

УДК 681.586.2.037'325

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ МАЛОГАБАРИТНОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

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

Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» «Научно-исследовательский институт прикладной механики  
имени академика В.И. Кузнецова» (НИИ ПМ)  
Ул. Пруд Ключики, 12А, г. Москва, Российская Федерация, 111024, e-mail: niipm@russian.space

*В статье представлен малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловой скорости (МБИС) разработки и изготовления НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова на базе динамически настраиваемого гироскопа с газодинамической опорой. В статье даны общие технические характеристики гироскопического прибора (габаритно-массовые параметры, точность измерения, количество измерительных осей, ресурс работы, энергопотребление и т. д.).*

*В работе представлены преимущества и недостатки выбранного гироскопа (динамически настраиваемого) в качестве чувствительного элемента. Преимуществами данного выбора являются средняя точность измерения прибора при небольших габаритно-массовых характеристиках и длительный ресурс работы. Недостаток — необходимость применения специальных систем в составе гироскопических приборов (типа МБИС), предназначенных для защиты чувствительных элементов от внешних механических воздействий, возникающих при выведении ракетой-носителем космического аппарата.*

*В статье изложены основные принципы обеспечения стойкости к таким воздействиям. Приведена универсальная расчетная модель системы амортизации прибора. Представлены теоретические результаты моделирования и практические результаты натурных механических испытаний прибора МБИС. Практический результат работы состоит в создании универсальной расчетной модели системы амортизации прибора МБИС на основе теоретических изысканий и результатов практической отработки. Универсальная расчетная модель позволяет выбирать конструктивные параметры системы амортизации прибора на этапе проектирования приборов, не проводя доработок опытных образцов.*

**Ключевые слова:** гироскопический измеритель, стойкость прибора, механические воздействия.

## MAKING A COMPACT GYROSCOPIC ANGULAR RATE VECTOR METER RESISTANT TO MECHANICAL FORCES

Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Kornukhin A.V.

«Kuznetsov research institute of applied mechanics» division of «TsENKI» (NII PM)  
12A Prud Kliuchiki str., Moscow, 111024, Russian Federation, e-mail: niipm@russian.space

*The paper discusses a Compact Gyroscopic Angular Rate Vector Meter (CGARVM) developed and built by Kuznetsov research institute of applied mechanics based on a dynamically adjustable gyroscope with a rotor gas-lubricated spin-axis bearing system. The paper provides general technical data on the gyroscopic device (dimensions and mass parameters, measurement accuracy, the number of measuring axes, operational life, power consumption, etc.).*

*The paper presents advantages and disadvantages of using the selected gyroscope (dynamically adjustable) as the sensing element. The advantages of this choice include*

*the mean accuracy of measurements of this device while it has small mass and dimensions and long operational life. A disadvantage is the need to use special systems within gyroscopic devices (of the CGARVM type) designed to protect sensing elements against external mechanical loads, occurring when a spacecraft is being put into orbit by a launch vehicle.*

*The paper sets forth key principles of assuring resistance to such loads. It provides a universal analytical model of the shock absorption system of the instrument. It presents theoretical simulation results and actual results of mechanical field tests of the CGARVM device. The practical result of the work consists in the development of a multi-purpose analytical model of the shock absorption system for CGARVM based on theoretical studies and results of practical development. The universal analytical model makes it possible to select design parameters of the instrument shock absorption system at the design stage without having to rebuild its prototypes.*

**Key words:** *gyroscopic meter, instrument resistance, mechanical loads.*



ТОПИЛЬСКАЯ С.В.



БОРОДУЛИН Д.С.



КОРНЮХИН А.В.

ТОПИЛЬСКАЯ Светлана Владимировна — ведущий инженер-конструктор НИИ ПМ,  
e-mail: [s.v.topilskaya@mail.ru](mailto:s.v.topilskaya@mail.ru)

TOPILSKAYA Svetlana Vladimirovna — Lead engineer-designer at NII PM,  
e-mail: [s.v.topilskaya@mail.ru](mailto:s.v.topilskaya@mail.ru)

БОРОДУЛИН Денис Сергеевич — начальник отделения НИИ ПМ,  
e-mail: [d.borodulin@niipm.ru](mailto:d.borodulin@niipm.ru)

BORODULIN Denis Sergeevich — Head of Division at NII PM,  
e-mail: [d.borodulin@niipm.ru](mailto:d.borodulin@niipm.ru)

КОРНЮХИН Алексей Владимирович — заместитель начальника отделения НИИ ПМ,  
e-mail: [lexey1984@inbox.ru](mailto:lexey1984@inbox.ru)

KORNYUKHIN Alexey Vladimirovich — Deputy Head of Division at NII PM,  
e-mail: [lexey1984@inbox.ru](mailto:lexey1984@inbox.ru)

## Введение

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

Преимуществом применения ДНГ в качестве чувствительного элемента

гироскопов являются его небольшие габариты при средней точности измерения (0,01 угловой секунды) [2]. Применение ДНГ с газодинамической опорой позволяет обеспечивать длительный ресурс эксплуатации гироскопов (~15 лет).

Одним из типов разрабатываемых и изготавливаемых НИИ ПМ гироскопов является гироскопический измеритель вектора угловой скорости (ГИВУС). Благодаря уменьшению габаритно-массовых характеристик разработанного

ГИВУС на базе ДНГ относительно ранее разработанных ГИВУС на базе поплавковых интегрирующих гироскопов, он получил название малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловой скорости или малогабаритный блок измерения угловых скоростей (МБИС).

МБИС 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 (~0,1 угловой секунды) была реализована при наземной отработке, натурной эксплуатации в составе платформы «Экспресс-1000» КА «ГЛОНАСС-К» головного предприятия-заказчика АО ИСС им. академика М.Ф. Решетнева (рис. 1) [1]. Указанная точность измерения достигается за счет выбора ДНГ в качестве чувствительного элемента и сервисных электронных устройств, построенных полностью на отечественной элементной базе.

Сервисные электронные устройства ДНГ обеспечивают обмен информацией прибора с системой управления КА. Согласно

требованиям габаритного чертежа, размеры МБИС составляют 258×204×170 мм, масса 6,1±0,2 кг.

Технические характеристики МБИС представлены в таблице.



Рис. 1. Малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловой скорости

### Основные технические характеристики прибора МБИС

| Характеристики прибора   | Режим грубого функционирования | Режим точного функционирования |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Диапазон работоспособности, °/с  | Не менее ±30                   | Не менее ±15                   |
| Диапазон измерения угловых скоростей, °/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, °/ч (s) | —                              | 0,02                           |
| Количество измерительных осей  | 6                              |                                |
| Информационный интерфейс   | ГОСТ Р 52070-2003              |                                |
| Напряжение питания постоянным током, В   | 23...28                        |                                |
| Потребляемая мощность, Вт  | Не более 47                    |                                |
| Температура теплоотводящей поверхности, °С   | -20 ... 40                     |                                |
| Ресурс работы, ч (лет)   | 140 000 (15)                   |                                |
| Срок эксплуатации, лет   | 19                             |                                |
| Стадия разработки  | Летная эксплуатация            |                                |

### Постановка задачи

При создании гироскопических приборов стоит много важных задач. Это обеспечение требуемой точности, надежности работы, длительного ресурса эксплуатации, высокой безотказности, радиационной стойкости к факторам космического пространства, вибрационной

стойкости к внешним механическим воздействиям, возникающим при выведении ракетой-носителем КА, при полете КА по заданной траектории, определяемой орбитой.

Целью данной работы является решение задачи по обеспечению стойкости прибора МБИС к внешним механическим воздействиям.

В качестве чувствительного элемента гироскопического прибора выбран ДНГ, который позволяет обеспечить требуемый ресурс работы прибора при реализации необходимой точности измерения (0,1 угловой секунды в составе прибора). ДНГ разработан в НИИ ПМ [1, 2]. Из-за применения в составе конструкции ДНГ миниатюрного упругого подвеса для обеспечения средней точности измерения этот чувствительный элемент является хрупким, уязвимым к действию механических нагрузок при выведении КА на орбиту. Поэтому выбор ДНГ в качестве чувствительного элемента МБИС требует специальных мер защиты (системы амортизации) от внешних механических воздействий, действующих при выведении ракетой-носителем КА на орбиту, для обеспечения вибрационной стойкости прибора.

Конструктивно три чувствительных элемента МБИС взаимно ортогонально расположены на основании блока чувствительных элементов (БЧЭ).

#### Математическое описание универсальной расчетной модели системы амортизации и результаты компьютерного моделирования

Динамически настраиваемый гироскоп представляет собой маховик, установленный на валу с помощью внутреннего упругого карданного подвеса, выполненный из специальной немагнитной пружинной стали 21НКМТ-ВИ, обладающей механическими свойствами, необходимыми для работы подвеса в составе чувствительного элемента. Основным параметром, характеризующим упругие свойства подвеса, является предел пропорциональности, равный 100...140 кг/мм<sup>2</sup> (предел пропорциональности — максимальная величина напряжения, при которой выполняется закон Гука).

Расчетные значения напряжений в подвесе показывают, что при приложении нагрузки 100g в перемычках подвеса возникают напряжения, равные пределу пропорциональности подвеса ~100 кг/мм<sup>2</sup>, который определяет предельную допустимую нагрузку. Таким образом, можно сделать вывод, что допустимая нагрузка на подвес и, соответственно, на ДНГ, составляет 100g.

Результаты натурных испытаний ДНГ при невращающемся маховике (ДНГ находится в «выключенном» состоянии) подтвердили его функциональные

и точностные характеристики после возникновения ускорения в месте его установки порядка 90g.

Теоретическая оценка вибродинамических характеристик ДНГ показала, что его резонансная частота находится в высокочастотном диапазоне 1 500...1 800 Гц с коэффициентом передачи  $Q = 100$  [3].

При непосредственной установке БЧЭ на корпус прибора (без применения амортизаторов) резонансная частота БЧЭ будет находиться в высокочастотном диапазоне 1 000...2 000 Гц, т. е. в области резонансной частоты ДНГ 1 500...1 800 Гц [4]. Это послужит совпадению резонансных частот ДНГ с БЧЭ и, как следствие, — увеличению амплитуды колебаний БЧЭ, приводящему к разрушению конструкции ДНГ [5].

По представленной ниже формуле проведена оценка возникающей перегрузки на БЧЭ при заданных внешних условиях и при отсутствии системы амортизации. На БЧЭ и, соответственно, в месте установки чувствительного элемента возникнет ускорение порядка 600g, что в шесть раз превышает расчетное значение допустимой нагрузки 100g на ДНГ.

$$A_{\max} = 3\sqrt{(\pi/2)sQf_{\text{ДНГ}}},$$

где  $A_{\max}$  — максимальное возникающее ускорение на БЧЭ при действии случайной вибрации;  $s$  — уровень спектральной плотности вибрации на резонансной частоте конструкции (0,3 g<sup>2</sup>/Гц);  $Q$  — коэффициент передачи на резонансе;  $f_{\text{ДНГ}}$  — резонансная частота системы.

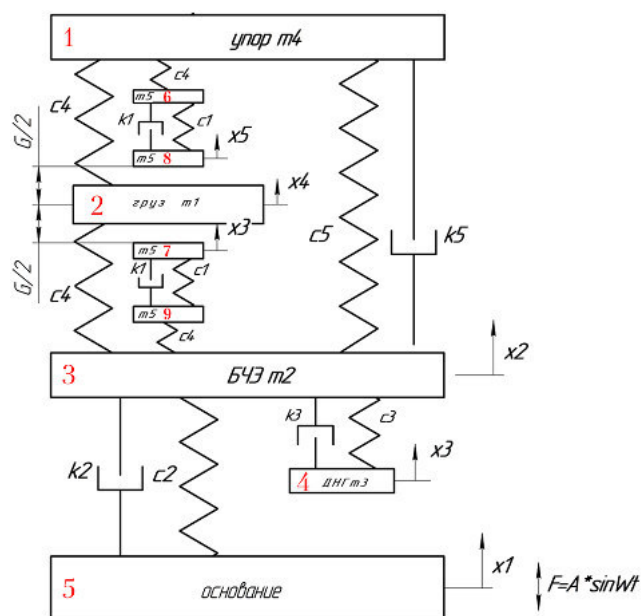
Для того, чтобы обеспечить требование головного заказчика к прибору по стойкости к механическим воздействиям, в конструкции МБИС применен способ защиты, заключающийся:

- в разнесении собственных частот БЧЭ и ДНГ за счет применения пружин-амортизаторов [6];
- в применении ударных виброгасителей колебаний (УВГ) для уменьшения амплитуды колебаний БЧЭ на резонансе [7, 8].

Выбранный способ обеспечения стойкости МБИС к внешним механическим воздействиям предназначен для уменьшения значений возникающих перегрузок до допустимого уровня.

Для подбора геометрических параметров системы амортизации была составлена ее универсальная расчетная модель (рис. 2), исходными данными для которой являются:

- масса БЧЭ, определяемая расположением ДНГ на основании, элементами системы термостатирования и амортизации (УВГ), крепежных элементов;
- собственная частота ДНГ.



**Рис. 2. Универсальная расчетная модель системы амортизации:** 1–9 – номера масс упругой модели;  $m_1$  – масса груза УВГ;  $m_2$  – масса БЧЭ;  $m_3$  – масса ДНГ;  $m_4$  – масса стержня УВГ;  $m_5$  – масса резиновой прокладки;  $c_1/k_1$  – жесткость/демпфирование резиновой прокладки;  $c_2/k_2$  – жесткость/демпфирование амортизатора;  $c_3/k_3$  – жесткость/демпфирование ДНГ;  $c_4$  – жесткость УВГ;  $c_5/k_5$  – жесткость/демпфирование стержня УВГ;  $x_1$ – $x_5$  – перемещение масс при воздействии;  $G$  – зазор

*Примечание.* УВГ – ударные виброгасители колебаний; БЧЭ – блок чувствительных элементов; ДНГ – динамически настраиваемые гироскопы.

Далее, применяя компьютерное моделирование, при известных начальных условиях выбирались параметры системы амортизации:

- жесткость пружин (амортизаторов);
- 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 100g).

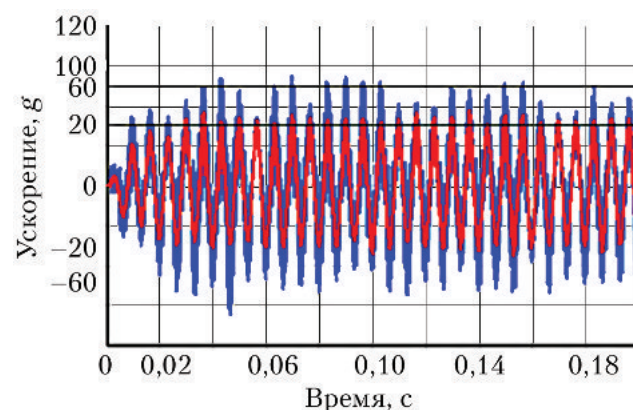
Ударные виброгасители обеспечивают демпфирование колебаний на резонансной частоте БЧЭ за счет совершения ударных воздействий грузов в конструктивно предусмотренных зазорах. Величина массы грузов и зазоров выбрана, исходя из реализации коэффициента передачи на резонансной частоте БЧЭ 150 Гц. Собственная частота 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 и  $\tau = 10 \pm 1$  мс для механического модуля МБИС). Значение собственной частоты также выбрано в целях уменьшения значения возникающего ускорения при действии широкополосной случайной вибрации [9, 10].

Основной сложностью при создании системы амортизации является выбор параметров УВГ (массы грузов, параметров резиновой прокладки и величины зазора) [7].

В результате проведенного моделирования, используя расчетную упругую механическую модель системы амортизации (рис. 2), были определены основные параметры УВГ и амортизатора.

На рис. 3 представлена характерная расчетная виброграмма распределения возникающих ускорений во времени при действии случайной вибрации ( $\sigma_{зад} = 16g$ ) в диапазоне частот 20...2 000 Гц.



**Рис. 3. Виброграмма блока чувствительных элементов при  $G = 0,7..0,8$ :** ■ – среднее квадратичное значение перегрузки  $s_{ср} = 20g$ ; ■ – возникающее значение перегрузки  $s = 60g$

Разработанная расчетная модель позволила подобрать параметры системы амортизации, оценивая перегрузку на БЧЭ и ДНГ.

Подбор параметров системы амортизации осуществлялся при моделировании ее работы на выбранной резонансной частоте БЧЭ 150 Гц с добротностью системы  $Q = 10$ . Система амортизации МБИС конструктивно состоит из четырех амортизаторов и четырех УВГ (рис. 4).

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 диаметре 8,6 мм, высоте 5 мм) и между ними — резиновые прокладки толщиной 1 мм. Грузы могут свободно перемещаться в осевом и радиальном направлениях в предварительно установленных зазорах 0,7...0,9 мм. В целях уменьшения габаритно-массовых характеристик системы амортизации материалом груза является сплав ВНМ5-3 (ТУ 48-19-85-83), обладающий высоким значением плотности  $\rho = 17 \text{ г/см}^3$  [8].

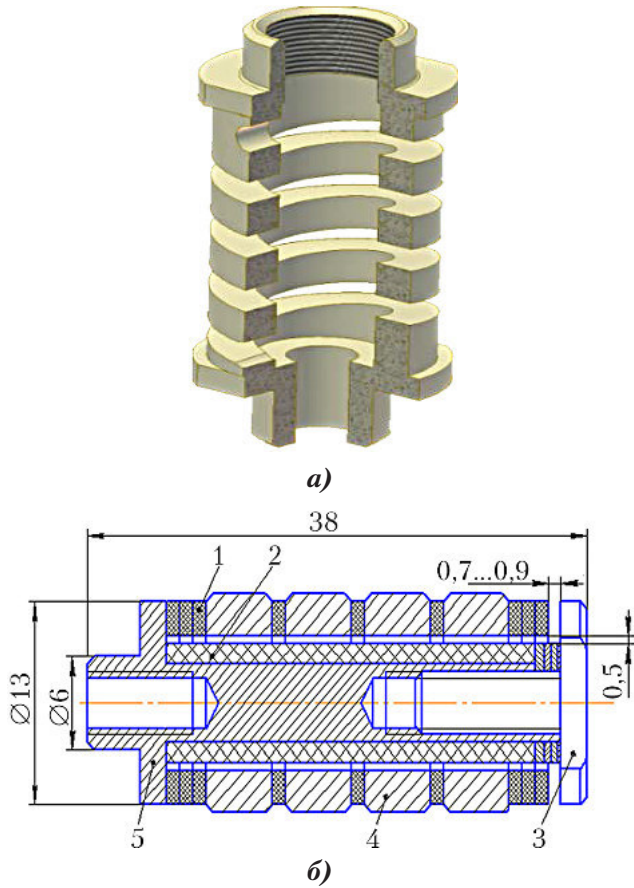


Рис. 4. Элементы системы амортизации: а — пружина (амортизатор); б — система термостатирования и амортизации; 1 — резиновая прокладка; 2 — резиновая трубка; 3 — винт; 4 — груз ударного гасителя; 5 — титановый стержень

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

### Результаты вибродинамических испытаний

Система амортизации 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. 5 представлена амплитудно-частотная характеристика БЧЭ МБИС, подтверждающая верность проведенного расчета. На рис. 6 — виброграммы БЧЭ при действии широкополосной случайной вибрации ( $\sigma_{\text{зад}} = 16\text{g}$ ), на рис. 7 — виброграмма БЧЭ при действии низкочастотной синусоидальной вибрации в диапазоне частот  $f = 5...100 \text{ Гц}$  амплитудой  $A = 15\text{g}$ , на рис. 8 — виброграмма БЧЭ при ударном воздействии длительностью  $\tau = 2 \text{ мс}$  амплитудой  $A = 60\text{g}$  и  $A = -60\text{g}$ .

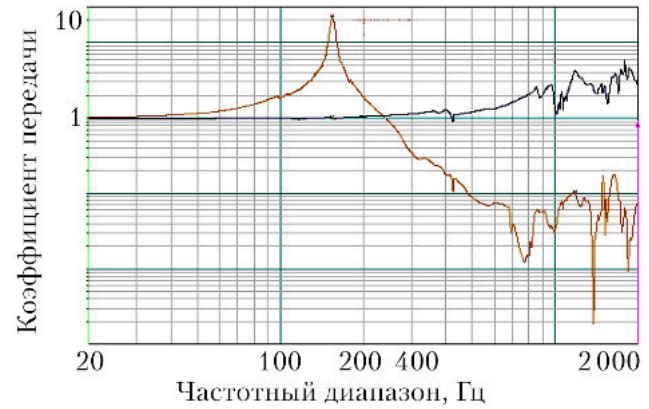


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика БЧЭ МБИС: — виброграмма, записанная с датчика, установленного на БЧЭ; — виброграмма, записанная с датчика, установленного на плите вибростенда

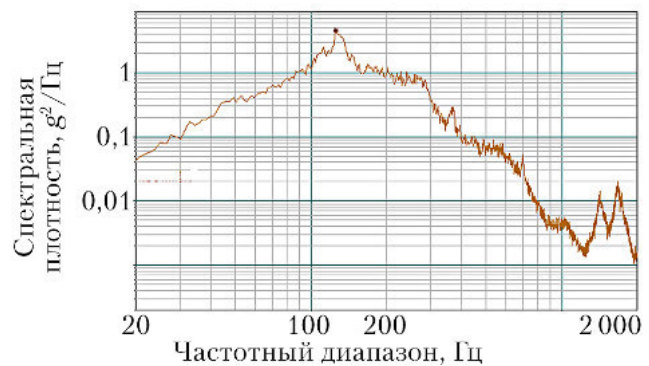


Рис. 6. Распределение спектральных плотностей при действии широкополосной случайной вибрации ( $\sigma_{\text{зад}} = 16\text{g}$ )

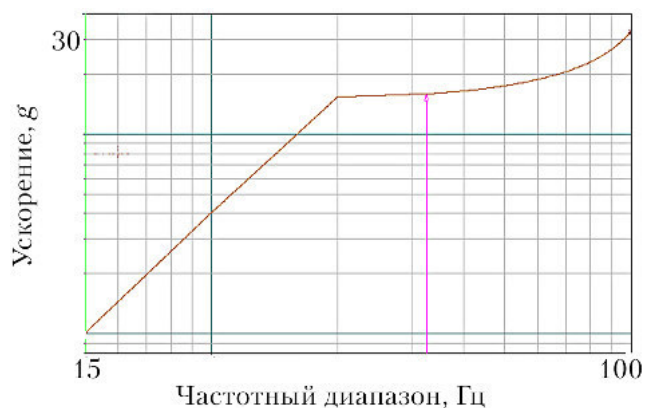


Рис. 7. Виброграмма БЧЭ при действии низкочастотной синусоидальной вибрации в диапазоне частот 5...100 Гц амплитудой  $A = 15\text{g}$

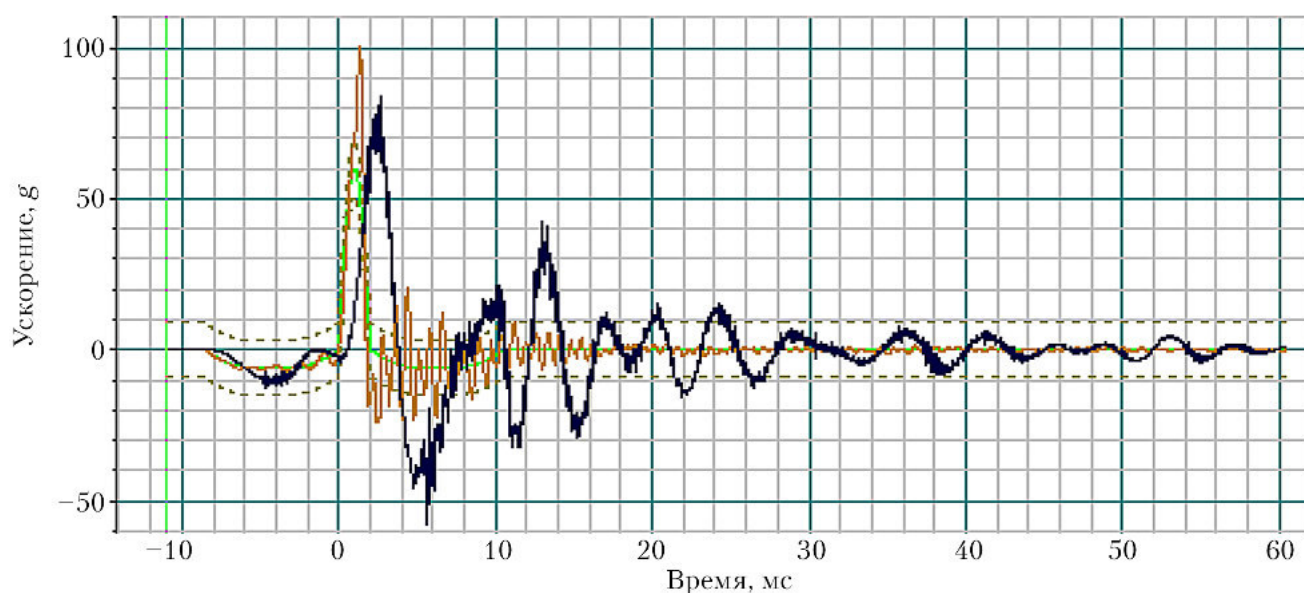


Рис. 8. Виброграмма БЧЭ при ударном воздействии длительностью  $\tau = 2$  мс амплитудой  $A = 60$ : ■ — виброграмма, записанная с датчика, установленного на БЧЭ; — виброграмма, записанная с датчика, установленного на месте крепления прибора; — заданное воздействие

### Рекомендации применения универсальной расчетной модели

Технический результат работы состоит в создании универсальной расчетной модели системы, обеспечивающей стойкость к механическим воздействиям прибора МБИС (системы амортизации), предназначенной для защиты чувствительных элементов от внешних механических воздействий, действующих при выведении ракетой-носителем КА на орбиту.

Практический результат работы заключается в создании и внедрении разработанной системы амортизации в конструкцию прибора МБИС для обеспечения его стойкости к внешним механическим воздействиям.

Созданную универсальную расчетную модель рекомендуется применять при разработке конструкций приборов типа МБИС. С ее помощью на этапе проектирования возможно подбирать конструктивные параметры системы амортизации. Это позволяет на этапе проведения вибродинамических испытаний первого опытного образца прибора типа МБИС не проводить дополнительных доработок конструкции, тем самым сократить время изготовления прибора и ускорить процесс внедрения летного образца.

### Заключение

НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова был разработан и изготовлен прибор МБИС с требуемыми параметрами точности, надежности работы, ресурса эксплуатации,

радиационной стойкости к факторам космического пространства, виброустойчивости в составе системы ориентации КА головного заказчика АО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева». Созданная система амортизации в составе конструкции прибора МБИС позволяет снизить действующие нагрузки на прибор в процессе выведения КА на орбиту до допустимого уровня. Использование полученных результатов моделирования, а именно — универсальной расчетной модели, будет интересно при создании модернизированных приборов типа МБИС, в целях снижения временных ресурсов на выпуск рабочей конструкторской документации, проведения наземных испытаний первых опытных образцов.

### Список литературы

1. Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова». Режим доступа: <http://www.russian.space/250/> (дата обращения 30.11.2017 г.).
2. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. Материаловедение. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
3. Артоболевский И.И., Боголюбов А.Н., Болотин В.В. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В41 В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 352 с.
4. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.

5. Патент 2248524. Российская Федерация. Динамически настраиваемый гироскоп. Богатов А.Д., Игнат'ев А.А., Кирюхин В.П., Коновченко А.А., Мезенцев А.П., Новиков Л.З., Славин В.С., Хромов Б.В.; заявитель и патентообладатель – ФГУП НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова; приоритет от 29.04.2004 г.; опубликовано 20.03.2005 г. // Бюллетень изобретений. № 8.

6. Колосов Ю.А., Ляховецкий Ю.Г., Рахтеенко Е.Р. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем / Под ред. Пельпора Д.С. М.: Высшая школа, 1977. 233 с.

7. Корнеев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний. М.: Наука, 1988. 304 с.

8. Новиков Л.З., Шаталов М.Ю. Механика динамически настраиваемых гироскопов. М.: Наука, 1985. 245 с.

9. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирования колебаний. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 448 с.

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

Статья поступила в редакцию 01.02.2018 г.

## Reference

1. *Filial FGUP «TsENKI» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*. [«Kuznetsov research institute of applied mechanics» division of «TsENKI»]. Available at: <http://www.russian.space/250/> (accessed 30.11.2017).

2. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Muhin G.G. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, Bauman MSTU publ., 2008. 648 p.

3. Artobolevskiy I.I., Bogolyubov A.N., Bolotin V.V. *Vibratsii v tekhnike. Spravochnik. V 6 t.* [Vibrations in engineering. Manual. In 6 vol.]. Ed. board V41 V.N. Chelomey (chairman). Moscow, Mashinostroenie publ., 1978. Vol. 1, 352 p.

4. Batuev G.S., Golubkov I.U.V., Efremov A.K., Fedosov A.A. *Inzhenernye metody issledovaniya udarnykh protsessov* [Engineering methods of research shock action]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977. 240 p.

5. Patent 2248524. Rossiyskaya Federatsiya. *Dinamicheski nastraivaemyy giroskop* [Dynamically adjusted gyroscope]. Bogatov A.D., Ignat'ev A.A., Kiryukhin V.P., Konovchenko A.A., Mezentsev A.P., Novikov L.Z., Slavin V.S., Khromov B.V.; the applicant and the patent owner – FGUP NII PM im. akademika V.I. Kuznetsova; priority of 29.04.2004; published 20.03.2005. *Byulleten' izobreteniy*, no. 8.

6. Kolosov Yu.A., Lyakhovetskiy Yu.G., Rahtenko E.R. *Giroskopicheskie sistemy. Proektirovanie giroskopicheskikh sistem* [Gyroscopic systems. Designing gyroscopic systems]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1977. 233 p.

7. Korneev B.G., Reznikov L.M. *Dinamicheskie gasiteli kolebaniy* [Dynamical vibration damper]. Moscow, Nauka publ., 1988. 304 p.

8. Novikov L.Z., Shatalov M.Yu. *Mekhanika dinamicheski nastraivaemykh giroskopov* [Mechanics of dynamically adjusted gyroscope]. Moscow, Nauka publ., 1985. 245 p.

9. Nashif A., Johnes D., Henderson J. *Dempfirovaniya kolebaniy* [Vibration damper]. Moscow, Mir publ., 1988. 448 с.

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