

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

С. В. Топильская*, Д. С. Бородулин, А. В. Корнюхин

Филиал ФГУП «Центр эксплуатации наземной космической инфраструктуры» –
Научный исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова
Российская Федерация, 111024, г. Москва, ул. Пруд ключики, 12а
*E-mail: s.v.topilskaya@mail.ru

Представлены типы гироскопических измерителей вектора угловой скорости разработки и изготовления НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова на базе динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ) с газодинамической опорой. Это два варианта конструкции малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости (МБИС), предназначенного для системы ориентации космических аппаратов (КА), разрабатываемых и изготавливаемых в АО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнева». Также представлен третий вариант конструкции МБИС, разрабатываемый для КА иностранного заказчика, в рамках разработки которого решалась задача по повышению стойкости к внешним механическим воздействиям модернизированного МБИС.

Даны общие технические характеристики гироскопических приборов типа МБИС (габаритно-массовые параметры, точность измерения, количество измерительных осей, ресурс работы, энергопотребление и т. д.).

Представлены преимущества и недостатки выбранного гироскопа (ДНГ) в качестве чувствительного элемента. Преимуществами являются средняя точность измерения при небольших габаритно-массовых характеристиках и при длительном ресурсе работы. Недостаток – необходимость применения системы амортизации в составе гироскопических приборов (типа МБИС), специальной системы, предназначенной для защиты чувствительных элементов от внешних механических нагрузок, действующих при выведении ракетой-носителем КА.

Оригинальность и новизна представленных исследований заключается в их прикладном назначении. Исследуется конструкция конкретного прибора. Решается задача по моделированию происходящих в приборе физических процессов, связанных с внешними возмущающими факторами. Полученные результаты использованы для обеспечения стойкости приборов типа МБИС к внешним механическим нагрузкам, действующим в процессе выведения КА на орбитальный участок полета.

Изложены основные принципы обеспечения стойкости к данным воздействиям. Приведена упругая расчетная модель системы амортизации прибора, позволяющая подбирать ее вибродинамические параметры (резонансная частота и коэффициент передачи). Представлены теоретические результаты моделирования и конкретные практические результаты отработки МБИС при проведении вибродинамических испытаний.

Теоретический и практический результат работы определяется обоснованными результатами работы системы амортизации в составе приборов типа МБИС, возможностью использования опыта данной работы при разработке новых приборов систем ориентации и навигации с повышенными показателями отказоустойчивости, надежности и стойкости к внешним механическим воздействиям.

Ключевые слова: угловая ориентация, гироскопический измеритель, вибрационная стойкость, система амортизации.

Siberian Journal of Science and Technology. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 332–343

PROTECTING MODERN COMPACT GYROSCOPIC ANGULAR RATE MEASUREMENT FROM MECHANICAL INFLUENCE

S. V. Topilskaya*, D. S. Borodulin, A. V. Kornuhin

Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics
12a, Prud Kliuchiki Str., Moscow, 111024, Russian Federation
*E-mail: s.v.topilskaya@mail.ru

The article considers the types of a compact gyroscopic angular rate measurement, which were designed and developed in Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics. The devices are based on the dynamically adjusted gyroscope with a rotor gas-lubricated spin-axis bearing system. Two types of the compact gyroscopic angular rate measurement are intended to Russian space crafts. Third of them are intended to the foreign space crafts. Three gyros

are sensing elements for the compact gyroscopic angular rate measurement. Disposition of gyro into gyroscopic is the main difference of these types of the compact gyroscopic angular rate measurement.

The main goal of this article is to make a research of mechanical influences on the compact gyroscopic angular rate measurement and to create the protecting systems of gyro from the mechanical influence on a new gyroscopic device.

The article considers the main technical characteristics of gyroscopic device: dimensions, weight, accuracy of measurements, and number of measuring axes, resource of work device, energy consumption and so on.

The paper describes advantages and disadvantages of the dynamically adjusted gyroscope with a rotor gas-lubricated spin-axis bearing system. There are the following advantages: dimensions, weight, accuracy of measurements, and number of measuring axes, resource of work device. The disadvantage is a necessity to protect systems from the mechanical influence on launching rockets.

The article considers the main principles of protecting systems. It's about a theoretical model system of protection of the gyroscopic device from mechanical resistance and theoretical information. Due to a theoretical model it's possible to choose constructional characteristics of the protecting system from mechanical influences during a design stage. It's about dimensions spring and damper. Criterion for the choice is acceptable for the dynamical characteristics of gyro.

The article has also saved the results of the mechanical test of the gyroscopic device.

Keywords: angular orientation, gyroscopic device, protection systems from mechanical influence.

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-332-343

Введение. Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова (НИИ ПМ) разрабатывает гироскопы для систем ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА) на базе динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ), проводит их наземную отработку [1; 2].

Преимуществом применения ДНГ в составе конструкции гироскопов являются его небольшие габариты, средняя точность измерения, наличие двух осей чувствительности и газодинамической опоры, позволяющей обеспечивать длительный ресурс эксплуатации приборов (порядка 140000 часов) [3; 4].

Одним из таких разрабатываемых и изготавливаемых в НИИ ПМ приборов является малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловой скорости.

Разрабатываемые НИИ ПМ малогабаритные гироскопы на базе ДНГ. Малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловой скорости (рис. 1) был разработан в виде моноблока и получил название малогабаритного блока измерения угловых скоростей (МБИС), он предназначен для измерения и выдачи информации о приращении интегралов проекций вектора угловой скорости КА на шесть измерительных осей, связанных с ортогональной приборной системой координат. Чувствительность измерения МБИС (0,3 угловой секунды) была реализована при наземной отработке, натурной эксплуатации в составе платформы «Эксперсс-1000», КА «ГЛОНАСС-К» головного заказчика АО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнева» (рис. 1) [5].

МБИС был разработан с частичным применением импортной элементной базы в составе сервисных электронных устройств ДНГ, обеспечивающих обмен информацией с системой управления КА.

В рамках государственной программы по переходу с импортной элементной базы на отечественную НИИ ПМ модернизировал конструкцию МБИС и провел квалификационные испытания по подтверждению его технических характеристик (табл. 1). Масса прибора – 6,1 кг, габаритные размеры – 258 × 204 × 170 мм.

В целях уменьшения габаритно-массовых характеристик МБИС в НИИ ПМ был разработан МБИС с техническими характеристиками, представленными в табл. 1, но с применением полностью импортной элементной базы (рис. 2). Данный прибор подтвердил свои характеристики при проведении квалификационных испытаний в объеме, предусмотренном для МБИС, изготавливаемого по заказу АО «ИСС». Масса прибора – 4,5 кг и габаритные размеры – 258 × 204 × 142 мм.

Для повышения отказоустойчивости приборов типа МБИС в НИИ ПМ был разработан третий модернизированный вариант МБИС – механический модуль малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости (рис. 3). Данный прибор разработан для иностранного заказчика. Модернизированный МБИС представляет собой только механическую часть: корпус с установленным на него блоком чувствительных элементов (БЧЭ), закрытый кожухом. Сервисные электронные устройства ДНГ разрабатывает заказчик.

Модернизация МБИС заключается в повышении его отказоустойчивости за счет применения неортогональной кинематической схемы расположения трех ДНГ относительно ортогональной системы координат. В ранее разрабатываемых МБИС была применена взаимортогональная схема расположения трех ДНГ относительно ортогональной приборной системы координат [6].

Выбор в качестве чувствительного элемента ДНГ позволяет обеспечить требуемый ресурс работы МБИС 15 лет [2], точность измерения 0,1 угловой секунды (автономная точность измерения ДНГ составляет 0,01 угловой секунды). ДНГ, применяемый в приборах типа МБИС, разработан в НИИ ПМ [6]. Показатель безотказности работы МБИС определяется выбранной кинематической схемой расположения ДНГ относительно приборной системы координат. Дополнительно надежность работы прибора определяется стойкостью к внешним факторам: радиационным (факторам космического пространства), тепловым, механическим [7] и т. д.



Рис. 1. Фото МБИС

Fig. 1. Photo of the compact gyroscopic angular rate measurement

Таблица 1

Основные технические характеристики прибора

Характеристики прибора	Единицы измерения	Режим грубого функционирования	Режим точного функционирования
Диапазон работоспособности	град/с	Не менее ± 30	Не менее ± 15
Диапазон измерения угловых скоростей	град/с	Не менее ± 8	Не менее ± 4
Номинальное значение масштабного коэффициента	%	В пределах ± 10	В пределах ± 1
Случайная составляющая нулевого сигнала, не зависящего от перегрузки, в запуске до 24 ч	град/ч (с)	–	0,02
Количество измерительных осей		6	
Информационный интерфейс		ГОСТ Р 52070–2003	
Напряжение питания постоянным током, В	В	23–28	
Потребляемая мощность	Вт	Не более 47	
Температура теплоотводящей поверхности	$^{\circ}\text{C}$	–20–40	
Ресурс работы	ч	138000	
Срок эксплуатации	лет	19	
Масса прибора	кг	6	
Габаритные размеры	мм	258 x 204 x 170	
Стадия разработки		Летная эксплуатация	

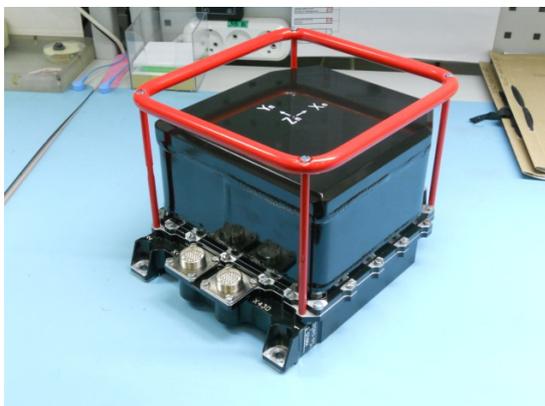


Рис. 2. МБИС на импортной элементной базе

Fig. 2. Photo of the compact gyroscopic angular rate measurement based on the foreign electronics

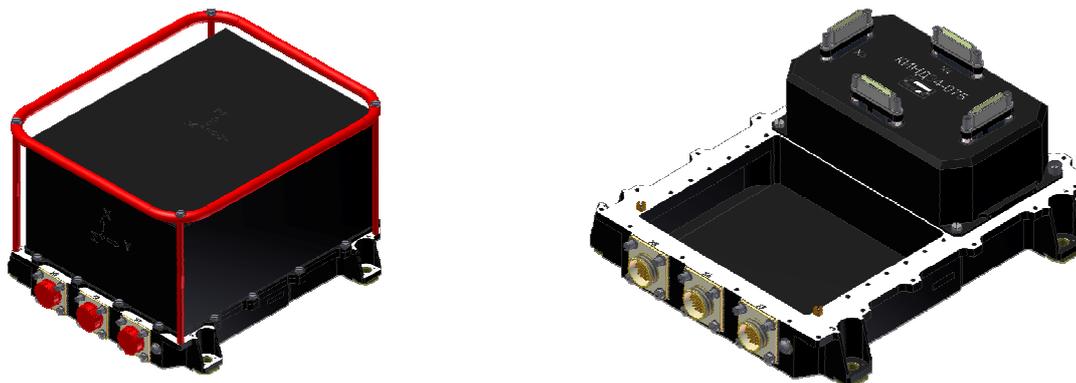


Рис. 3. Модернизированный МБИС

Fig. 3. Mechanical part of the compact gyroscopic angular rate measurement designed for the foreign specifier

Постановка задачи. Целью данной работы является задача по обеспечению стойкости модернизированного МБИС к внешним механическим воздействиям.

Задача была решена на основе опыта разработки и изготовления МБИС для российского головного заказчика.

Чувствительный элемент как объект защиты от механических воздействий. В качестве чувствительного элемента приборов типа МБИС выбран ДНГ. Конструктивно ДНГ представляет собой маховик, установленный на валу с помощью внутреннего упругого карданного подвеса. Вал вращается на газодинамической опоре (ГДО) с помощью электродвигателя [8; 9].

Согласно проведенному прочностному расчету конструкции ДНГ действующее на ДНГ ускорение не должно превышать 100 g [4; 10; 11].

Теоретическая оценка вибродинамических характеристик ДНГ показала, что резонансная частота находится в высокочастотном диапазоне 1500–1800 Гц с коэффициентом передачи $Q = 100$ [12].

При оценке уровня возникающих ускорений на месте установки ДНГ в конструкции прибора МБИС при механических воздействиях выведения КА на орбиту выявлено, что без применения специальных мер защиты ДНГ на БЧЭ возникнет ускорение порядка 600 g, в шесть раз превышающее допустимое значение 100 g [7].

Моделирование работы системы, обеспечивающей стойкость к механическим воздействиям гироскопического прибора. Для того, чтобы обеспечить требование по стойкости к механическим воздействиям, в конструкции МБИС применен один из способов защиты, заключающийся:

- в разнесении собственной частоты установки блока чувствительных элементов (где расположены три ДНГ) с собственной частотой ДНГ за счет применения пружин-амортизаторов [13; 14];

- в применении ударных виброгасителей колебаний (УВГ) для уменьшения амплитуды колебаний блока чувствительных элементов на резонансе [14; 15].

При непосредственной установке блока чувствительных элементов на корпус прибора (без применения амортизаторов) его резонансная частота будет находиться в высокочастотном диапазоне 1000–2000 Гц, т. е. в области резонансной частоты ДНГ. Этот факт приведет к совпадению резонансных частот ДНГ с частотой установки блока чувствительных элементов на корпус прибора и, как следствие, к увеличению амплитуды его колебаний, приводящей к возможному разрушению конструкции ДНГ.

Высокая динамичность конструкций ДНГ и блока чувствительных элементов (добротность $Q = 50–100$ у каждого) не позволяют ограничиться применением только УВГ в составе системы амортизации БЧЭ. Система амортизации МБИС требует применения специальных конструктивных элементов, позволяющих разнести резонансные частоты БЧЭ и ДНГ, – амортизаторов.

При разработке первых приборов типа МБИС проводилась теоретическая оценка параметров системы амортизации исходя из требования по уменьшению значений откликов элементов конструкции прибора на внешние механические воздействия. Теоретическая оценка проводилась без использования универсальной расчетной модели. В результате, при отработке первых опытных образцов проводились доработки конструкции на этапе проведения первых испытаний опытного образца для решения задачи по обеспечению его стойкости к внешним механическим воздействиям.

На основе опыта разработки и изготовления приборов типа МБИС для отечественного головного заказчика при проектировании модернизированного МБИС для иностранного заказчика была разработана универсальная расчетная модель системы амортизации, позволяющая осуществлять подбор ее конструктивных параметров (параметры пружины, масса грузов УВГ, величина зазоров в УВГ).

Схема универсальной расчетной модели представлена на рис. 4. Исходными данными для нее являются:

- масса БЧЭ, определяемая расположением ДНГ на основании;
- собственная частота ДНГ.

Применяя данный способ компьютерного моделирования, при известных начальных условиях выбирались параметры СА:

- геометрические размеры пружины (амортизатора);
- величина зазора в конструкции УВГ;
- масса грузов в конструкции УВГ.

Подбор данных параметров проводился на основе обеспечения допустимого уровня значений перегрузок для ДНГ (не более 100 g).

УВГ обеспечивают демпфирование колебаний на резонансной частоте БЧЭ за счет совершения ударов между грузами в конструктивно предусмотренных зазорах. Величина массы грузов и зазоров выбрана исходя из реализации коэффициента передачи 10 на резонансной частоте установки блока чувствительных элементов 150 Гц. Собственная частота блока чувствительных элементов 150 Гц находится вне резонансной зоны ДНГ и вне зоны действия низкочастотной синусоидальной вибрации 5–100 Гц, не совпадает

с частотой воздействия ударных нагрузок (длительностью $\tau = 2-3$ мс для МБИС российского головного заказчика и $\tau = 10 \pm 1$ мс для модернизированного МБИС иностранного заказчика). Значение собственной частоты выбрано исходя из уменьшения значения возникающего ускорения при действии широкополосной случайной вибрации.

Основной сложностью при создании системы амортизации является выбор параметров УВГ (массы грузов, параметров резиновой прокладки и величины зазора).

В результате проведенного моделирования, используя универсальную расчетную модель системы амортизации (рис. 4), были определены основные параметры УВГ и амортизатора.

На рис. 5 представлена расчетная виброграмма распределения возникающих ускорений во времени на резонансной частоте колебаний БЧЭ при подобранных геометрических параметрах СА, приведенных далее по тексту статьи.

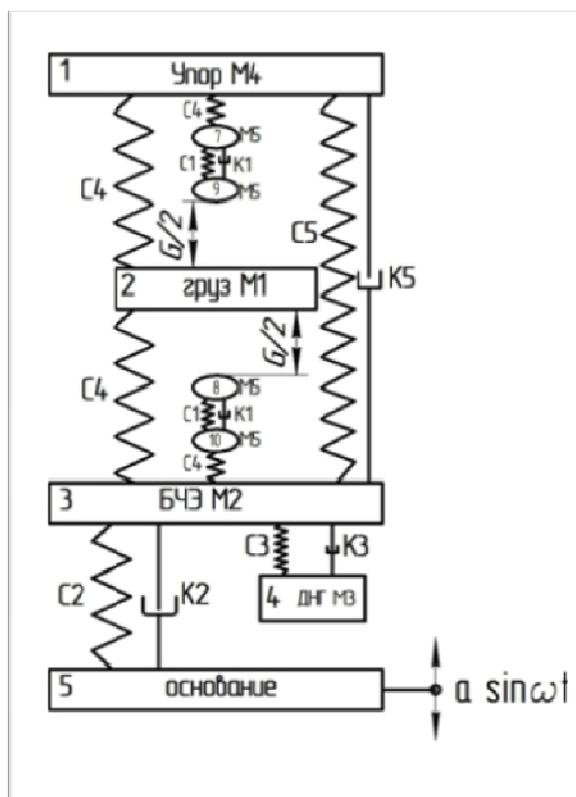


Рис. 4. Упруго-механическая модель системы амортизации:

M1 – масса груза УВГ; M2 – масса БЧЭ; M3 – масса ДНГ;
 M4 – масса стержня УВГ; M5 – масса резиновой прокладки;
 C1/K1 – жесткость/демпфирование резиновой прокладки;
 C2/K2 – жесткость/демпфирование амортизатора;
 C3/K3 – жесткость/демпфирование ДНГ; C4 – жесткость УВГ;
 C5/K5 – жесткость/демпфирование стержня УВГ; G – зазор

Fig. 4. Elasto-mechanical model of shock absorption system:

M1 – lading weight UVG; M2 – weight BCHE; M3 – weight DNG;
 M4 – core weight (UVG); M5 – rubber pad weight; C1/K1 – rigidity/ rubber
 pad damping; C2/K2 – rigidity/shock reducer damping; C3/K3 – rigidity/ damping
 DNG; C4 – rigidity UVG; C5/K5 – rigidity/ core damping UVG; G – looseness

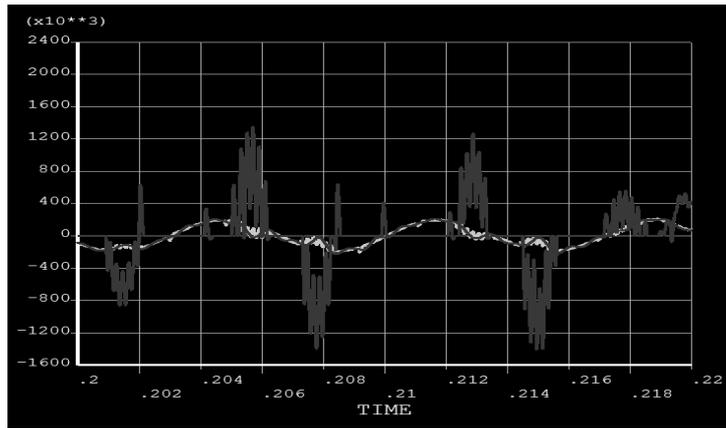


Рис. 5. Виброграмма БЧЭ при $G = 0,7-0,8$ мм в демпфере

Fig. 5. Theoretical vibration record of base frame for gyroscopes. Gap in damper is 0,7–0,8 mm

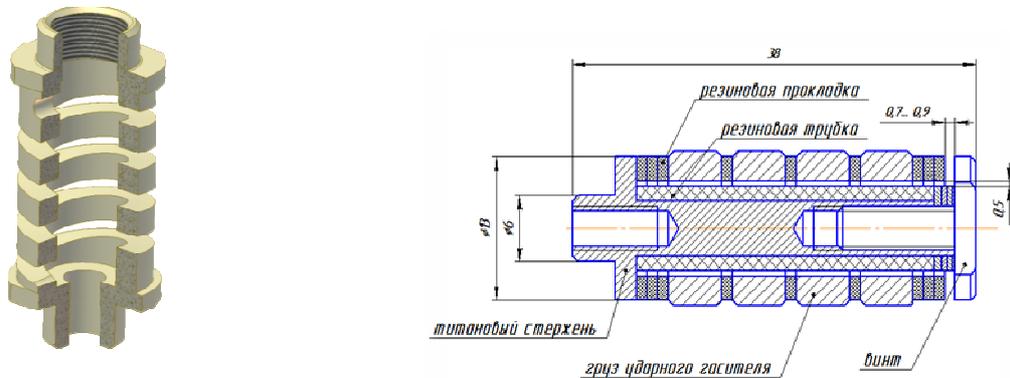


Рис. 6. Элементы системы амортизации

Fig. 6. Main elements of protecting systems from mechanical influence

Разработанная расчетная модель СА позволила подобрать вибродинамические параметры СА, оценивая перегрузку на месте установки ДНГ.

Конструкция системы амортизации для обеспечения стойкости к механическим воздействиям гироскопических приборов. Выбранная система амортизации БЧЭ МБИС конструктивно состоит из четырех амортизаторов и четырех УВГ (рис. 6).

Подобранная жесткость амортизаторов 25 кгс/мм позволяет обеспечить собственную частоту БЧЭ в области значений низких частот 150 Гц.

В качестве амортизатора предложена витая пружина квадратного сечения. Величина квадратного сечения – 3×3 мм, число витков – 4, длина пружины – 18 мм.

В качестве УВГ выбрана конструкция, представляющая собой металлический стержень, на котором установлена резиновая трубка, грузы (масса четырех грузов каждого УВГ составляет 48 г при наружном диаметре каждого груза 16 мм, внутреннем – 8,6 мм, высоте – 5 мм) и между ними – резиновые прокладки толщиной 1 мм. Грузы могут свободно перемещаться в осевом и радиальном направлениях в предвари-

тельно установленных зазорах 0,7–0,9 мм. В целях уменьшения габаритно-массовых характеристик СА материалом груза является сплав ВМ5-3 ТУ 48-19-85-83, обладающий плотностью $\rho = 17$ г/см³.

Для того, чтобы работа УВГ не способствовала дополнительным угловым колебаниям БЧЭ, центр масс пружин амортизаторов расположен в одной плоскости с центром масс четырех УВГ.

Практические результаты отработки системы, обеспечивающей стойкость к механическим воздействиям. Выбранная модель СА была отработана при проведении вибродинамических испытаний приборов типа МБИС (наземных испытаний), подтвердила свою работоспособность при натурной эксплуатации МБИС в составе КА навигационной группировки ГЛОНАСС.

На рис. 7 представлена амплитудно-частотная характеристика БЧЭ МБИС, подтверждающая верность проведенного расчета. На рис. 8 – виброграммы БЧЭ при действии ШСВ ($s_{\text{зад}} = 16$ g), на рис. 9 – виброграмма БЧЭ при действии низкочастотной синусоидальной вибрации в диапазоне частот $f = 5-100$ Гц амплитудой $A = 15$ g, на рис. 10 – виброграмма БЧЭ

при ударном воздействии длительностью $\tau = 2$ мс, амплитудой $A = 60$ г и $A = -60$ г.

Результаты проведенных работ по повышению стойкости к внешним механическим воздействиям модернизированного МБИС. Модернизированный МБИС имеет ряд конструктивных отличий от своих предшественников (МБИС для российских КА). Критичными для выбора параметров системы амортиза-

ции гироскопов являются габаритно-массовые и жесткостные характеристики БЧЭ. В модернизированном МБИС чувствительные элементы расположены неортогонально для повышения отказоустойчивости работы прибора. Данное конструктивное расположение привело к увеличению массы БЧЭ на 200 г и его габаритных размеров, но с сохранением жесткости и симметричности конструкции.

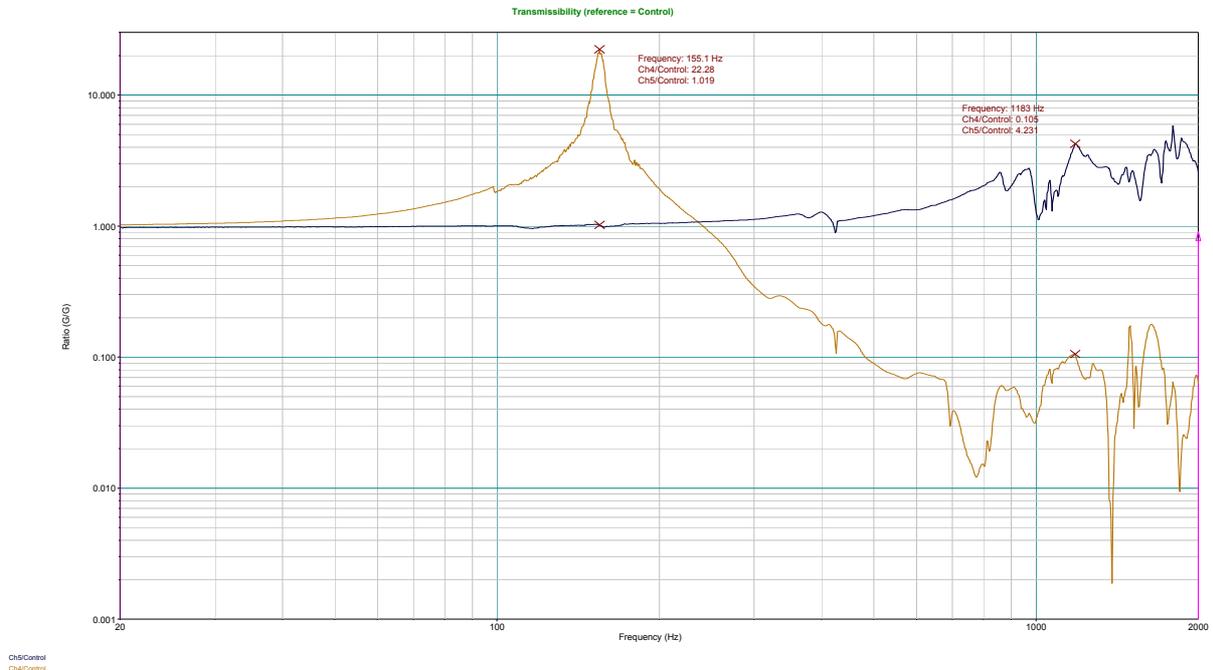


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика БЧЭ МБИС

Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics of the compact gyroscopic angular rate measurement

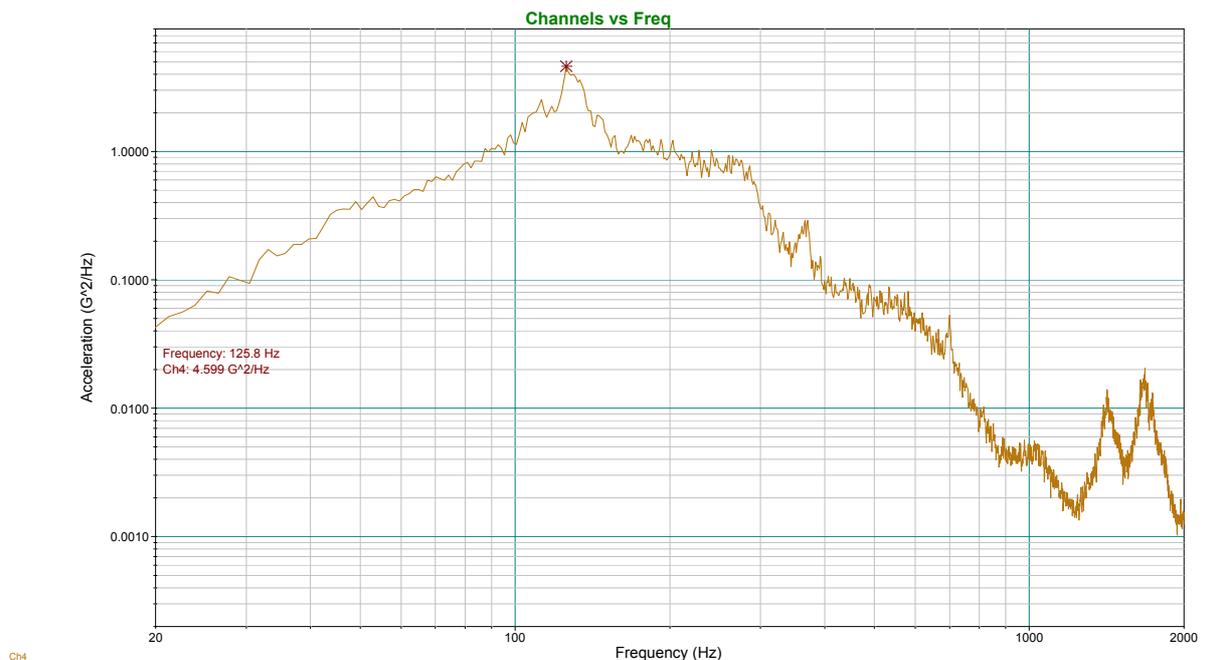


Рис. 8. Распределение спектральных плотностей при действии ШСВ

Fig. 8. Vibration record of the compact gyroscopic angular rate measurement during random vibrations

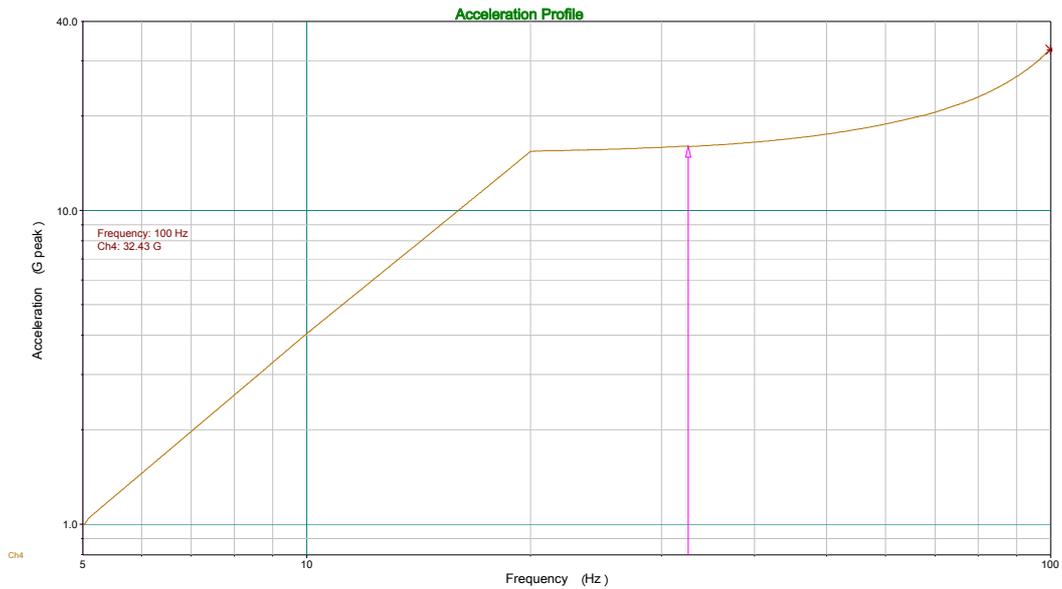


Рис. 9. Виброграмма БЧЭ при действии низкочастотной синусоидальной вибрации в диапазоне частот 5–100 Гц амплитудой $A = 15$ g

Fig. 9. Vibration record of the compact gyroscopic angular rate measurement during low frequency 5–100 Hz $A = 15$ g

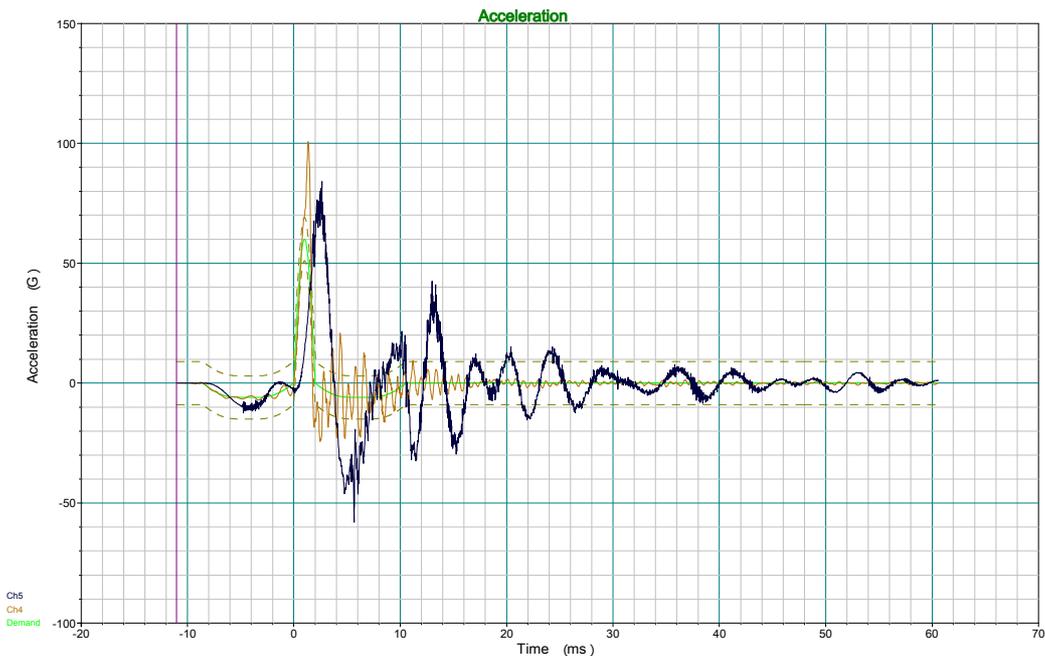


Рис. 10. Виброграмма БЧЭ при ударном воздействии длительностью $\tau = 2$ мс амплитудой $A = 60$ g

Fig. 10. Vibration record of the compact gyroscopic angular rate measurement during shock action $A = 60$ g $\tau = 2$ ms

Требования по стойкости к внешним механическим воздействиям, а именно, к ударным нагрузкам, у приборов отличаются (табл. 2), к вибрационным – похожи.

По разработанной расчетной модели системы амортизации (см. рис. 4) было получено, что при сохранении параметров системы амортизации при ударном воздействии на БЧЭ модернизированного МБИС

будет получена перегрузка, превышающая допустимую. На БЧЭ возникнет перегрузка, равная 107 g, при допустимой 100 g (рис. 11, 12). Проведенный анализ показал, что дополнительную перегрузку на БЧЭ обусловливает работа демпфера. Первый пик характеристики виброграммы БЧЭ вызван откликом конструкции БЧЭ (резонансная частота которого составляет

140 Гц) на ударное воздействие, второй – откликом частоты каждого (порядка 50 Гц) с частотой заданного ударного воздействия 10 мс. четырех демпферов в силу совпадения резонансной

Таблица 2

Ударные воздействия приборов типа МБИС

Требования	Ударные воздействия модернизированного МБИС (механического модуля МБИС)	Ударные воздействия МБИС
Направление	$\pm X, \pm Y, \pm Z$	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
Амплитуда ударного воздействия	50 g	60 g
Длительность	10 ± 1 мс	2–3 мс
Количество	По три удара в каждом направлении	

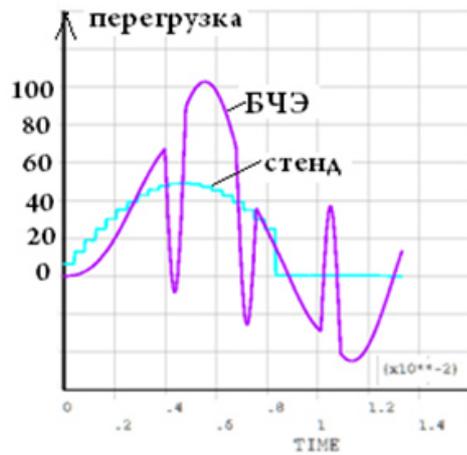


Рис. 11. Расчетная виброграмма БЧЭ модернизированного МБИС

Fig. 11. Theoretical vibration records of the modern compact gyroscopic angular rate measurements during shock action

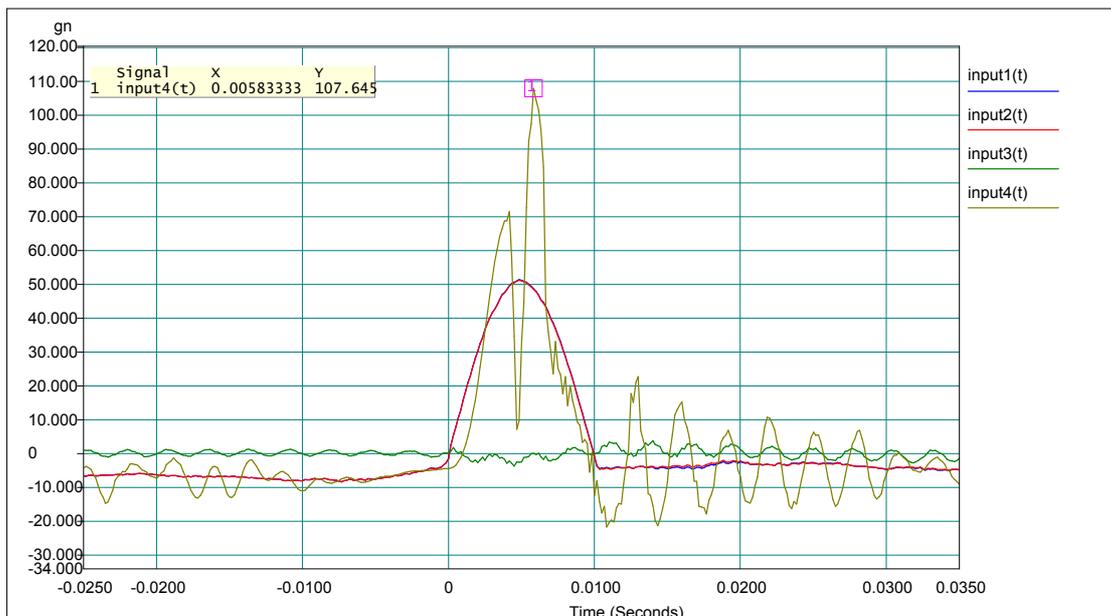


Рис. 12. Виброграмма БЧЭ, полученная в результате проведенного эксперимента

Fig. 12. Vibration records of the modern compact gyroscopic angular rate measurements during shock action

Техническое решение задачи по снижению значения перегрузки при ударном воздействии заключалось в следующем: сохранив габаритно-массовые характеристики системы амортизации и стойкость МБИС к вибродинамическим воздействиям, целесообразно изменить контактную жесткость соударений грузов в конструкции демпфера, что было достигнуто за счет увеличения толщины резиновой прокладки в конструкции демпфера с 1 до 2 мм. Расчетная и экс-

периментальная виброграмма БЧЭ при принятом техническом решении представлены на рис. 13, 14.

Проведенная оценка откликов БЧЭ при вибродинамических воздействиях (широкополосной случайной вибрации, низкочастотной синусоидальной) показала, что на БЧЭ возникнут допустимые ускорения. При использовании демпферов немодернизированной конструкции на БЧЭ возникнет максимально 60 g. При использовании модернизированных – 40 g (рис. 15).

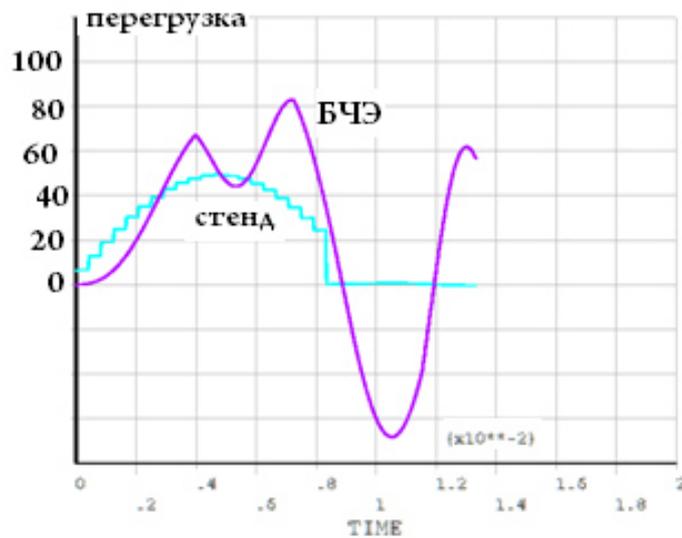


Рис. 13. Расчетная виброграмма БЧЭ модернизированного МБИС при изменении параметров системы амортизации

Fig. 13. Theoretical vibration records of the modern compact gyroscopic angular rate measurements during shock action after changing dimensions characteristics of protecting systems

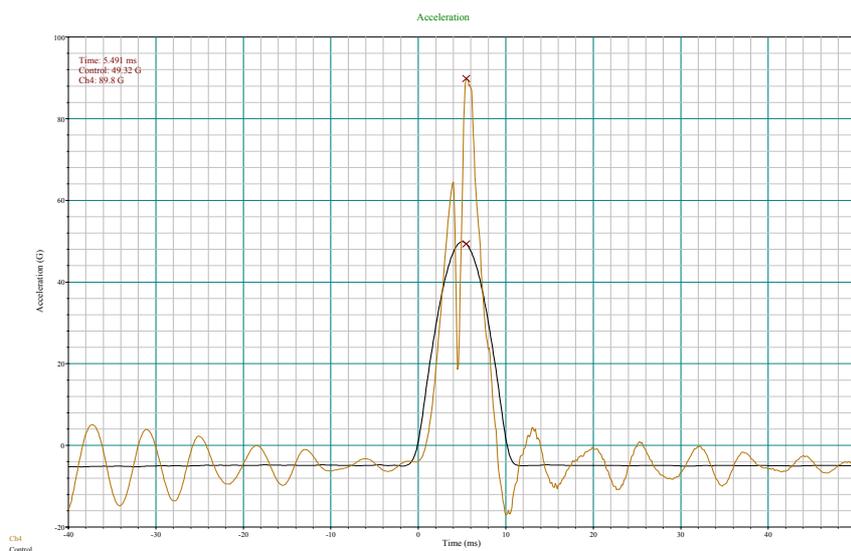


Рис. 14. Виброграмма БЧЭ модернизированного МБИС при изменении параметров системы амортизации

Fig. 14. Vibration records of the modern compact gyroscopic angular rate measurements during shock action after changing dimensions characteristics of protecting systems

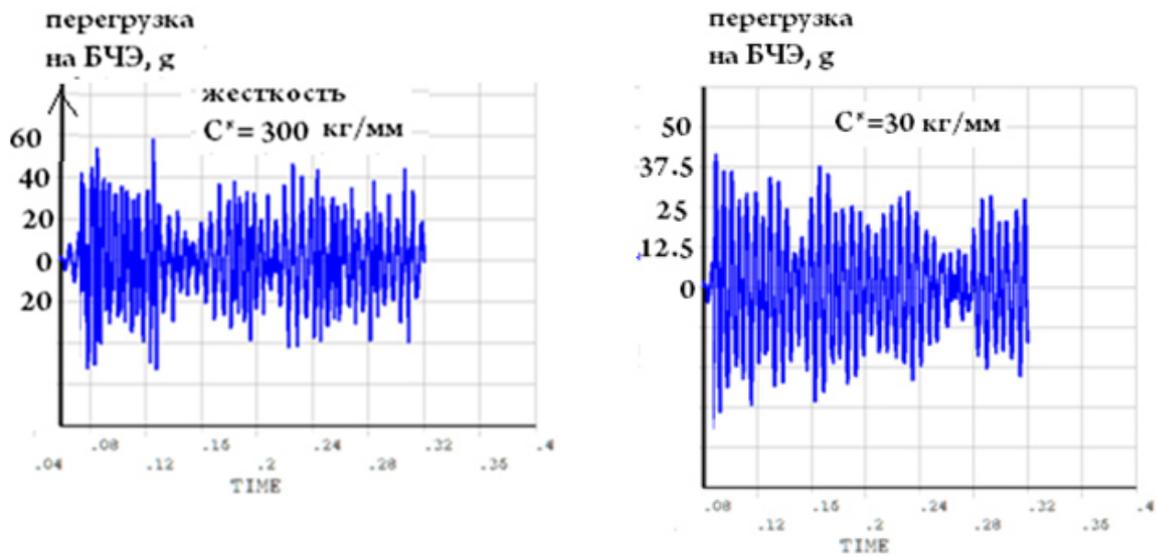


Рис. 15. Расчетная виброграмма БЧЭ модернизированного МБИС при использовании демпферов разных конструкций (слева – демпферов ранее изготавливаемых МБИС, справа – новых)

Fig. 15. Theoretical vibration records of the modern compact gyroscopic angular rate measurements during random vibration after changing dimensions characteristics of protecting systems

Выбранные конструктивные и вибродинамические параметры системы амортизации позволяют снизить действующие механические нагрузки на БЧЭ модернизированного прибора МБИС до допустимого уровня.

Заключение. Оригинальность и новизна представленных исследований заключается в их прикладном назначении. В работе была исследована конструкция конкретного, ранее разработанного прибора (МБИС, разработан для российского головного заказчика). На основе проведенного исследования была решена задача по моделированию происходящих в приборе физических процессов, связанных с внешними возмущающими факторами. Полученные результаты использованы для создания универсальной расчетной модели системы амортизации приборов типа МБИС. Система амортизации предназначена для обеспечения стойкости приборов типа МБИС к внешним механическим нагрузкам, действующим в процессе выведения КА на орбитальный участок полета.

В работе изложены основные принципы построения системы амортизации. Приведена ее расчетная модель. Представлены теоретические результаты моделирования и конкретные практические результаты отработки приборов типа МБИС при проведении вибродинамических испытаний.

Теоретический и практический результат работы определяется обоснованными результатами работы системы амортизации в составе приборов типа МБИС, возможностью использования опыта данной работы при разработке новых приборов систем ориентации и навигации с повышенными показателями отказоустойчивости, надежности и стойкости к внешним механическим воздействиям, как это было сделано при проектировании модернизированного МБИС для иностранного заказчика.

Библиографические ссылки

1. НИИ ПМ – НИИ прикладной механики им. академика В. И. Кузнецова [Электронный ресурс]. URL: <http://www.russian.space/250/> (дата обращения: 30.11.2017).
2. Сапожников И. Н., Неизвестных Ю. И., Душанин Н. Н. Приоритет – точность. М. : РЕСТАРТ, 2006. 190 с.
3. Динамически настраиваемый гироскоп : пат. 2248524 / Богатов А. Д., Игнатьев А. А., Новиков Л. З. 2005..
4. Дубинин А. В. Повышение ресурса газодинамической опоры малогабаритного динамически настраиваемого гироскопа для космических аппаратов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 118 с.
5. Состав группировки КНС ГЛОНАСС на 30.01.2018 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/> (дата обращения: 24.01.2017).
6. Бромберг П. В., Михалев И. А., Никитин Е. А. Гироскопические приборы и системы. М. : Высш. шк., 1971. 487 с.
7. Колосов Ю. А., Ляховецкий Ю. Г., Рахтеенко Е. Р. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем / под ред. Д. С. Пельпора. М. : Высш. шк., 1977. 233 с.
8. Матвеев В. А., Подчерзцев В. П., Фатеев В. В. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах. М. : Машиностроение, 1988. 263 с.
9. Новиков Л. З., Шаталов М. Ю. Механика динамически настраиваемых гироскопов. М. : Наука, 1985. 250 с.
10. Арзамасов Б. Н., Макарова В. И., Мухин Г. Г. Материаловедение. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 648 с.

11. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску / Д. С. Чиркин [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2017. № 1. С. 8.

12. Пельпор Д. С., Матвеев В. А., Арсеньев В. Д. Динамически настраиваемые гироскопы. Теория и конструкция. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.

13. Артоболевский И. И., Боголюбов А. Н., Болотин В. В. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1978. 351 с.

14. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

15. Ударный гаситель колебаний: пат. 621917 / Сысоев В. И. 1978.

References

1. *NII PM – NII prikladnoy mekhaniki im. akademika V. I. Kuznetsova* [SRI PM – Research Institute of Applied Mechanics. academician V. I. Kuznetsov]. Available at: <http://www.russian.space/250/> (accessed 30.11.2017).

2. Sapogonnikov I. N., Neizvestnih Y. I., Duhanin N. N. *Prioritet – tochnost'*. [Accuracy is priority]. Moscow, Reestr Publ., 2006, 190 p.

3. Bogatov A. D., Ignatiev A. A., Novikov L. Z. *Dinamicheski nastraivaemyy giroskop* [Dynamically adjusted gyroscope]. Patent RF, no. 2248524. 2005.

4. Dubinin A. V. *Povyshenie resursa gazodinamicheskoy opory malogabaritnogo dinamicheski nastraivaemogo girosokopa dlya kosmicheskikh apparatov*. Diss. kand. tekhn. nauk. [Increasing recourse for gas dynamic support of dynamically adjusted gyroscopes. Cand. Diss.]. Moscow, 2015, 118 p.

5. *Sostav gruppировки KNS GLONASS na 30.01.2018 g.* [The composition of the GLONASS CNS grouping as of 01/30/2018]. Available at: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/> (accessed 24.01.2017).

6. Bromberg P. V., Mihalev I. A., Nikitin E. A. *Giroskopicheskie pribory i sistemy*. [Gyroscopic devices and systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971, 487 p.

7. Kolosov Y. A., Lyahovetskiy Y. G., Rahtenko E. R. *Giroskopicheskie sistemy. Proektirovanie giroskopicheskikh sistem* [Gyroscopic systems. Designing gyroscopic systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 233 p.

8. Matveev V. A., Podchertsev V. P., Fateev V. V. *Giroskopicheskie stabilizatory na dinamicheski nastraivaemykh vibratsionnykh giroskopakh* [Gyroscopic stabilizers used to dynamically adjusted gyroscopes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 263 p.

9. Novikov L. Z., Shatalov M. Y. *Mekhanika dinamicheski nastraivaemykh giroskopov*. [Mechanics of dynamically adjusted gyroscope]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 250 p.

10. Arzamasov B. N., Makarova V. I., Muhin G. G. *Materialovedenie*. [Materials science]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2008, 648 p.

11. Chirkin D. S., Roslovec P. V., Tatarinov F. V., Novikov L. Z. [Decrease drift of the dynamically adjusted gyroscopes]. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Bauman*. 2017, No. 1, P. 8 (In Russ.).

12. Pelpor D. S., Matveev V. A., Arsenyev V. D. *Dinamicheski nastraivaemye giroskopy. Teoriya i konstruktsiya*. [Dynamically adjusted gyroscopes. Theory and design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 263 p.

13. Artobolevskiy I. I., Bogoliybov A. N., Bolotin V. V. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 351 p.

14. Timoshenko S. P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibrations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 472 p.

15. Sisoiev V. I. *Udarnyy gasitel' kolebaniy* [Stressed vibration damper]. Patent, no. 621917. 1978.

© Топильская С. В., Бородулин Д. С., Корнюхин А. В., 2018

