

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 678.6

ОБ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

ABOUT DEFORMATION SET OF CONSTRUCTIVE POLYURETHANE WORKING IN REGIME OF DYNAMIC LOAD

Мазурин Валерий Леонидович,

аспирант, e-mail: valmazurin@rambler.ru

Mazurin Valerii L., postgraduate

Приемышев Александр Владимирович,

кандидат техн. наук, профессор, e-mail: priemyshev52@mail.ru

Priemyshev Aleksander V., C. Sc., Professor

Яковлев Станислав Николаевич,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: stannik59@mail.ru

Yakovlev Stanislav N., C. Sc., Associate Professor

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya St., 29, St. Petersburg, Russia.

***Аннотация.** Приведено подробное описание экспериментальной установки для моделирования динамического нагружения полиуретанового амортизатора, работающего на сжатие. Представлены экспериментальные данные об остаточной деформации конструкционных полиуретанов различной твердости.*

***Abstract.** Detailed description of experimental plant for modulate dynamic load of polyurethane damper, working under pressure, is given. Experimental data about deformation set of constructive polyurethane with different hardness is presented.*

***Ключевые слова:** полиуретан, динамическое нагружение, экспериментальная установка, статическая деформация, остаточная деформация, полиуретановый амортизатор.*

***Keywords:** polyurethane, dynamic load, experimental plant, static deformation, deformation set, polyurethane damper.*

Введение

Начиная с середины прошлого века, в передовых промышленно развитых странах резина во многих технических приложениях стала вытесняться полиуретанами, имеющими важные конструктивные, технологические и эксплуатационные преимущества [1][2][3].

Полиуретан, как и все реальные материалы, имеет не вполне упругие свойства и поэтому при деформировании поглощает в необратимой форме часть энергии, которая вызывает деформацию. Поглощаемая в течении каждого цикла нагружения энергия идет на нагрев полиуретанового массива детали и частично рассеивается в окружающую среду.

Схематично молекулярная структура полиуретана представляет собой длинные гибкие молекулярные цепи, соединенные через некоторые промежутки поперечными связями. Полиуретановые цепи в отличие от большинства молекулярных цепей других полимеров содержат большое количество высокополярных групп, и поскольку они не так жестко соединены первичными химическими связями, эти полярные группы могут свободно располагаться относительно друг друга, образуя вторичные химические связи. Большое количество полярных групп не позволяет цепям скользить относительно друг друга под нагрузкой.

Накапливание тепла и нагрев полиуретанового массива будет иметь место в деталях, работающих

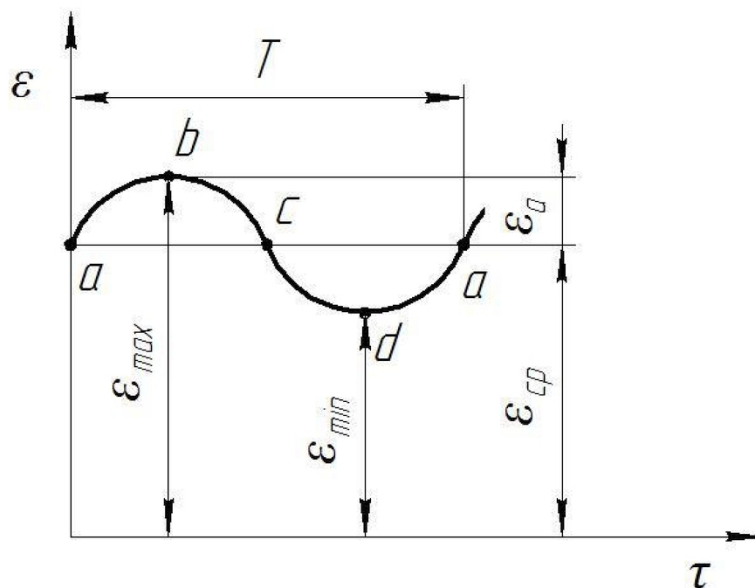


Рис. 1 - Режим несимметричного цикла нагружения: ε_{cp} - среднее значение деформации; ε_a - амплитудное значение деформации; ε_{max} - максимальное значение деформации; ε_{min} - минимальное значение деформации; T - период колебаний.

в условиях постоянного динамического нагружения, в частности в амортизаторах. Повышение температуры полиуретанового массива согласно [4] ускоряет протекающие в нем физико-химические процессы, ухудшающие механические свойства полиуретана. В частности, согласно происходит разрушение вторичных химических связей внутри полиуретана и как следствие уменьшение абсолютных размеров детали.

Целью данной работы является экспериментальное определение остаточной деформации полиуретанового массива амортизатора, работающего на сжатие в режиме постоянного динамического нагружения.

Описание испытательного стенда и нагружающего устройства

Для изучения вопросов циклического размягчения полиуретанового массива амортизатора был спроектирован и изготовлен специальный стенд.

Стенд позволяет моделировать простейший случай одноосного гармонического нагружения полиуретанового массива испытуемого амортизатора.

Полиуретановые амортизаторы при работе испытывают несимметричный цикл нагружения, представленный на рис. 1.

Полупериод колебаний, обозначенный на рис. 1 буквами $a b c$, соответствует деформации сжатия, при которой происходит удаление верхней пластины амортизатора от нулевого положения. Участок $c d a$, соответствует деформации растяжения, при которой происходит приближение верхней пластины амортизатора к нулевому положению. При этом нулевое положение соответствует среднему значению статической деформации. Среднее значение деформации ε_{cp} амортизатора, чаще всего обусловлено весом амортизируемого объекта [5].

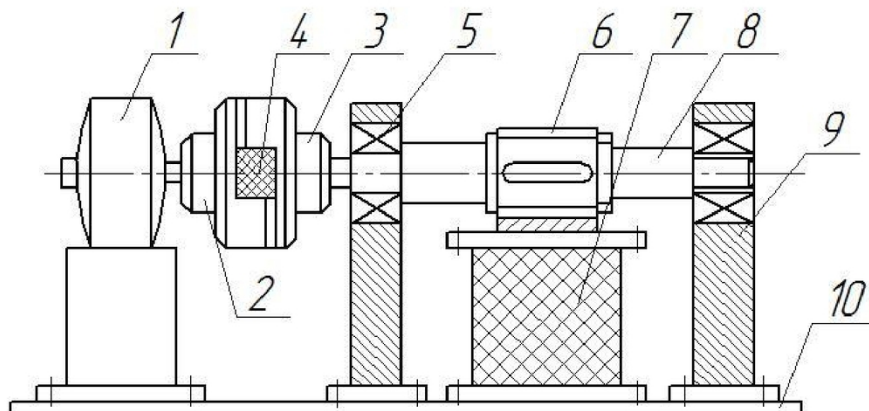


Рис. 2 - Кинематическая схема испытательного стенда: 1 - электродвигатель; 2,3 - полумуфты; 4 - упругий элемент; 5 - подшипник; 6 - кулачок; 7 - амортизатор; 8 - вал; 9 - корпус подшипника; 10 - основание.

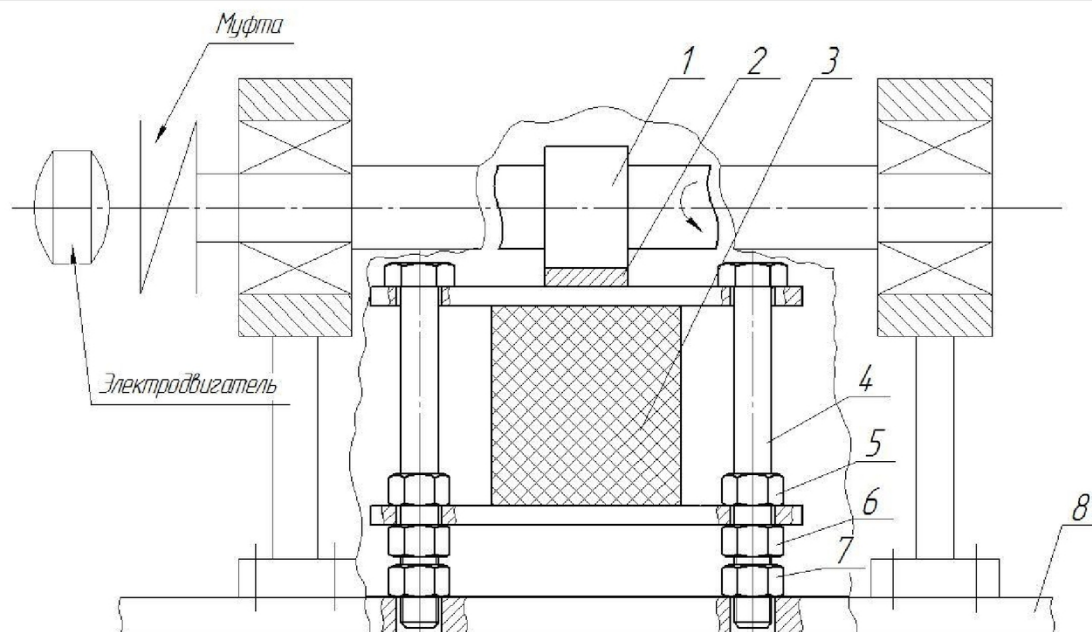


Рис. 3 - Схема нагружающего устройства: 1 - эксцентрик; 2 - пята; 3 - амортизатор; 4 - направляющий винт; 5 - контр-гайка; 6 - подъемная гайка; 7 - фиксирующая гайка; 8 - основание.

Кинематическая схема испытательного стенда для моделирования динамического нагружения полиуретановых амортизаторов, работающих на сжатие представлена на рис. 2.

Испытательный стенд состоит из асинхронного электродвигателя 5АИ71 В2 мощностью $P_{эл.} = 1,1$ Квт с частотой вращения $n_{эл.} = 3000$ об/мин с регулируемой частотой вращения, упругой муфты и вала с кулачком, установленного на подшипниках качения. Электродвигатель и подшипники качения вала установлены на основании.

Благодаря регулируемой частоте вращения вала электродвигателя мы сможем изучать поведение полиуретанового массива испытуемого амортизатора во всем интервале обычно применяемых механических частот нагружения. Эти ча-

сты находятся в диапазоне от 10 до 50 Гц и обусловлены частотой вращения коленчатого вала двигателя силовой установки, для уменьшения колебаний которой и используются амортизаторы.

С помощью амортизаторов достигается значительное уменьшение динамических усилий и тем самым предупреждается возникновение усталостных поломок, то есть увеличивается долговечность машин.

Гашение колебаний согласно [6] основывается на превращении кинетической энергии амортизируемого объекта в тепловую энергию с последующим ее рассеиванием (диссипацией) в окружающую среду. Перевод механической энергии в тепловую осуществляется с помощью внутреннего трения (гистерезиса), обусловленного вязкостью полиуретанового массива амортизатора.

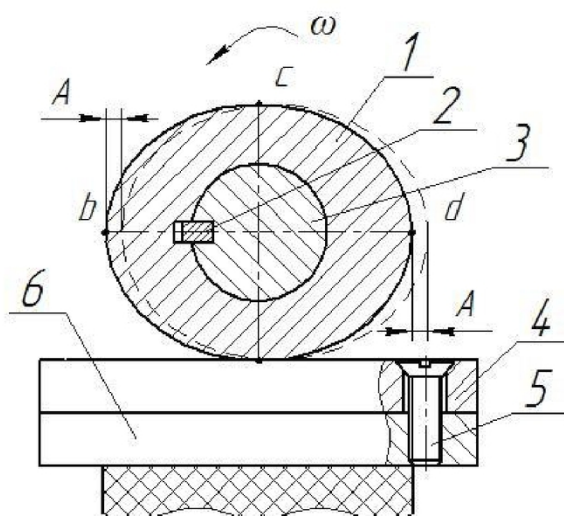


Рис. 4 - Профиль кулачка, моделирующий динамическое нагружение полиуретанового массива амортизатора: 1 - эксцентрик, 2 - шпонка, 3 - вал, 4 - пята, 5 - винт, 6 - амортизатор.

Схема нагружающего устройства для испытания амортизаторов представлена на рис. 3.

На рисунке испытуемый амортизатор, закрепленный в нагружающем устройстве с помощью болтов, изображен в свободном состоянии. Для создания статического нагружения необходимо открутить контр-гайки и вращая подъемные гайки поднять амортизатор на величину определенной статической деформации при которой будут проводиться испытания. После этого необходимо закрутить контр-гайки и измерить величину статической деформации подготовленного к испытаниям амортизатора.

Переменная динамическая нагрузка, действующая на амортизатор, моделируется с помощью вращающегося кулачка. Учитывая тот факт, что колебания происходят по гармоническому закону

$$U(t) = A \sin(\omega t + \varphi) ,$$

где A – амплитуда колебаний или отклонение от нулевого положения, ω – угловая скорость вала, φ – начальная фаза колебаний, профиль эксцентрика точно соответствует синусоидальному закону нагружения кулачкового механизма с плоским толкателем.

Профиль эксцентрика представлен на рис. 4.

Величина эксцентриситета A кулачка соответствует величине ε_a – амплитудного значения деформации.

При вращении кулачка пята, выполняющая роль плоского толкателя и жестко связанная с верхней пластиной амортизатора моделирует динамическое нагружение амортизатора. Когда пята контактирует с участком $a b c$ профиля кулачка происходит удаление верхней пластины амортизатора от нулевого положения и в точке b деформация достигает своего максимума. При дальнейшем вращении кулачка под действием упругой деформации, которая возникает в полиуретановом массиве после приложения статической деформации, происходит приближение верхней пластины амортизатора к нулевому положению и в точке d деформация соответствует минимальному значению.

При изготовлении сложный контур кулачка образуется как огибающая различных положений шлифовального круга простой формы. После шлифования кулачок, для повышения износостойкости подвергался азотации.

Для проведения экспериментального исследования были изготовлен кулачок с эксцентриситетом 1 мм. Этот эксцентрик согласно [7] примерно соответствуют амплитудам наиболее распространенных механических колебаний современных двигательных установок.

Материал и методика исследования

Для экспериментального определения величины относительной остаточной деформации полиуретанового массива амортизатора были изготовлены три партии амортизаторов твердостью 60

ShA, 70 ShA и 80 ShA. В качестве материала для амортизаторов использовался полиуретан торговой марки Duothane фирмы Synair (США) и CIL (Великобритания). Полиуретановый массив амортизатора представляет собой цилиндр диаметром 32 мм и высотой 38 мм, который полностью соответствует форме стандартных образцов при определении модуля упругости при сжатии по ГОСТ 9550-81. К амортизирующему полиуретановому массиву методом полимеризации прикреплены две цилиндрические пластины диаметром 70 мм и толщиной 6 мм, в которых имеются четыре направляющих отверстия.

Конструкция амортизатора представлена на рис. 5.

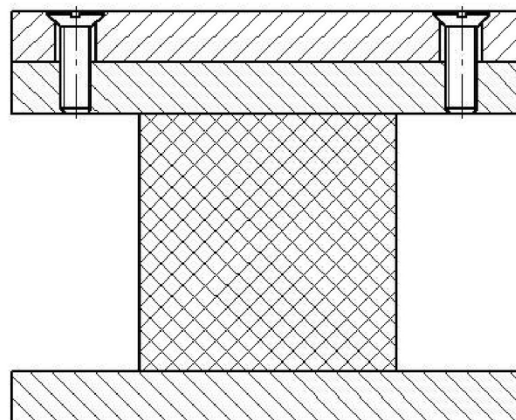


Рис. 5 - Конструкция экспериментального полиуретанового амортизатора: 1- пята, 2 – винт, 3 – верхняя пластина, 4 – полиуретановый массив, 5 – нижняя пластина.

Перед началом эксперимента, исходя из опыта расчетов и эксплуатации деталей машин с полиуретановым массивом определили диапазон изменения статической нагрузки, действующей на амортизатор. Были приняты в зависимости от твердости полиуретана следующие величины статической деформации: 4, 3, и 2 мм, что при высоте полиуретанового массива амортизатора 38 мм соответствует примерно относительному сжатию от 0,1 до 0,05. Большая относительная статическая деформация принадлежит полиуретану меньшей твердости.

Перед испытанием амортизатор проходит стабилизацию путем его многократного нагружения до величины статической деформации, при которой происходит разрушение случайных вторичных химических связей. Далее испытуемый амортизатор, устанавливали в нагружающее устройство с помощью болтов. Вращая подъемные гайки, следили за контактом пяты и эксцентрика. По достижении контакта, равномерно вращали подъемные гайки и с помощью колумбуса контролировали равномерность подъема амортизатора относительно плиты. По достижении требуемой величины статической деформации амортизатора его положение фиксировалось с помощью контргайки.

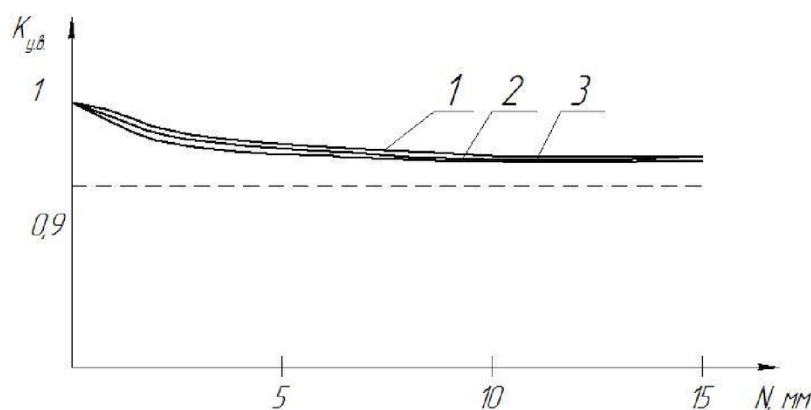


Рис. 6 – Изменение высоты амортизатора в зависимости от числа циклов нагружения: 1 – полиуретан 60 ShA; 2 – полиуретан 70 ShA; 3 – полиуретан 80ShA.

Затем с помощью пульта управления, расположенного на частотном преобразователе, включали вращение электродвигателя и по прошествии 500 тысяч циклов нагружения, производили демонтаж амортизатора и последующий замер высоты амортизатора с точностью $\pm 0,01$ мм.

Для соблюдения корректности испытаний амортизаторов была проведена фотография рабочего дня экскаватора, силовая установка которого была установлена на полиуретановых амортизаторах.

Целью данного наблюдения было определение времени простоя или времени ожидания, в течение которого двигатель работал на холостом ходу с частотой вращения коленчатого вала примерно 800 об/мин, что соответствует частоте 13 Гц, а также времени, когда двигатель работал с номинальными оборотами 2200 об/мин и соответственно частотой вынужденных колебаний 37 Гц. По результатам наблюдений был сделан вывод: в течение восьмичасового рабочего дня двигатель экскаватора работает на холостом ходу примерно два часа и остальные шесть работает на номинальных оборотах. Было решено проводить испытания по определению остаточной деформации полиуретановых амортизаторов при частоте нагружения 37 Гц.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты длительных испытаний для полиуретанов трех твердостей представлены на рис. 6.

Величину изменения высоты амортизатора предлагается оценивать коэффициентом уменьшения высоты. Представленные на рис. 6 экспериментальные данные хорошо аппроксимируются следующей зависимостью:

$$K_{у.в.} = \frac{1}{1+0.017 \cdot N^{0.005 ShA}} \quad (1)$$

где N – количество циклов нагружения, млн.

ShA – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Изменение высоты полиуретанового амортизатора, работающего на сжатие в зависимости от числа циклов нагружения, представленное на рис. 6, показывает уменьшение размера полиуретанового массива с ростом числа циклов нагружения. Очевидно, оно связано с разрушением вторичных химических связей внутри эластомера. Учитывая тот факт, что у полиуретанов более высокой твердости количество поперечных химических связей больше, то по прошествии 15 миллионов циклов нагружения, количество разрушенных связей у твердых полиуретанов больше, нежели у мягких. Из рис. 6 следует, что полиуретаны высокой твердости подвержены большей усадке, нежели мягкие. Так полиуретан твердостью 80 ShA теряет примерно 5% своей первоначальной высоты после 15 миллионов нагружения, полиуретан твердостью 70 ShA примерно 4% и 60 ShA соответственно 3%.

Кривая, описывающая изменение высоты полиуретанового амортизатора качественно совпадает с кривой Веллера, характеризующей усталостную прочность металлов. Количество циклов нагружения в 15 миллионов, после которого увеличения осадки амортизатора не происходит, говорит о том, что прошел период стабилизации материала и дальнейшего понижения высоты амортизатора происходить не будет. Эта величина в 15 миллионов нагружения для полиуретанов аналогична базовому числу циклов нагружения, свойственному металлам, после которого падения прочности также не происходит. 15 миллионов нагружений соответствует примерно 4200 часам работы массивной шины штабеллера-погрузчика. Значительно большее (на порядок и выше) количество нагружений испытывают при работе полиуретановые амортизаторы.

При проведении экспериментов по определению долговечности полиуретановых амортизаторов, работающих на сжатие в условиях динамического нагружения, проводился контрольный замер высоты амортизатора после 30 и 50 миллионов

нагружения. Контрольный замер показал постоянство размера после 15 миллионов нагружений.

Таким образом, мы можем считать что, область варьирования количества циклов нагружения, как независимой переменной лежит в пределах от 0 до 15 миллионов.

Приведенные выше сведения о физико-механических свойствах полиуретана при динамическом нагружении, необходимы для точного определения статической деформации проектируемого амортизатора, которая обеспечивает соосность коленчатого вала двигателя и входного вала приводного механизма [7].

Соосность установки двух связанных механизмов необходима потому что, если нормы несо-

осности не соблюдены или нарушены при работе агрегата, он будет иметь вибрации, вредно отражающиеся на самом агрегате и отрицательно действующие на соседние механизмы. Часто амплитуды вибраций, возникающих по причине несоосности, превышают пределы, которыми ограничивают вибрации, вызываемые действием неуравновешенных сил инерции и их моментов.

В отечественной машиностроительной практике согласно [8] смещение осей валов для всех видов соединительных устройств, установленное стандартами, допускается не более 0,05 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев, С.Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов / С.Н. Яковлев // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2013. - № 20(46) - С.78-80.
2. Huibo Zhang, Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers. Journal of Elastomers and Plastics. - 2008. - №40. - P. 161-177.
3. S. N. Yakovlev, Self-Oscillation of an Elastic Polyurethane Coating in Polishing. Russian Engineering Research. - 2014. - №5. - P. 295-298.
4. Govorcin Bajsic, E. Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters. Journal of Elastomers and Plastics. - 2003. - № 35. - P.311-323.
5. Челомей В.Н. Вибрации в технике. Справочник в 6ти томах / В.Н. Челомей – М.: Машиностроение, - 1978. – 352с.
6. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях / Г.С. Писаренко. - Л. : Издательство АН СССР, - 1962. – 385с.
7. Вольперт Э.Г. Динамика амортизаторов с нелинейными упругими элементами / Э.Г. Вольперт. – М.: Машиностроение, - 1972. - 136 с.
8. Дербаремдикер А.Д. Амортизаторы транспортных машин / А.Д. Дербаремдикер. – М.: Машиностроение, - 1985. - 200 стр.

REFERENCES

1. Jakovlev, S.N. O nekotoryh fizicheskikh svojstvakh konstrukcionnyh poliuretanov / S.N. Jakovlev // Izvestija SPbGTI(TU). - 2013. - № 20(46) - S.78-80.
2. Huibo Zhang, Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers. Journal of Elastomers and Plastics. - 2008. - №40. - P. 161-177.
3. S. N. Yakovlev, Self-Oscillation of an Elastic Polyurethane Coating in Polishing. Russian Engineering Research. - 2014. - №5. - P. 295-298.
4. Govorcin Bajsic, E. Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters. Journal of Elastomers and Plastics. - 2003. - № 35. - P.311-323.
5. Chelomej V.N. Vibracii v tehnike. Spravochnik v 6ti tomah / V.N. Chelomej – М.: Mashinostroenie, - 1978. – 352s.
6. Pisarenko G.S. Rassejanie jenerгии pri mehanicheskikh kolebanijah / G.S. Pisarenko. - L. : Izda-tel'stvo AN SSSR, - 1962. – 385s.
7. Vol'pert Je.G. Dinamika amortizatorov s nelinejnymi uprugimi jelementami / Je.G. Vol'pert. – М.: Mashinostroenie, - 1972. - 136 s.
8. Derbaremdiker A.D. Amortizatory transportnyh mashin / A.D. Derbaremdiker. – М.: Mashinostroenie, - 1985. - 200 str.

Поступило в редакцию 27.02.2017
Received 27.02.2017