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – №2(8) – Режим доступа: – <http://mnv.irkgups.ru/toma/28-20>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 30.04.2021).
2. Круглов С.П., Заковырин И.А. Управление адаптивной подвеской автомобиля на основе идентификационного алгоритма // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами: электрон. науч. журн. – 2020. – № 3(8). – с. 29-44 – DOI:10.26731/2658-3704.2020.3(8). 29-44 – Режим доступа: <http://ismm-irkgups.ru/toma/38-2020>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 30.04.2021).
3. Доморозов А.Н., Нгуен Ван Ньянь. Математическое описание процесса работы кулачкового механизма вибростенда KDXG // Вестник ИрГТУ. – 2011. – №6(53). – с. 61-64.
4. Электродинамические стенды: сайт – URL: <http://www.mts-test.ru/catalog/resheniya-dlya-vibratsionnykh-ispytaniy/> (дата обращения: 03.05.2021). – Текст электронный.
5. Guoliang Hu, Fengshuo Liu, Zheng Xie, and Ming Xu. Design, Analysis, and Experimental Evaluation of a Double Coil Magnetorheological Fluid Damper // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration Volume 2016, Article ID 4184726, 12 pages.
6. ГОСТ 33101-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности. Москва, Стандартинформ, 2016. 23 с.
7. Qi Zhou. Research and Simulation on New Active Suspension Control System: *Theses and Dissertations Lehigh University*. Bethlehem, 2013. 93p.
8. ИСО 8608:2016 (ISO 8608:2016) Вибрация механическая. Профили дорожного покрытия. Представление результатов измерений (Mechanical vibration. Road surface profile. Reporting of measured data). 44 с.
9. Polylactide: сайт – URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide/> (дата обращения: 03.05.2021). – Текст электронный.
10. Магнитная жидкость, феррофлюид на основе силикона: сайт – URL: <https://irkutsk.mirmagnitov.ru/product/magnitnaya-zhidkost-na-osnovye-silikona-fyero-flyuid30ml/> (дата обращения: 03.05.2021). – Текст электронный.
11. Остренко А.Г., Харченко А.О. Анализ и синтез конструкции автомобильных амортизаторов с целью повышения их надёжности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – 2018. – №1(57). – с. 130-139.

REFERENCES

1. Zakovyryn I.A., Kruglov S.P. Vopros o realizacii samonastroyki v sisteme upravleniya adaptivnoj poluaktivnoj podveski transportnogo sredstva [Elektronnyj resurs] [The question of the implementation of self-tuning in the control system of the adaptive semi-active vehicle suspension].

Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn. [Young Science of Siberia], – 2020. – No. 2(8) – Access mode: –<http://mnv.irkups.ru/toma/28-20>, svobodnyj. –Zagl. s ekrana. –YAz. rus., angl. (Accessed: 3.07.2020).

2. Kruglov S.P., Zakovyurin I.A. Upravlenie adaptivnoj podveskoj avtomobilya na osnove identifikacionnogo algoritma [Adaptive vehicle suspension control based on identification algorithm]. *Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami. elektron. nauch. zhurn [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems. Electronic scientific journal]*. 2020, no. 3(8), pp. 29-44. [Accessed 01.11.2020].

3. Domorozov A.N, Nguyen Van Nyan. Matematicheskoe opisanie processa raboty kulachkovogo mekhanizma vibrostenda KDXG [Mathematical description of the operation process of the cam mechanism of the KDXG shaker]. *Vestnik IrGTU. [Bulletin of ISTU]*, - 2011. - No. 6 (53). - pp. 61-64.

4. Electrodynamic stands: website - URL: <http://www.mts-test.ru/catalog/resheniya-dlya-vibratsionnykh-ispytaniy/> (date of access: 05/03/2021). - Electronic text.

5. Guoliang Hu, Fengshuo Liu, Zheng Xie, and Ming Xu. Design, Analysis, and Experimental Evaluation of a Double Coil Magnetorheological Fluid Damper // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration Volume 2016, Article ID 4184726, 12 pages.

6. GOST 33101-2014. *Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Pokrytiya dorozhnye. Metody izmereniya rovnosti.* [State Standard 33101-2014. Automobile roads for general use. Road coatings. Flatness measurement methods.]. Moscow, Standartinform publ., 2016. 23 p.

7. Qi Zhou. Research and Simulation on New Active Suspension Control System: *Theses and Dissertations Lehigh University.* Bethlehem, 2013. 93p.

8. ISO 8608:2016. Mechanical vibration. Road surface profile. Reporting of measured data. 44 p.

9. Polylactide: website - URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide/> (date of access: 05/03/2021). - Electronic text.

10. Magnetic fluid, silicone-based ferrofluid: website - URL: <https://irkutsk.mirmagnitov.ru/product/magnitnaya-zhidkost-na-osnovye-silikona-fyero-flyuid-30ml/> (date of access: 05/03/2021). - Electronic text.

11. Ostrenko A.G., Harchenko A.O. Analiz i sintez konstrukcii avtomobil'nyh amortizatorov s cel'yu povysheniya ih nadyozhnosti [Analysis and synthesis of designs of automobile shock absorbers for improving their reliability]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, – 2018, No. 1(57), pp. 130 – 139.

Информация об авторах

Заковырин Игорь Александрович – магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ZakIgor@bk.ru

Круглов Сергей Петрович – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Authors

Zakovyurin Igor Alexandrovich – post-graduate student of the Department "Automation of production processes", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ZakIgor@bk.ru

Sergey Petrovich Kruglov – Doctor of Engineering Science, Prof., the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Для цитирования

Заковырин И. А. Установка по исследованию адаптивного управления подвеской транспортного средства [Электронный ресурс] / Заковырин И. А., Круглов С. П. // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021.

For citation

Zakovyryn I.A., Kruglov S.P. *Ustanovka po issledovaniyu adaptivnogo upravleniya podveskoj transportnogo sredstva* [Installation for researching the adaptive control of the suspension of the vehicle] *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021.