

**АМОТИЗАТОР ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ
СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

А. А. Васильцов*, А. А. Липовцев

АО «Научно-производственный центр «Полус»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
*E-mail: polus@online.tomsk.net

В системах ориентации и стабилизации малогабаритных космических аппаратов широко используются двигатели-маховики. На сегодняшний день актуальна проблема уменьшения вредных возмущающих воздействий на них, вызванных погрешностями изготовления и сборки шарикоподшипниковых опор, неуравновешенностью ротора, электромагнитными силами.

Минимизация отрицательных воздействий отдельных узлов и элементов двигателя-маховика позволит улучшить динамические свойства и срок службы космического аппарата в целом.

Исходя из этого, рассмотрены основные причины возникновения указанных воздействий при работе двигателя-маховика и методы их уменьшения. Проведен краткий обзор существующих типов амортизаторов и принципов их работы. Описаны особенности применения данных устройств для систем ориентации и стабилизации на базе двигателей-маховиков.

Предложена оригинальная конструкция амортизатора для электродвигателя-маховика. Приведено описание его работы. По разработанным чертежам изготовлен образец амортизатора. Составлена методика измерения вибрационных характеристик. Проведены испытания с целью выявления влияния амортизатора на снижение вибрации двигателя, которые заключались в измерении характеристик двигателя-маховика в нормальных климатических условиях на свободном упругом подвесе без внешнего виброзащитного устройства, а также совместно с ним.

Приведены графики сравнения зависимостей виброскорости от частоты вращения ротора-маховика исследуемого двигателя по трем ортогональным осям без амортизатора и совместно с ним. Выявлено, что при установке амортизатора на космический аппарат уровень виброскорости снижается по сравнению с имеющимся на посадочной поверхности двигателя-маховика. Для определения этого снижения рассчитаны амплитудные коэффициенты эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика. Представлены соответствующие графики, из которых видно, что установка амортизатора между двигателем-маховиком и космическим аппаратом уменьшает уровень виброскорости, передаваемой на космический аппарат, до 3,5–4 раз (в среднем вдвое) и, следовательно, уменьшает вредные возмущающие моменты, передаваемые на космический аппарат.

Дано заключение о целесообразности применения разработанного амортизатора.

Ключевые слова: двигатель-маховик, вибрация, амортизатор, виброскорость, космический аппарат, возмущающий момент, неуравновешенность, испытания, график.

**THE SHOCK-ABSORBER FOR EXECUTIVE POWERS
OF SYSTEM OF STABILISATION OF A SPACECRAFT**

A. A. Vasil'tsov*, A. A. Lipovtsev

SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus"
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
*E-mail: polus@online.tomsk.net

Engines-flywheels are widely used in the systems of orientation and stabilization of a small-sized spacecrafts. Today the topical issue is reduction of harmful revolting influences on the engines-flywheels caused by errors of manufacturing and assemblage of ball-bearing support, a rotor-flywheel unbalance, electromagnetic influences.

Minimization of negative mechanical influences of separate knots and engine-flywheel elements will allow to improve dynamic properties and spacecraft service life as a whole.

In presented article principal causes of occurrence of harmful mechanical influences at engine-flywheel work are considered. The methods of their reduction are considered. The short review of existing types of shock-absorbers and principles of their work and described features of application of shock-absorbers for systems of orientation and stabilization on the base of engines-flywheels is regarded.

The construction of the shock-absorber for the electric motor-flywheel is offered. The description of work of the developed shock-absorber is achieved.

Under the developed drawings the development type of the shock-absorber is made. The technique of carrying out of measurement of vibrating characteristics is made.

The conducted tests are consisted of measurement of vibrating characteristics of the engine-flywheel in normal conditions on free elastic pendant without external vibroprotective devices and also together with it.

In the article the graphs of comparison of dependences vibrovelocity from frequency of rotation of a rotor-flywheel of the investigated engine on three orthogonal axes without the shock-absorber and together with it are presented.

It is revealed, that a shock-absorber installation on a spacecraft a level of vibrovelocity decreases in comparison with level of vibrovelocity on a landing surface of the engine-flywheel. For definition of quantity of this amplitude peak coefficients effectiveness ratio of application of the shock-absorber from frequency of rotation of a rotor-flywheel are calculated. Corresponding graphs show that shock-absorber installation between the engine-flywheel and a spacecraft are reduced a level of vibrovelocity, transferred to a space vehicle to 3,5–4 times (on the average in 2 times) and reduces quantity of the harmful revolting moments transferred to a spacecraft.

In conclusion, the detention about application of the developed shock-absorber is given.

Keywords: the engine-flywheel, vibration, the shock-absorber, vibrovelocity, a spacecraft, disturbing moment, an unbalance, testing, the graph.

Введение. Ужесточение требований к вибрационным характеристикам исполнительных органов космических аппаратов (КА), в частности электродвигателей-маховиков (ДМ), обуславливает необходимость введения в их конструкцию дополнительных виброзащитных устройств – амортизаторов, демпферов, способствующих снижению нежелательных вибраций, возникающих как внутри, так и вне прибора [1]. Основным требованием к таким устройствам является снижение вибраций от остаточной неуравновешенности ротора-маховика (даже при тщательном изготовлении его центр масс не совпадает с расчетным геометрическим центром, а ось вращения – с главной осью инерции, что приводит к статическому и динамическому дисбалансу), погрешности геометрической формы шариков, дорожек качения колец шарикоподшипника и прочих источников колебаний. В то же время такие устройства должны обладать высокими жесткостными и малыми массогабаритными характеристиками [2–5].

Типы амортизаторов и требования к ним.

Существует достаточно много типов амортизаторов (демпферов). Условно их можно разделить на две группы. Одни из них – пассивные, гасящие колебания за счет своих конструктивных свойств. В этой группе наиболее распространены динамические гасители колебаний, но их установка на КА неизбежно приводит к утяжелению конструкции. Другие – активные, принцип работы которых заключается в создании управляющего момента, компенсирующего возмущающие воздействия [6–8].

Но требования, предъявляемые к исполнительным органам системы ориентации и стабилизации КА, в частности к ДМ, не позволяют воспользоваться существующими типами амортизаторов. Основные причины этого – жесткий допуск ($1'-2'$) на отклонение главной оси прибора от заданного положения, а также ограничения на массогабаритные характеристики. Помимо указанного, амортизаторы для ДМ

имеют недостаточную теплопроводность (для отведения тепла от двигателя на КА) и не обеспечивают гашение колебаний в широком диапазоне частот.

Амортизатор должен обладать упругими свойствами, представленными на рис. 1 упругим элементом 1, и вязкими свойствами (демпирующим элементом 2). Комбинация свойств элементов 1 и 2 дает возможность расширить диапазон демпфирования возмущающих моментов [9–11].

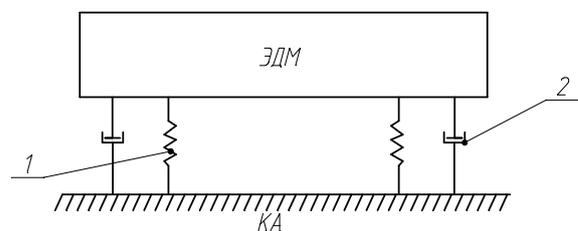


Рис. 1. Структурная схема амортизатора

Описание конструкции разработанного амортизатора. Исходя из вышесказанного, разработан амортизатор (рис. 2), который устанавливается на основание ДМ, а затем эта единая конструкция – на КА. Причем одна из поверхностей амортизатора в точности повторяет установочную поверхность КА, а другая – ДМ, что позволяет не вводить никаких дополнительных изменений в конструкцию двигателя.

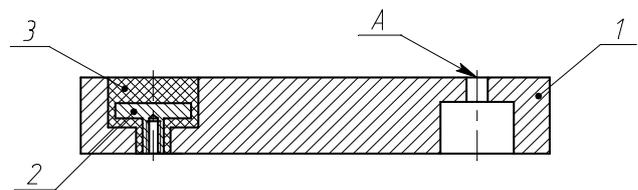


Рис. 2. Конструкция амортизатора

Основу амортизатора составляет кольцо из алюминийно-магниевого сплава 1, в котором имеются места крепления кольца к ДМ (отверстия А) и места крепления к КА (втулки 2). Между втулками 2 и кольцом 1 расположены полимерные составы 3 с различными демпфирующими свойствами, что позволяет расширить диапазон рабочих частот [12].

Испытания амортизатора. При проведении испытаний амортизатор устанавливался на ДМ по схеме, приведенной на рис. 3.

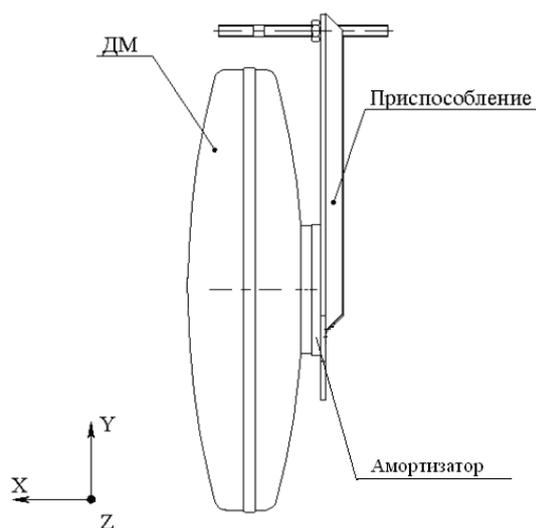


Рис. 3. Схема установки амортизатора на ДМ для измерения вибрационных характеристик

Проведенные испытания заключались в измерении вибрационных характеристик двигателя-маховика в нормальных климатических условиях на свободном упругом подвесе без внешнего виброзащитного устройства, а также совместно с ним.

Запись вибрационных характеристик двигателя проводилась в диапазоне частот вращения от 200 до (6000 ± 100) об/мин при горизонтальном расположении вала. Шаг измерения вращения ротора-маховика составлял 100 об/мин [13–15].

Результаты испытаний. Из графиков сравнения зависимостей виброскорости от частоты вращения ротора-маховика блока ДМ по трем ортогональным осям без амортизатора и совместно с ним (рис. 4–6) следует, что на посадочной поверхности ДМ с амортизатором уровень виброскорости заметно снижается по сравнению с уровнем виброскорости на посадочной поверхности ДМ без амортизатора.

Для определения уровня этого снижения рассчитаны амплитудные коэффициенты эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика (рис. 7–9), определяемые по соотношению

$$K_{\text{эфф}} = \frac{A_{\text{ДМ}}}{A_{\text{ДМ+ам}}},$$

где $A_{\text{ДМ}}$ – амплитудное значение виброскорости на посадочной поверхности ДМ; $A_{\text{ДМ+ам}}$ – амплитудное значение виброскорости на посадочной поверхности амортизатора, предназначенной для контакта с КА.

Из графиков видно, что установка амортизатора между ДМ и КА снижает уровень виброскорости, передаваемой на КА, до 3,5–4 раз (в среднем вдвое) и, следовательно, уменьшает уровень возмущающих моментов, передаваемых на КА. При этом указанное снижение достигается увеличением массы ДМ на 175 г.

Возможное применение. Существует несколько возможных схем применения данного амортизатора: как отдельного блока с копированием установочных отверстий посадочной плоскости ДМ, что позволяет избежать внесения изменений в конструкцию уже разработанных приборов, или как интегрированного в конструкцию вновь разрабатываемого устройства, что обеспечит выигрыш в массе за счет использования общих конструктивных элементов.

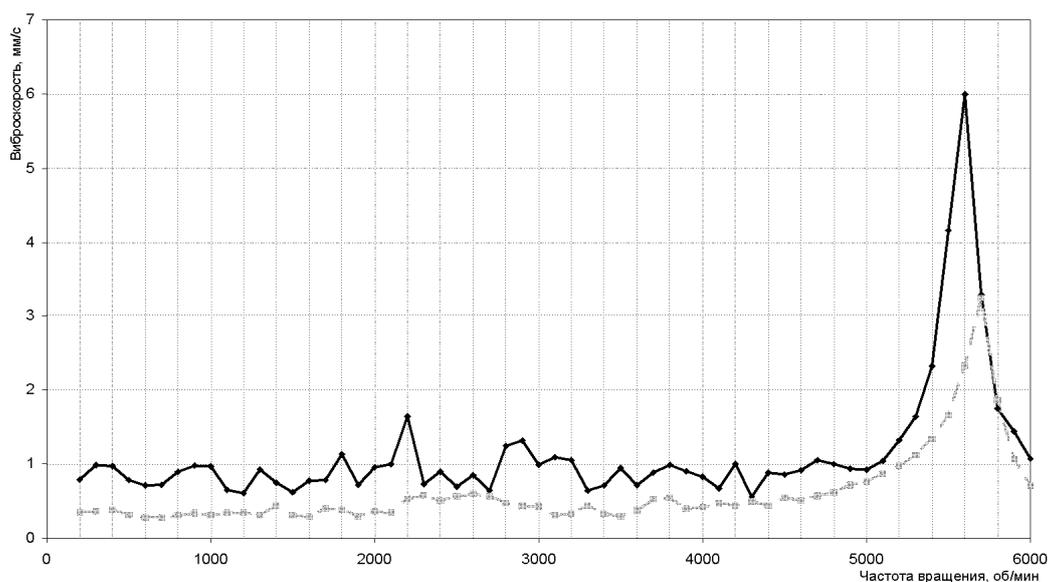


Рис. 4. Зависимость амплитуды виброскорости от частоты вращения ротора-маховика по оси X с амортизатором (----) и без него (—)

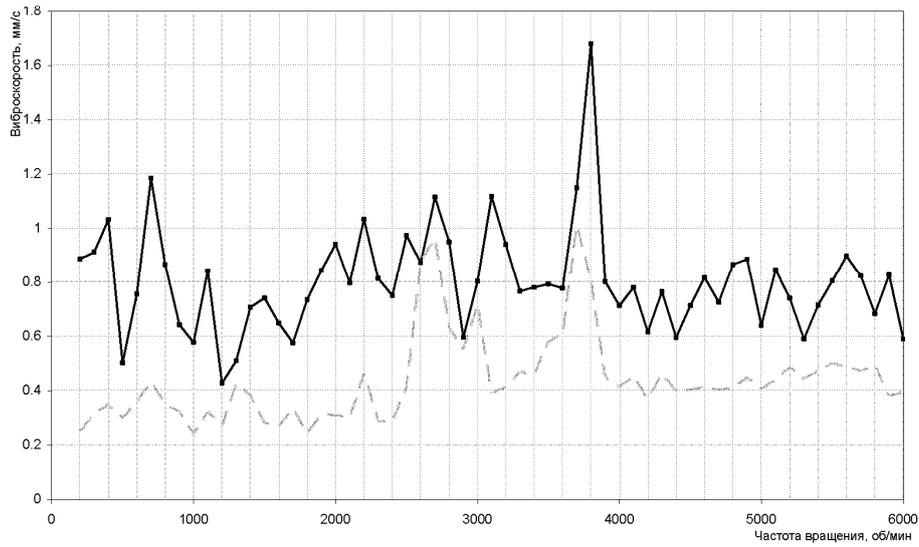


Рис. 5. Зависимость амплитуды виброскорости от частоты вращения ротора-маховика по оси Y с амортизатором (----) и без него (—)

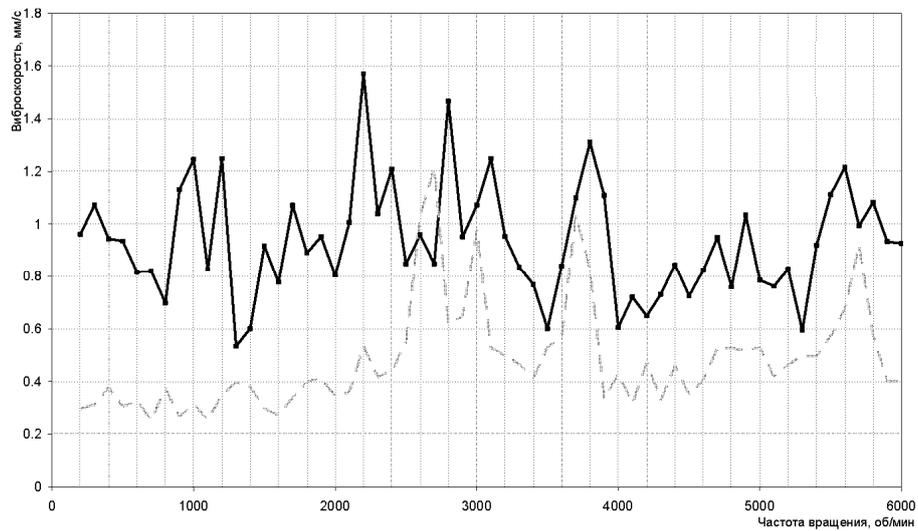


Рис. 6. Зависимость амплитуды виброскорости от частоты вращения ротора-маховика по оси Z с амортизатором (----) и без него (—)

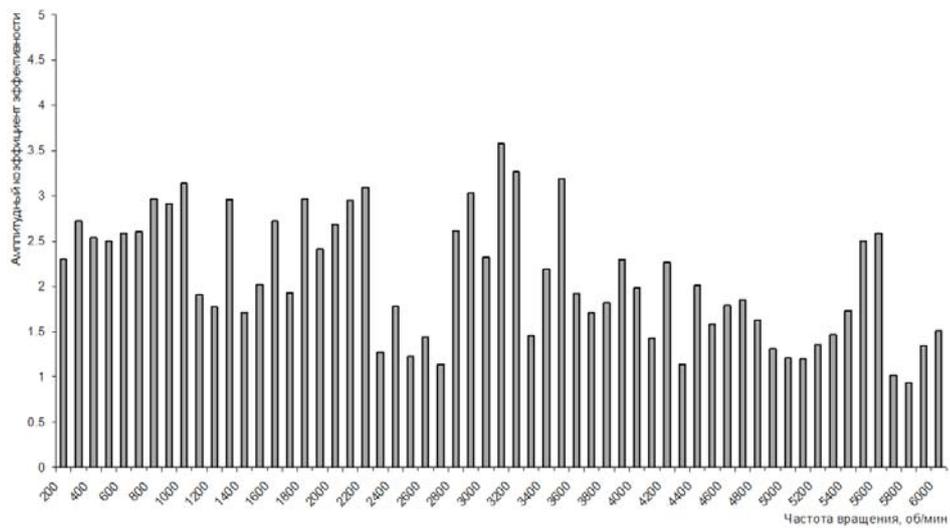


Рис. 7. Зависимость амплитудного коэффициента эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика по оси X

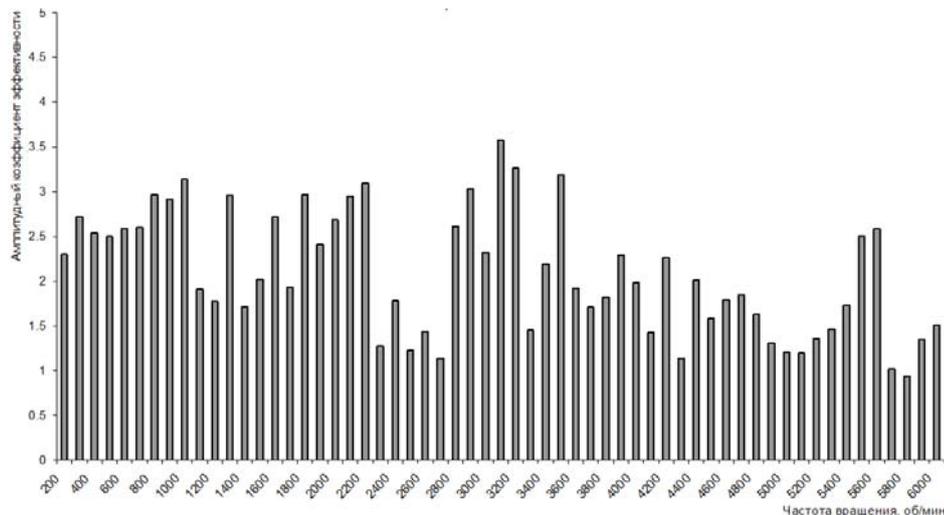


Рис. 8. Зависимость амплитудного коэффициента эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика по оси Y

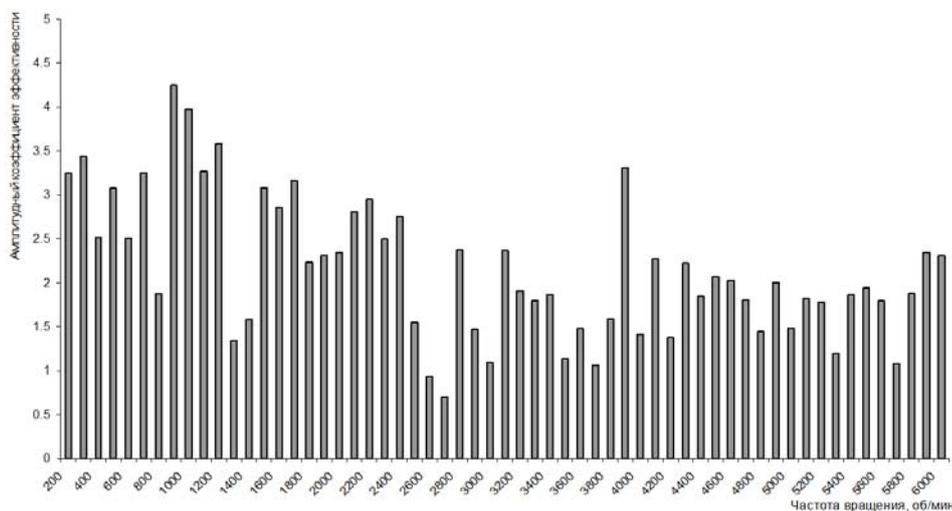


Рис. 9. Зависимость амплитудного коэффициента эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика по оси Z

Заключение. Таким образом, разработанный амортизатор обладает хорошими демпфирующими свойствами и жесткостью, а небольшие массогабаритные характеристики и простота изготовления конструкции позволяют применять его с минимальными доработками в различных приборах, выпускаемых на предприятии.

Библиографические ссылки

1. Гладышев Г. Н., Дмитриев В. С., Копытов В. И. Системы управления космическими аппаратами (Исполнительные органы: назначение, принцип действия, схемы, конструкция) : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2000. 207 с.
2. Влияние жесткости силовых элементов конструкции на величину критической скорости исполнительного органа на базе управляемого по скорости двигателя-маховика (УДМ) / Ю. А. Бритова [и др.] // Контроль. Диагностика. 2012. № 11. С. 24–27.

3. Журавлев В. Ф., Бальмонт В. Б. Механика шарикоподшипников гироскопов / под ред. Д. М. Климова. М. : Машиностроение, 1985. 272 с.
4. Приборные шариковые подшипники : справочник / под ред. К. Н. Явленского [и др.] М. : Машиностроение, 1981. 351 с.
5. Васильцов А. А. Пути минимизации возмущающих воздействий двигателей-маховиков // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XVIII науч.-техн. конф (22–23 апр. 2010, г. Томск) / ОАО «НПЦ «Полус». Томск, 2010. С. 197, 198.
6. Ковалев М. П. Опоры и подвесы гироскопических устройств. М. : Машиностроение, 1970. 286 с.
7. Биргер И. А., Шорр Б. А., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин : справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1979. 702 с. : ил.
8. Ли Мин. Демпфирование резонансных колебаний гироскопических систем активным динамическим

гасителем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009.

9. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов : справ. пособие / В. Н. Блинов [и др.] // Малые космические аппараты. В 3 кн. Кн. 3. Мини-спутники. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. 348 с.

10. Исакович М. М., Клейман Л. И., Перчанок Б. Х. Устранение вибрации электрических машин. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с. : ил.

11. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергия, 1973. 200 с.

12. Васильцов А. А. Анализ и выбор конструкций амортизаторов для электромеханических устройств // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XVIII науч.-техн. конф (10–11 апр. 2008, г. Томск) / ОАО «НПЦ «Полюс». Томск, 2008. С. 108–110.

13. Сергеев С. И. Демпфирование механических колебаний. Физматгиз, 1959. 439 с.

14. ГОСТ 16819–71. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1988.

15. Иориш Ю. И. Измерение вибраций. Общая теория, методы и приборы. М. : Машгиз, 1956. 404 с.

References

1. Gladyshev G. N., Dmitriev V. S., Kopytov V. I. *Sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami (Ispolnitel'nye organy: naznachenie, printsip deystviya, skhemy, konstruktsiya)* [Control systems of spacecrafts (Executive powers: appointment, a principle of operation, the schemes, a construction)] Tomsk, TPU Publ., 2000, 207 p.

2. Britova Yu. A. et al. [Influence rigidity of power elements of construction on size of critical speed of an executive powers on the base of the engine-flywheel operated on speed]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2012, no. 11, p. 24–27 (In Russ.).

3. Zhuravlev V. F., Bal'mont V. B. *Mekhanika sharikopodshipnikov giroskopov* [Mechanics of ball-bearings of gyroscopes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 272 p.

4. *Pribornye sharikovye podshipniki* [Instrument ball bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 351 p.

5. Vasil'tsov A. A. [Means of minimisation of perturbation influence of engines-flywheels]. *Elektronnie i elektromekhanicheskie sistemy I ustroystva. Tez. dokl. XVIII nauch.-tekhnich. Konf (Tomsk, 22-23 apr. 2010)*.

[Electronic and electromechanical systems and devices: mes. rep. XVIII scientific and engineering. conf (Tomsk, 22–23 April. 2010)]. JSC “NPC “Polyus”. Tomsk, 2010, p. 197,198.

6. Kovalev M. P. *Opory i podvesy giroskopicheskikh ustroystv*. [Bearing and gimbals of gyroscopic equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 286 p.

7. Birger I. A., Shorr B. A., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Calculations details of machines on durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 702 p.

8. Li Min. *Dempfirovanie rezonansnykh kolebanij giroskopicheskikh sistem aktivnym dinamicheskim gasitelem. Dis. kandidat. technich. nauk.* [Decrement resonant frequency of gyroscopic systems by active dynamic extinguisher. Author. Dis. Cand. Tehn. Sciences.]. Moscow, 2009.

9. Blinov V. N. et al. *Unifitsirovannye kosmicheskie platformy dlya malykh kosmicheskikh apparatov. Spravochn. posobie* [The unified space platforms for small spacecrafts. Grant manual]. Omsk, 2010, 348 p.

10. Isakovich M. M., Kleyman L. I., Perchanok B. Kh. *Ustranenie vibratsii elektricheskikh mashin*. [Elimination of vibration in electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 200 p.

11. Shubov I. G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin*. [Din and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 200 p.

12. Vasil'tsov A. A. [Analysis and selection construction of the shock-absorber for electrical devices]. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: tez. dokl. XVIII nauch.-tekhn. Konf.* [Electronic and electromechanical systems and devices: mes. rep. XVIII scientific and engineering. conf (Tomsk, 10–11 April. 2008)]. JSC “NPC “Polyus”, Tomsk, p. 108–110 (In Russ.).

13. Sergeev S. I. *Dempfirovanie mekhanicheskikh kolebanij* [Decrement of mechanical oscillation]. Fizmatgiz Publ., 1959, 439 p.

14. *GOST 16819–71 Pribory vibroizmeritel'nye. Terminy i opredeleniya* [State Standart 16819–71. Vibration-survey devices. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1988 (In Russ.).

15. Iorish Yu. I. *Izmerenie vibratsiy. Obshchaya teoriya, metody i pribory*. [Measuring of vibration. General theory, methods and devices]. Moscow, Mashizd Publ., 1956, 404 p.