

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ БЫСТРОХОДНОГО ГУСЕНИЧНОГО РОБОТА

д.т.н. Сарач Е.Б.¹, Ткачев Я.А.², Крохин М.Э.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Филиал АО «ЦЭНКИ» – НИИ СК, Москва, Россия

check-26@yandex.ru

В настоящее время стремительно развивается область машиностроения, включающая создание роботизированных быстроходных машин. Проектирование систем подрессоривания таких машин должно сопровождаться выполнением определенных требований, которые в настоящее время не сформулированы. Учитывая, что в корпусе быстроходного робота нет человека, применение требований к подвескам экипажных машин не является обоснованным.

С целью выработки рекомендаций по выбору характеристик систем подрессоривания быстроходных гусеничных роботов определяются объекты исследования, масса которых находится в диапазоне от 1000 до 10000 кг. Для объектов массой менее 1000 кг система подрессоривания не требуется. Объекты массой более 10000 кг будут создаваться на базе существующих серийных машин. В основе проводимого исследования учитывается положение о том, что к рассматриваемому классу машин не предъявлено ограничений по диапазону собственных частот колебаний корпуса. Учитывая, что для быстроходных гусеничных роботов сохраняется одно из основных требований – обеспечение высокой средней скорости, предлагается увеличить жесткость подвески с целью исключения резонанса из диапазона возможных скоростей движения.

С использованием принятых положений проводится исследование системы подрессоривания повышенной жесткости. Моделируется движение по трассам гармонического профиля в резонансном режиме и разбитой грунтовой дороге.

Результаты исследования показывают, что характеристики системы подрессоривания, выбранные по предложенной методике, позволяют двигаться по трассе гармонического профиля в резонансном режиме без пробоев подвески. Скорость движения по трассе с разбитой грунтовой дорогой ограничена значением, превышение которого приводит к значительным колебаниям корпуса и росту нагрузки на элементы системы подрессоривания. Отсутствие пробоев обуславливает снижение нагруженности подвески, что позволяет уменьшить массу ее элементов.

Ключевые слова: безэкипажные машины, быстроходные гусеничные роботы, характеристики системы подрессоривания.

Для цитирования: Сарач Е.Б., Ткачев Я.А., Крохин М.Э. Выбор характеристик системы подрессоривания быстроходного гусеничного робота // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 2 (48). С. 63–70. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-63-70.

Введение

Быстроходные гусеничные роботы становятся все более востребованными к применению как в целях выполнения боевых задач и обеспечения безопасности, так и для решения общепромышленных, сельскохозяйственных проблем.

Создание таких средств и их использование на практике сопряжено с определенными трудностями. Безэкипажные машины (роботы) как продукт отдельной области машиностроения появились сравнительно недавно. Существующие потребности в такой технике вынуждают увеличивать разрыв между созда-

нием опытных образцов изделий и научного обоснования при выборе технических решений при их проектировании. На сегодняшний день наблюдается некоторое отставание теоретических знаний от готовой продукции, которая уже сегодня применяется для решения тех или иных задач. Данное несоответствие может негативно сказываться на технических характеристиках или заведомо снижать эффективность изделия, его надежность и долговечность. В частности, для быстроходных гусеничных роботов не решен вопрос о том, какими характеристиками должна обладать система подрессоривания.

В случае традиционной машины, внутри которой находится человек, существуют определенные требования, предъявляемые к подвеске. В соответствии с этими требованиями есть критерии, которые должны быть выполнены. В основе таких требований заложено условие, которое заключается в том, чтобы обеспечить нормальное самочувствие экипажа во всех возможных режимах движения машины. Применение данных требований к подвескам быстроходных гусеничных роботов является нецелесообразным. С учетом перспективы развития безэкипажной техники выявленная проблема является актуальной.

Цель исследования

В связи с изложенным целью настоящего исследования является формирование специальных требований, учитывающих особенности быстроходных гусеничных роботов и позволяющих принимать целесообразные технические решения при выборе характеристик системы поддрессирования.

Известно, что боевой робот «Уран-9» (рис. 1) российского производства уже применялся в реальных боевых операциях, в результате чего была выявлена необходимость в его доработке [1]. Пример зарубежного аналога – боевой робот *Ripsaw M5* (рис. 2), который является возможным участником американской программы боевых робототехнических машин (*Robotic Combat Vehicle*), направленной на использование боевых роботов в качестве помощников солдат на поле боя [2].

В качестве исследуемых быстроходных гусеничных роботов будут рассматриваться образцы, масса которых находится в диапазоне от 1000 до 10000 кг. Машины массой менее 1000 кг, как правило, не являются быстроходными и система поддрессирования для них не требуется. Объекты массой более 10000 кг входят в номенклатуру существующих машин. Для них будет производиться модернизация с целью использования в качестве мобильного робота, что является экономически целесообразным решением.

Проектирование подвески сопровождается расчетом системы поддрессирования, основной задачей которого является выбор характеристик упругого элемента и амортизатора с учетом определенных ограничений. Для экипажных машин эти ограничения основаны на присутствии человека в корпусе и необхо-

димости обеспечить его нормальное самочувствие во всех возможных режимах движения.

Известно, что одним из основных требований, предъявляемых к подвескам экипажных машин, является обеспечение высокой плавности хода. К характеристикам плавности хода относят динамическое воздействие на корпус при прохождении неровностей местности и значение скорости прямолинейного движения, которое можно реализовать в данных условиях без возникновения пробоя. В соответствии с этими характеристиками показателями плавности хода являются скорость прямолинейного движения машины по неровностям, ускорения колебательного движения корпуса, проходная высота неровностей. Из перечисленных показателей ограничения накладываются на ускорения колебательного движения корпуса, так как медицинскими нормами установлено допустимое воздействие на организм человека кратковременных перегрузок не более $3,5g$ (g – ускорение свободного падения), в то же время значения высокочастотных ускорений не должно превышать $0,5g$. Согласно [3], в случае пробоя вертикальные ускорения корпуса могут достигать значений $50–100 м/с^2$.



Рис. 1. Боевой робот «Уран-9»

Fig. 1. Uran-9 robot



Рис. 2. Боевой робот *Ripsaw M5*

Fig. 2. Ripsaw M5 robot

В случае безэкипажных машин такие ограничения теряют актуальность. В связи с этим обоснована необходимость сформулировать критерии, которые будут использоваться при выборе характеристик системы поддрессирования безэкипажных машин.

Описание методики выбора характеристик системы поддрессирования

Выбор характеристик упругого элемента экипажных машин производится исходя из рекомендуемых значений периода продольно-угловых колебаний корпуса, находящихся в диапазоне 0,5...1,8 с [4]. Выход за пределы данного диапазона, как правило, приводит к возрастающим высокочастотным ускорениям или сильным раскачиваниям корпуса, что ведет к ухудшению самочувствия экипажа. Период продольно-угловых колебаний и частота собственных частот колебаний для безэкипажной машины таких ограничений не имеют. В связи с этим предлагается увеличить собственную частоту колебаний корпуса с целью выведения ее из области частот, в которой наиболее вероятен режим резонанса с возникновением пробоя подвески.

Для исключения пробоя рекомендуется принимать значения периода колебаний менее 0,5 с, что соответствует повышению жесткости упругих элементов и влечет за собой увеличение собственной частоты колебаний корпуса (рис. 3). Также следствием повышения жесткости подвески является снижение влияния продольных сил на колебания корпуса машины при разгоне и торможении [5].

На рис. 4 представлен условный график упругих характеристик, качественно демонстрирующий, как изменяются реализуемые упругим элементом силы при повышении жесткости упругого элемента. При увеличении жесткости характеристика упругого элемента из 1 переходит в 2, при этом увеличивается коэффициент динамичности подвески K_d ($K_{d1} = 5, K_{d2} = 15$). При расчете на прочность направляющих элементов подвески (балансиров) экипажных гусеничных машин максимальное усилие, которое возникает при пробое подвески, принимается $3P_{max}$, [4]. В случае подвески повышенной жесткости

$$P_{max2} = 3P_{max1}$$

то есть нагрузки, реализуемые характеристикой упругого элемента 2 при движении

без пробоев будут меньше или равны тем нагрузкам, которые используются при традиционных расчетах. Следовательно, можно снизить размер сечения и массу балансиров.

Далее, при определении нагрузок в ходовой части предлагается моделировать движение машины по разбитой грунтовой дороге или по гармоническому профилю согласно требованиям к подвескам быстроходных гусеничных машин – с высотой неровностей 0,2 м и длиной неровностей 1,5; 2,0 и 2,5 базы

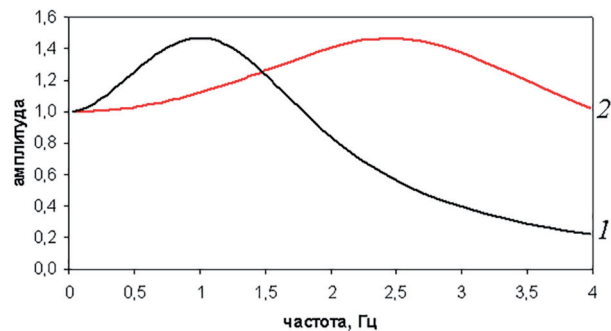


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика; 1 – подвеска экипажной машины; 2 – подвеска повышенной жесткости безэкипажной машины

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic: 1 – suspension of the crew vehicle; 2 – suspension of increased stiffness of an unmanned vehicle

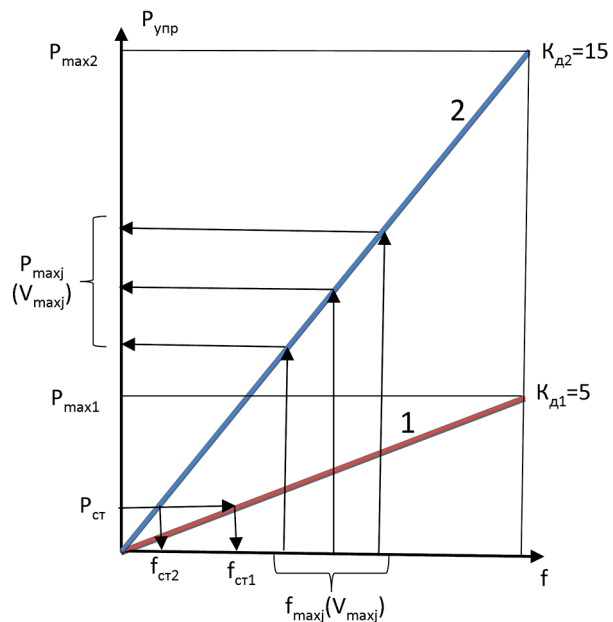


Рис. 4. Схема характеристик упругого элемента подвески;

1 – обычная жесткость; 2 – повышенная жесткость

Fig. 4. Diagram of the characteristics of the elastic suspension element:

1 – standard stiffness; 2 – increased stiffness

машины на максимальной скорости. При этом с ростом скорости будут увеличиваться прыжки машины и их количество. Следовательно, будут увеличиваться хода подвески и возникающие нагрузки. Пробоев подвески не будет вследствие большого коэффициента динамичности подвески.

В итоге исходя из требований по скорости движения для мобильного робота определяются максимальные часто возникающие усилия в направляющем элементе подвески, а по ним прогнозируются размеры и вес ходовой части робота. Это позволит установить связь между скоростью движения машины и относительной массой ходовой части, что даст возможность на начальном этапе проектирования мобильного робота при заданной скорости движения оценить массу ходовой части, а, следовательно, и полезную нагрузку. Так как соотношение полезной нагрузки к полной массе машины является одним из основных аспектов, которые определяют соответствие машины своему назначению, а также дает возможность в дальнейшем применять решения по модернизации машины без каких-либо существенных изменений конструкции, в частности, подвески, данное исследование является актуальным.

Выбор характеристик системы поддрессирования

Используя изложенные положения, проводим исследование по выбору характеристик независимой торсионной системы поддрессирования с гидравлическими амортизаторами из состава быстроходного гусеничного робота, имеющего массу 10000 кг.

Период продольно-угловых колебаний T корпуса принимается равным 0,4 с, что соответствует диаметру торциона 0,06 м для рассматриваемого объекта. Коэффициент динамичности подвески – отношение максимальной силы P_{\max} к статической силе $P_{\text{ст}}$ в данном случае составляет 9,4. Полученная характеристика упругого элемента представлена на рис. 5.

Следующим шагом является выбор характеристики амортизатора. Учитывая, что резонансный режим движения не достигается, уровень демпфирования может быть меньше по сравнению с характеристиками, выбираемыми для экипажных машин. Данное решение позволит избежать избыточных силовых воздействий на каток.

На первом этапе проводится исследование на трассе с периодическими неровностями высотой 0,2 м в соответствии с характеристиками полигонных трасс. Скорость дви-

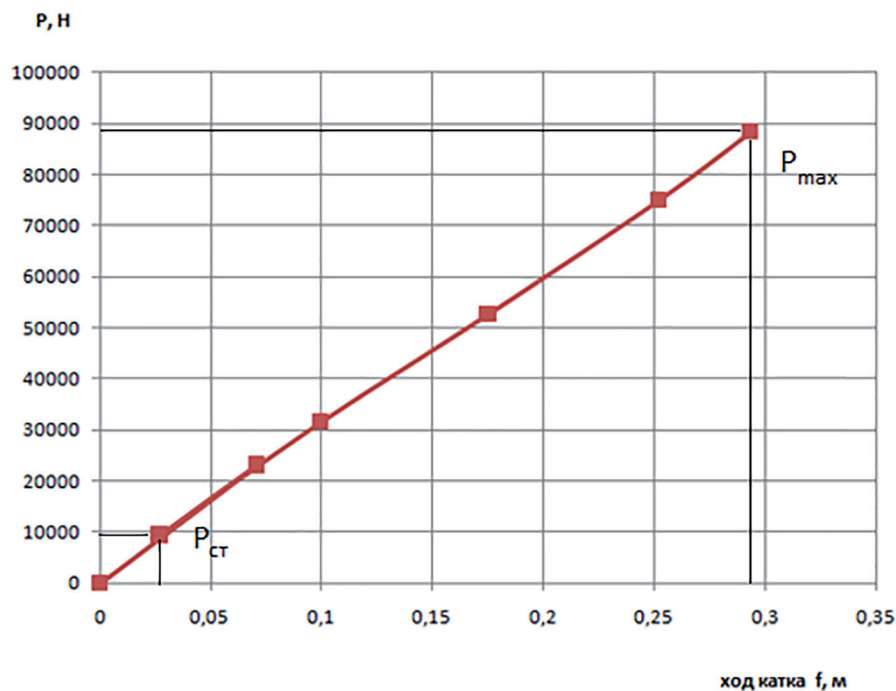


Рис. 5. Характеристика упругого элемента подвески (торциона), приведенная к вертикальному перемещению катка

Fig. 5. The characteristic of the elastic suspension element (torsion bar), reduced to the vertical displacement of the roller

жения, соответствующая режиму резонанса 14,3 м/с (51,5 км/ч) [4]. Расчетная скорость – 12,5 м/с (45 км/ч). Длина неровностей принимается равной двум базам машины.

Выбор коэффициента сопротивления амортизатора на прямом ходе должен осуществляться исходя из условия обеспечения минимальной силы, действующей на каток, с учетом обеспечения гашения колебаний корпуса. Коэффициент сопротивления амортизатора на обратном ходе следует подбирать, обеспечивая независание катка. Полученная характеристика представлена на рис. 6.

Анализ результатов исследования

По результатам моделирования заезда каток не достиг отбойника, пробоя не возникло. Запись хода катка представлена на рис. 7. Значение силы, действующей на каток, составило $9,6P_{ст}$ (рис. 8).

На втором этапе проведено моделирование движения по трассе типа разбитая грунтовая дорога, которая имеет случайный профиль. Выбранные характеристики подвески позволяют двигаться на скорости 8,3 м/с (30 км/ч). При этом ход катка (рис. 9) не достигает максимального значения, сила в подвеске ниже значения P_{max} (рис. 10), следовательно пробой отсутствует.

Дальнейшее повышение скорости приводит к сильным раскачиваниям корпуса и непрерывному отрыву катков от поверхности земли.

Заключение

Таким образом, при формировании требований к подвеске быстроходных гусеничных роботов учтено отсутствие ограничений по диапазону собственных частот колебаний корпуса, на основании чего предложено вывести резонансную скорость из диапазона возможных значений скоростей.

По результатам расчета с применением предложенного метода полученная система поддрессирования позволяет реализовать движение по разбитой грунтовой дороге со скоростью 8,3 м/с (30 км/ч). В резонансном режиме при движении по трассе с периодическими неровностями пробой подвески отсутствует.

В случае дальнейшего повышения скорости движения необходимо проводить оценку нагруженности элементов подвески с последующей оценкой относительной массы подвески, которая влияет на массовую долю полезной нагрузки.

Следует отметить, что в рассмотренном методе выбора характеристик системы поддрессирования уровень ускорений корпуса машины не учитывается и не ограничивается.

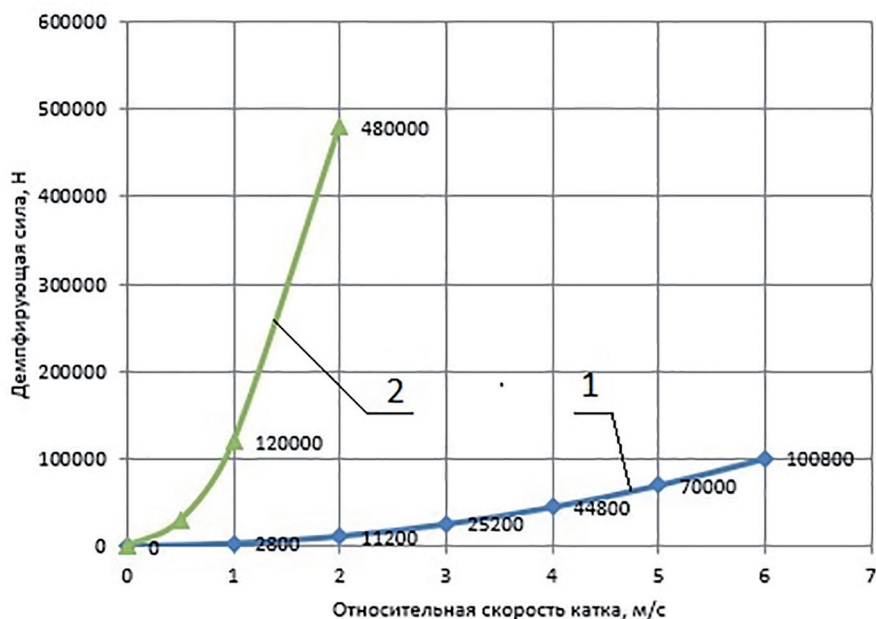


Рис. 6. Характеристика амортизатора:
1 – прямой ход катка, 2 – обратный ход катка

Fig. 6. Shock absorber characteristic: 1 – straight run of the roller, 2 – reverse run of the roller

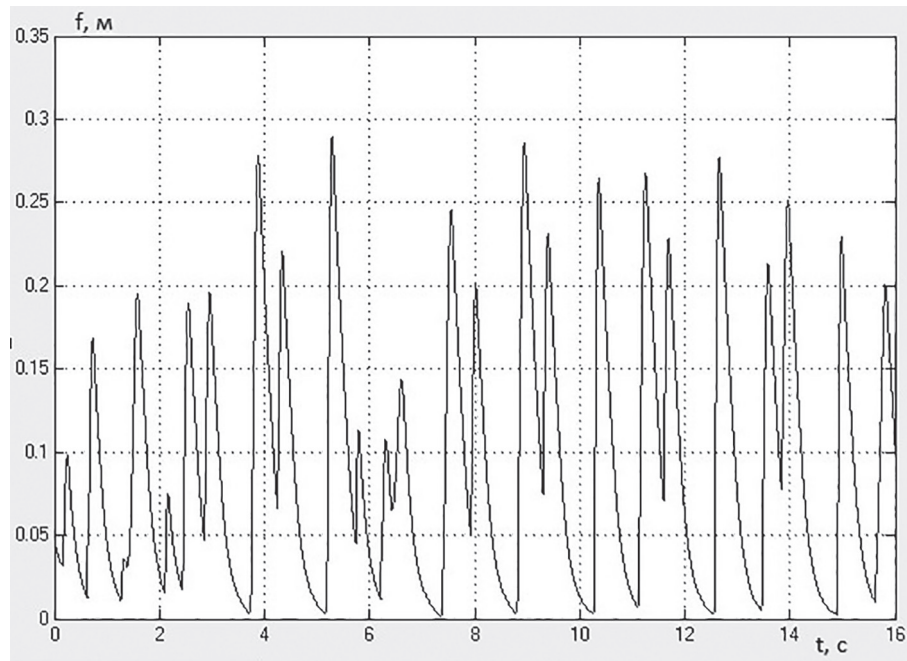


Рис. 7. Запись хода катка

Fig. 7. Roller track recording

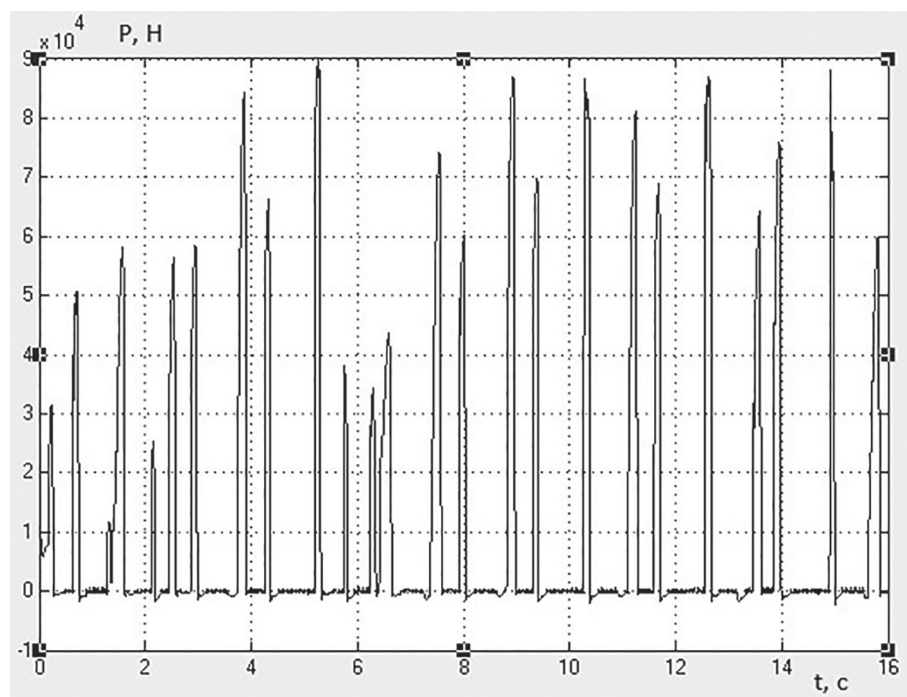


Рис. 8. Запись силы в подвеске

Fig. 8. Recording of force in suspension

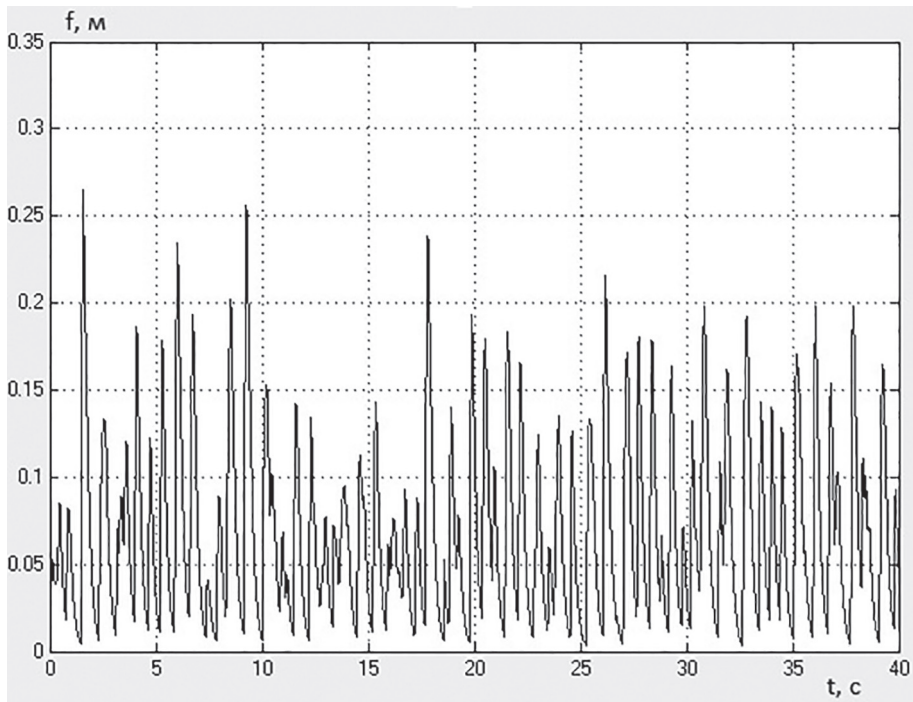


Рис. 9. Запись хода катка
Fig. 9. Roller track recording

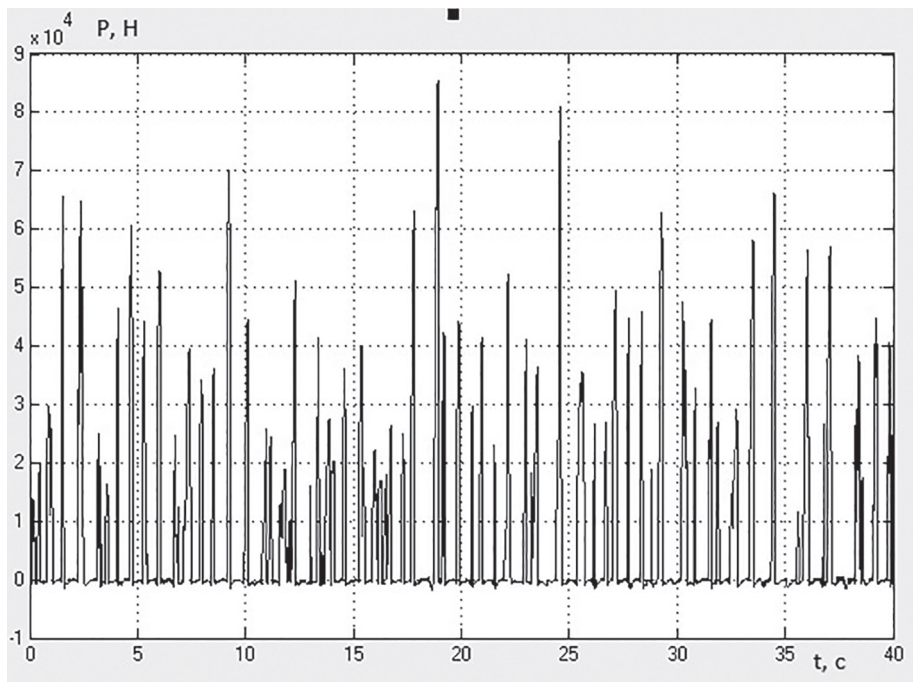


Рис. 10. Запись силы в подвеске
Fig. 10. Recording of force in suspension

Литература

1. РИА Новости. Боевой робот «Уран-9» приняли на вооружение российской армии. URL: <https://ria.ru/20190124/1549807789.html> (дата обращения 17.07.2020).
2. M. Ball. Unmanned System Technology. Multy-Mission Battlefield UGV Launched. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2019/10/multi-mission-battlefield-ugv-launched/> (дата обращения 17.07.2020).
3. Абрамов Б.А., Брагин Ю.И., Вавилов Е.В. Теория и конструкция танка. Т. 6. Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1985. 244 с.
4. Дядченко М.Г., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Конструкция и расчет подвесок быстроходных гусеничных машин. Часть 1. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 40 с.
5. Дмитриев А.А., Чобиток В.А., Тельминов А.В. Теория и расчет нелинейных систем поддресоривания гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1976. 207 с.
5. <https://ria.ru/20190124/1549807789.html> (accessed: 17.07.2020).
2. M. Ball. Unmanned System Technology. Multy-Mission Battlefield UGV Launched. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2019/10/multi-mission-battlefield-ugv-launched/> (accessed: 17.07.2020).
3. Abramov B.A., Bragin YU.I., Vavilov YE.V. Teoriya i konstruktsiya tanka. T. 6. Voprosy proyektirovaniya kho-dovoy chasti voyennykh gusenichnykh mashin [Theory and design of the tank. T. 6. Questions of the design of the undercarriage of military tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1985. 244 p.
4. Dyadchenko M.G., Kotiyev G.O., Sarach YE.B. Konstruktsiya i raschet podvesok bystrokhodnykh gusenichnykh mashin. Chast' 1 [Design and calculation of suspensions of high-speed tracked vehicles. Part 1]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007. 40 p.
5. Dmitriyev A.A., Chobitok V.A., Tel'minov A.V. Teoriya i raschet nelineynykh sistem podresorivaniya gusenichnykh mashin [Theory and calculation of nonlinear suspension systems for tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1976. 207 p.

References

1. RIA Novosti. Boyevoy robot «Uran-9» prinyali na vooruzheniye rossiyskoy armii. URL:

SELECTION OF THE CHARACTERISTICS OF THE SUSPENSION SYSTEM OF THE HIGH-SPEED TRACKED ROBOT

DSc in Engineering YE.B. Sarach¹, YA.A. Tkachev², M.E. Krokhin¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Branch of the Center for operation of space ground-based infrastructure, Moscow, Russia
check-26@yandex.ru

Currently, the field of mechanical engineering is rapidly developing, including the creation of robotic high-speed vehicles. The design of suspension systems for such vehicles must be accompanied by the fulfillment of certain requirements, which are currently not formulated. Considering the thing that there is no person in the body of a high-speed robot, the application of the requirements for the suspensions of crew vehicles is not justified.

In order to develop recommendations on the choice of characteristics of suspension systems for high-speed tracked robots, the research objects, which mass is in the range from 1000 to 10000 kg are determined. No suspension system is required for objects weighing less than 1000 kg. Objects weighing more than 10,000 kg will be created on the basis of existing serial vehicles.

The study is based on the provision that the considered class of vehicles is not subject to restrictions on the range of natural frequencies of body vibrations. Considering that one of the main requirements remains for high-speed tracked robots – ensuring a high average speed, it is proposed to increase the suspension stiffness in order to exclude resonance from the range of possible travel speeds.

Using the accepted provisions, a study of the suspension system of increased stiffness is carried out. The movement along the tracks of a harmonic profile in resonance mode and a broken dirt road is simulated. The results of the study show that the characteristics of the suspension system, selected according to the proposed method, make it possible to move along the line of the harmonic profile in the resonant mode without suspension breakdowns.

The speed of movement on a broken dirt road is limited to a value, which exceeding leads to significant vibrations of the body and an increase in the load on the elements of the suspension system. The absence of breakdowns leads to a decrease in the loading of the suspension, which makes it possible to reduce the mass of its elements.

Keywords: unmanned vehicles, high-speed tracked robots, characteristics of the suspension system.

Cite as: Sarach YE.B., Tkachev YA.A., Krokhin M.E. Selection of the characteristics of the suspension system of the high-speed tracked robot. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 2 (48), pp. 63–70 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-63-70.