

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМЫЙ ГИРОСКОП

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

s.v.topilskaya@mail.ru
d.s.borodulin@niipm.ru
lexey1984@inbox.ru

НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Динамически настраиваемые гироскопы для космической и авиационной техники имеют небольшие габаритно-массовые характеристики при средней точности измерения. Рассмотрен динамически настраиваемый гироскоп, применяемый в составе малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости космического аппарата. Основные элементы конструкции гироскопа — миниатюрный упругий подвес и газодинамическая опора, обеспечивающая ресурс работы прибора до 15 лет. Данные элементы конструкции чувствительны к внешним механическим нагрузкам, действующим при выведении космического аппарата ракетой-носителем. Для обеспечения стойкости малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости к внешним механическим воздействиям выполнена оценка допустимых нагрузок на динамически настраиваемый гироскоп, определяемых прочностью подвеса и работой газодинамической опоры. Полученные результаты учтены при создании систем амортизации, обеспечивающих стойкость к внешним механическим воздействиям малогабаритных гироскопических приборов различных типов

Ключевые слова

Гироскопический измеритель, динамически настраиваемый гироскоп, механические воздействия

Поступила в редакцию 19.12.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Первые публикации о гироскопах, в конструкции которых использована упругая связь между валом приводного двигателя и гироскопическим маховиком, появились в начале шестидесятых годов прошлого века. Рассматривались схемы гироскопов с внутренним упругим подвесом маховика на валу приводного двигателя, обеспечивающим возможность наклона маховика относительно вала. Такое устройство полностью соответствует классическому определению гироскопа как быстро вращающегося твердого тела, ось собственного вращения которого может изменять свою ориентацию в инерциальном пространстве. Отличие от традиционной схемы гироскопа с наружным карданным подвесом заключается в том, что привод (электрическая машина или скоростные опоры) здесь не участвует в угловых движениях оси маховика относительно

основания. Крутящий момент двигателя передается на маховик через вращающееся вместе с валом подвижное сочленение.

Передача вращения через подвижное сочленение — не новое слово в технике на момент создания динамически настраиваемого гироскопа. Достаточно вспомнить карданный механизм трансмиссии автомобиля или гибкий вал бор-машины. Особенность подвижного сочленения в том, что в гироскопе такой узел должен не только обеспечивать возможность наклона маховика относительно вала (в определенных пределах), разгон маховика до заданной скорости и поддержание ее с заданной точностью, но и удерживать маховик от сколь угодно заметных поступательных перемещений относительно вала, тем самым относительно корпуса прибора, т. е. выполнять роль подвеса. Жесткие ограничения и габаритные размеры гироскопа делают нецелесообразным использование подшипников скольжения и тем более качения в качестве шарниров такого вращающегося подвеса. Наиболее подходящие в этих условиях упругие элементы — торсионы, работающие на кручение, или гибкие стержни и пластины, работающие на изгиб.

Именно оригинальный упругий подвес, разработанный в 1960-е гг., явился, по утверждению самих разработчиков, ключевым элементом конструкции малогабаритного трехступенного гироскопа, получившего название «Гирофлекс». Этот прибор, имея необходимую для инерциальных систем точность, оказался в несколько раз дешевле и надежнее поплавковых гироскопов того же класса. Быстро найдя применение в авиации, ракетной и ракетно-космической технике, а затем и в морских навигационных приборах, гирофлекс открыл новое направление в технике гироскопических чувствительных элементов [1].

Одно из преимуществ гироскопа с упругим вращающимся подвесом — это рациональное использование внутреннего объема гироблока, что позволяет уменьшить его размеры до значений, незначительно превышающих диаметр гироскопического маховика. Компактность динамически настраиваемого гироскопа позволяет на его основе создавать малогабаритные гироскопические измерители вектора угловой скорости. Но в силу компактности внутренних конструктивных элементов гироскопа необходимо знать их допустимую механическую нагрузку, чтобы в составе гироскопических приборов создавать системы, защищающие чувствительные элементы от внешних механических воздействий [2].

Задача настоящей работы состоит в определении допустимых внешних механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп.

Описание конструкции динамически настраиваемого гироскопа. В настоящее время в НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова разработана линейка динамически настраиваемых гироскопов, нашедших применение в платформенных и бесплатформенных инерциальных навигационных системах гироскопических измерителей вектора угловой скорости.

Одним из таких гироскопов является динамически настраиваемый гироскоп, имеющий в составе конструкции газодинамическую опору (ГДО), применение которой позволяет увеличить до 15 лет ресурс работы чувствительного

элемента, следовательно, и прибора [3]. Такой гироскоп далее по тексту будет называться ДНГ-091.

Важнейшие преимущества ГДО обусловлены в первую очередь отсутствием в рабочем режиме непосредственного контакта между взаимно движущимися деталями. Это позволяет обеспечивать практически неограниченный ресурс непрерывной работы таких опор (особенно при эксплуатации в составе систем управления космических аппаратов в условиях невесомости) и низкий уровень собственной вибрации (следовательно, малые шумы в выходном сигнале). Кроме того, сжимаемость смазочного слоя обеспечивает точность положения оси вращения подшипника выше точности изготовления его деталей, а благодаря высокой степени демпфирования в слое газовой смазки снижено влияние внешних динамических воздействий на подвижную часть прибора. Слабая зависимость вязкости газов от температуры обуславливает нормальную работу газовых опор в широком температурном диапазоне. Это подтверждается многолетней успешной практикой применения подобных опор в высокоточных поплавковых гироскопах для инерциальных навигационных систем [4].

Далее приведены технические характеристики рассматриваемого гироскопа, на рис. 1 — конструкция гироскопа [5].

Основные технические характеристики ДНГ-091

Масса, г	125
Габаритные размеры, мм	Ø 32 × 37
Потребляемая мощность, Вт:	
пусковая	15
рабочая	2
Время вхождения в синхронизм, с	8
Диапазон измеряемых угловых скоростей, град/с:	
непрерывно	10
кратковременно	15
Стабильность масштабного коэффициента, %	0,01
Систематические составляющие скорости ухода, град/ч:	
независящая от ускорения	50
из-за осевой разбалансировки	6
квадратурная	9
из-за неравножесткости	0,03
Случайные значения скорости ухода, град/ч (3σ):	
в запуске	0,005
от запуска к запуску	0,7
Ресурс, тыс. ч	140

В целях повышения технологичности сборки в приборе принята следующая конструктивно-компоновочная схема: консольная, однодвигательная с разделением полости двигателя от полости маховика стенкой корпуса, являющейся электромагнитным экраном, с монолитным двухколечным упругим подвесом и газозаполнением гелием до давления 380 мм рт. ст., с корпусом и кожухами, выполняющими роль магнитных и тепловых экранов [6].

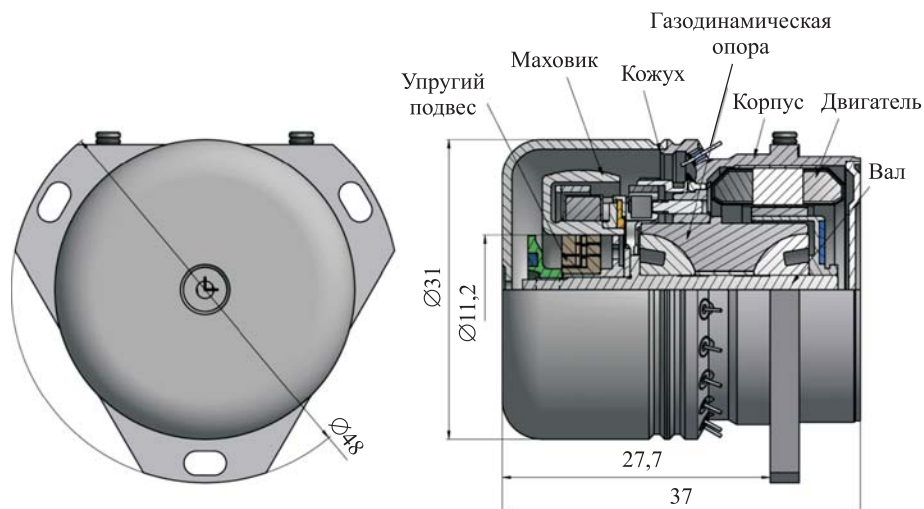


Рис. 1. Конструкция ДНГ-091

Основными элементами ДНГ-091 являются маховик, вал, ГДО, кожух и корпус. К внешней рамке подвеса приклеен кольцевой упор, ограничивающий угол отклонения маховика и предохраняющий гироскоп от перегрузок в процессе эксплуатации.

Маховик — главный элемент ДНГ-091. Ротор закреплен на валу через внутренний карданов подвес (рис. 2), который выполнен из одной заготовки специального сплава методом электроэрозионной обработки и содержит два проме-

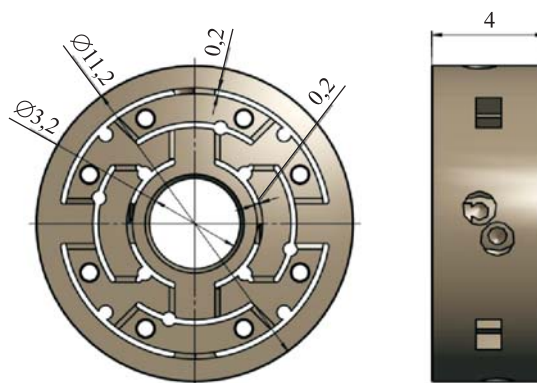


Рис. 2. Упругий подвес

жуточных кольца, так что такой двухколенный подвес представляет собой два параллельно работающих идентичных кардана, развернутых относительно друг друга на 90° вокруг оси вала. Ротор имеет возможность отклоняться относительно вала благодаря деформации упругих перемычек подвеса. Угол наклона маховика ограничивается кольцевым упором, который приклеен к подвесу [7].

В процессе эксплуатации в составе малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости ДНГ-091 испытывает внешние механиче-

ские воздействия (вибрации, удары, линейные перегрузки), заданные в техническом задании на прибор (табл. 1). В составе гироскопического прибора значения данных воздействий уменьшаются до допустимого уровня, определяемого функционированием чувствительного элемента, с помощью специальных систем виброгашения — систем амортизации. Но чтобы их создать, необходимо знать допустимые уровни механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп. В НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова при создании малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости задача по снижению внешних механических воздействий на ДНГ-091 в составе прибора решалась впервые. Ранее при проектировании гиросtabilизированных платформ или гироскопических измерителей вектора угловой скорости применялись более «крупные» ДНГ, имеющие в составе конструкции шарикоподшипниковую опору и более мощный упругий подвес. Задача определения допустимых механических воздействий на «миниатюрный» ДНГ-091 и дополнительно во включенном состоянии (при вращающейся ГДО) стояла впервые.

Таблица 1

Заданные внешние механические воздействия на малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловой скорости

Номер режима (воздействия)	Воздействие	В направлениях приборных осей (X, Y, Z)	
		Частота, Гц	Уровень
1	Синусоидальная вибрация (прибор выключен)	5–10	$\pm 1 g$
		10–20	от ± 1 до $\pm 15 g$
		20–100	$\pm 15 g$
2	Случайная вибрация (ШСВ) (прибор включен)	20–80	3 дБ/окт
		80–350	$0,04 g^2/\text{Гц}$
		350–2000	-3 дБ/окт
3	Случайная вибрация (ШСВ) (прибор выключен)	20–100	+3 дБ/окт
		100–600	$0,25 g^2/\text{Гц}$
		600–2000	-9 дБ/окт
4	Ударные воздействия (прибор выключен)	60 g длительностью 1...3 мс по каждой оси макета, по 3 удара в каждом направлении	

Результаты проведенных расчетов и экспериментов. Самыми хрупкими элементами ДНГ являются подвес и газодинамическая опора.

Упругий подвес выполнен из стали 21НКМТ-ВИ с механическими свойствами, необходимыми для работы подвеса в составе чувствительного элемента.

Основным параметром, характеризующим упругие свойства подвеса, является предел пропорциональности, равный $100 \dots 140 \text{ кг/мм}^2$ [6].

Для оценки допустимой нагрузки на подвес ДНГ-091 был выполнен прочностной расчет с созданием в программе ANSYS конечно-элементной модели подвеса с точным разбиением миниатюрных элементов конструкции подвеса.

Расчетная резонансная частота подвеса находится в диапазоне от 1500 до 800 Гц, коэффициент передачи подвеса $Q = 100$ [8].

Расчетные значения податливостей и напряжений в подвесе показывают, что подвес ДНГ-091 в осевом направлении более податлив. При приложении нагрузки 100 g в переключках подвеса возникают напряжения, равные пределу пропорциональности подвеса $\sim 100 \text{ кг/мм}^2$. На рис. 3 приведено максимально напряженное состояние переключек подвеса при действии нагрузки.

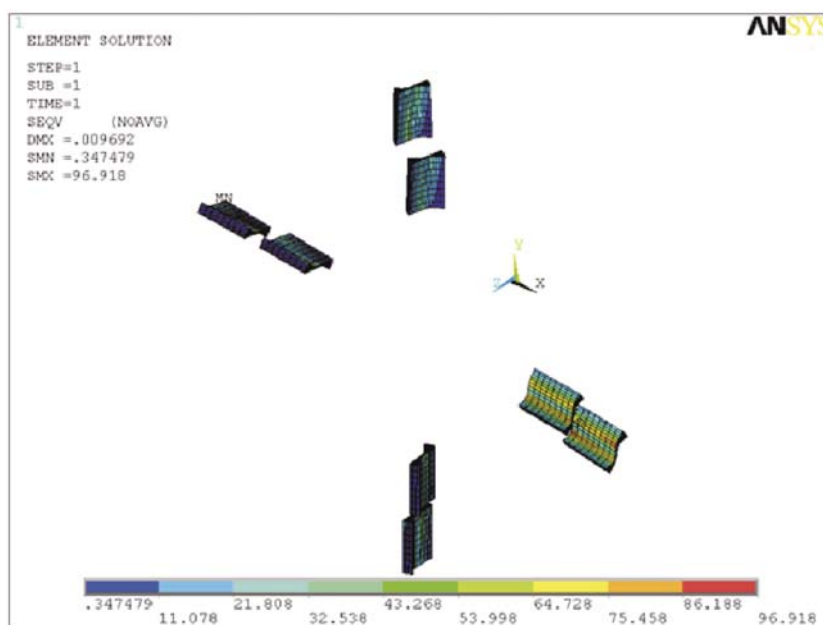


Рис. 3. Напряжения в переключках подвеса при нагружении 100 g

Таким образом, можно сделать вывод, что допустимая нагрузка на подвес и, соответственно, на ДНГ-091 составляет 100 g .

Результаты испытаний ДНГ-091 в составе малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости подтверждают его работоспособность при возникновении ускорения на чувствительном элементе порядка 90 g .

Другим элементом конструкции ДНГ-091, чувствительным к действию нагрузки, является ГДО (рис. 4). Здесь речь идет о случайных вибрациях, действующих на прибор во включенном режиме работы. При действии механических нагрузок при включенном двигателе ДНГ-091 необходимо знать несущую способность ГДО, т. е. ее допустимые внешние механические воздействия, при которых она будет обеспечивать требуемые параметры прибора.

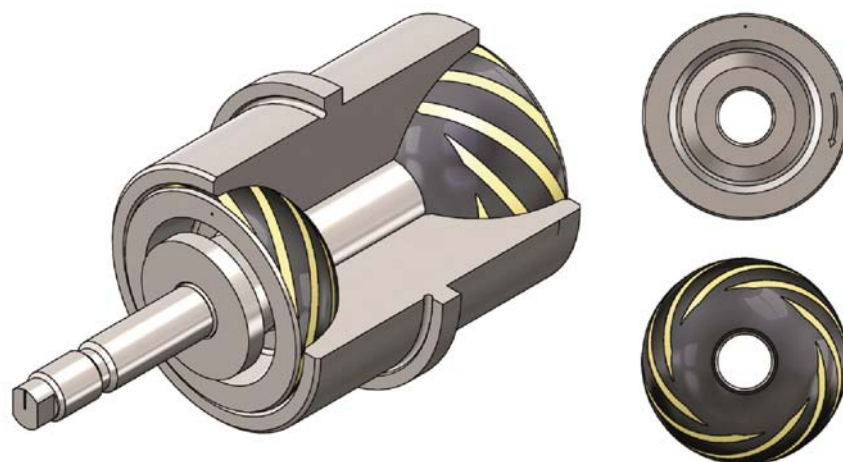


Рис. 4. Газодинамическая опора

Теоретический анализ несущей способности ГДО достаточно трудоемок и заслуживает отдельного внимания. В настоящей работе приведены результаты натурных испытаний, проводимых для определения допустимой вибрационной нагрузки на ГДО.

В проведенном эксперименте измеряли скорость посадки и время выбега ротора ДНГ-091, установленного на вибростенд, ДНГ-091 запускали на рабочую скорость (30 000 об/мин), после чего задавали виброперегрузку (с дискретностью 1 g на частоте 40 Гц), затем отключали питание двигателя и измеряли скорость посадки ГДО, далее вибрацию выключали. Выбор частоты вибрации определяется возможностями вибростенда при малых перегрузках, таким образом, частота вибрации составляет 40 Гц. Несущую способность на рабочей скорости не измеряли из-за опасения повредить упругий подвес ДНГ, значение несущей способности по принятой методике прогнозировали по поведению прибора на отрезке сравнительно небольших скоростей посадки и, соответственно, перегрузок, меньших несущей способности [9].

Результаты экспериментов по определению несущей способности ГДО на вибростенде приведены в табл. 2. Экспериментально выявили, что несущая способность конструкции ДНГ-091 равна $n \approx (6...7) g$ в радиальном направлении и более 10 g в осевом (дальнейшего уточнения при испытаниях не проводили из опасения повредить упругий подвес ДНГ) [10].

Таблица 2

Скорость посадки ГДО при действии вибрации

Направление действия вибрации — радиальное								
<i>g</i>	0	1	2	3	4	5	6	7
<i>t, с</i>	22,6	21,6	20,6	18,1	11	6,5	4,5	2,5
Направление действия вибрации — осевое								
<i>g</i>	0	1	2	4	5	6	7	8
<i>t, с</i>	43,3	43	42,8	38,2	37,7	34,7	32,2	31,1

При изготовлении малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости были проведены вибродинамические испытания. При задании на МБИС случайной вибрации (см. табл. 1, режим 2) ДНГ-091 подтвердил свое функционирование с вращающейся ГДО. В месте установки ДНГ-091 было получено ускорение 11 g для осевого и радиального направлений. Превышение экспериментально полученного значения 11 g, при котором ДНГ-091 подтвердил свою функциональность, над значением (6...7) g, которое определено при автономных испытаниях ДНГ-091, объясняется тем, что последнее выбрано на основе прогноза перегрузки, при которой ГДО полностью остановится. Реально на ДНГ при проведении автономных испытаний не задавалась нагрузка, повлекшая остановку ГДО.

На рис. 5 приведена виброграмма, полученная с датчика, расположенного в месте установки ДНГ-091 в составе малогабаритного гироскопического измерителя вектора угловой скорости, при задании вибрации в боковом направлении.

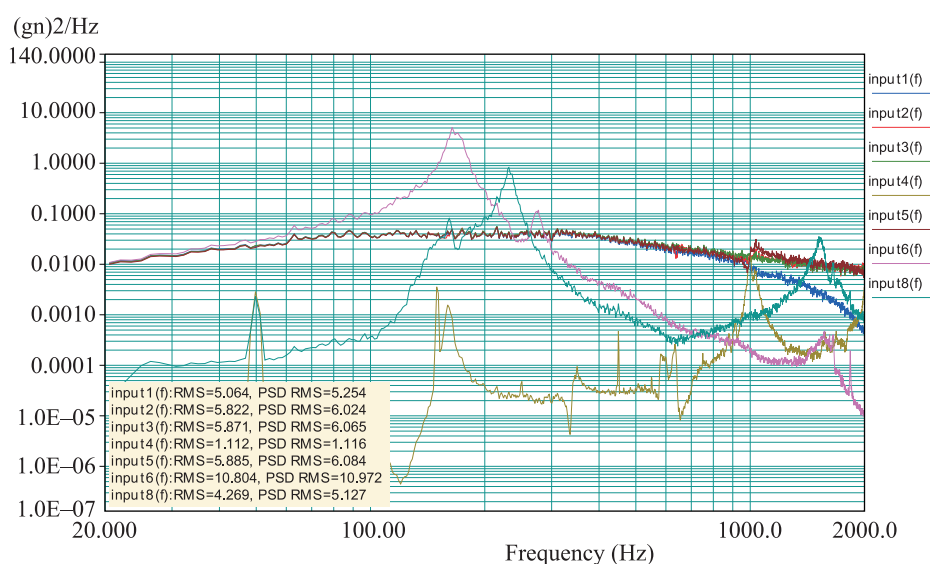


Рис. 5. Виброграмма блока чувствительных элементов

Применение полученных результатов. Полученные допустимые механические воздействия на динамически настраиваемый гироскоп ДНГ-091 ранее не были освещены в научных статьях и работах, но были успешно применены при создании систем амортизации вибродинамических воздействий приборов типа малогабаритный гироскопический измеритель вектора угловых скоростей, разрабатываемых и изготавливаемых в НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова, некоторые из них проходят натурную эксплуатацию в составе системы управления космических аппаратов.

Заключение. В результате проведенной работы на основе прочностного расчета в программе ANSYS было определено допустимое значение механической нагрузки на динамически настраиваемый гироскоп при невращающейся

опоре двигателя, это значение составило 100 g. На основе автономных вибрационных испытаний ДНГ-091 найдено допустимое значение вибрационной нагрузки, действующей на ДНГ-091 с вращающейся газодинамической опорой. Данное значение составило (6...7) g при действии нагрузки в радиальном направлении и порядка 10 g при действии нагрузки в осевом направлении.

Результаты проделанной работы будут интересны при создании систем амортизации, обеспечивающих стойкость гироскопических приборов к внешним механическим воздействиям. Опыт использования динамически настраиваемого гироскопа во включенном состоянии при действии вибрационных нагрузок будет интересен при рассмотрении возможности расширения области применения динамически настраиваемого гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фатеев В.В., Подчезерцев В.П., Лютый М.Н. Вибрационный датчик угловой скорости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1999. № 1 (33). С. 59–68.
2. Новиков Л.З., Шаталов М.Ю. Механика динамически настраиваемых гироскопов. М.: Наука, 1985. 245 с.
3. Колосов Ю.А., Ляховецкий Ю.Г., Рахтеенко Е.Р. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. М.: Высшая школа, 1977. 233 с.
4. Дубинин А.В. Повышение ресурса газодинамической опоры малогабаритного динамически настраиваемого гироскопа для космических аппаратов. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 118 с.
5. Богатов А.Д., Игнатъев А.А., Кирюхин А.А. Динамически настраиваемый гироскоп. Патент 2248524 РФ. Заявл. 29.04.2004, опубл. 20.03.2005.
6. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. Материаловедение. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
7. Матвеев В.А., Подчезерцев В.П., Фатеев В.В. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.
8. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
9. Пельпор Д.С., Матвеев В.А., Арсеньев В.Д. Динамически настраиваемые гироскопы. Теория и конструкция. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.
10. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1579
URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/dsmi/1579.html>

Топильская Светлана Владимировна — ведущий инженер-конструктор НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А).

Бородулин Денис Сергеевич — начальник отделения НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А).

Корнюхин Алексей Владимирович — заместитель начальника отделения НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Экспериментальная оценка допустимых механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 4. С. 69–79.

DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ALLOWABLE MECHANICAL IMPACT ON DYNAMICALLY ADJUSTED GYROSCOPE

S.V. Topilskaya

s.v.topilskaya@mail.ru

D.S. Borodulin

d.s.borodulin@niipm.ru

A.V. Korniyukhin

lexey1984@inbox.ru

Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics, Moscow, Russian Federation

Abstract

Dynamically adjusted gyroscope are successfully applied in space and aviation technology. They have small overall mass characteristics at mean measurement accuracy. The study focuses on a dynamically adjusted gyroscope applied in a compact gyroscopic device for measuring the spacecraft spin vector. The main elements of the design are the miniature elastic suspension and gas dynamic support, the latter providing up to 15 years of the device service life. These design elements are very sensitive to mechanical loads, which act when the space vehicle is led out by a carrier rocket. For the compact gyroscopic device for measuring the spacecraft spin vector to be resistant to external mechanical impacts, we estimated allowable loads on the dynamically adjusted gyroscope, the loads being determined by the suspension strength and the work of the gas dynamic support. The results obtained were taken into account when implementing damping systems which provide resistance of small gyroscopic devices of different types to external mechanical impacts

Keywords

Gyroscopic device, dynamically adjusted gyroscope, mechanical impact

Received 19.12.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Fateev V.V., Podchertsev V.P., Lyutyy M.N. Vibration sensor of angular velocity. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 1999, no. 1 (33), pp. 59–68 (in Russ.).
- [2] Novikov L.Z., Shatalov M.Yu. *Mekhanika dinamicheski nastraivaemykh giroskopov* [Dynamics of dynamically tuned gyroscope]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 245 p.
- [3] Kolosov Yu.A., Lyakhovetskiy Yu.G., Rakhtenko E.R. *Giroskopicheskie sistemy. Proektirovanie giroskopicheskikh system* [Gyroscope systems. Gyroscope system designing]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 233 p.
- [4] Dubinin A.V. *Povyshenie resursa gazodinamicheskoy opory malogabaritnogo dinamicheski nastraivaemogo girosokopa dlya kosmicheskikh apparatov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving resource of gas-lubricated spin-axis bearing system of dynamically tuned gyroscope for spacecraft. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 118 p.

- [5] Bogatov A.D., Ignat'ev A.A., Kiryukhin A.A. Dinamicheski nastraivaemyy giroskop [Dynamically tuned gyroscope]. Patent 2248524 RF. Appl. 29.04.2004, publ. 20.03.2005.
- [6] Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G. Materialovedenie [Material engineering]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 648 p.
- [7] Matveev V.A., Podchezertsev V.P., Fateev V.V. Giroskopicheskie stabilizatory na dinamicheski nastraivaemykh vibratsionnykh giroskopakh [Gyrostabilizers based on dynamically tuned gyroscopes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 263 p.
- [8] Timoshenko S.P. Kolebaniya v inzhenernom dele [Oscillations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.
- [9] Pel'por D.S., Matveev V.A., Arsen'ev V.D. Dinamicheski nastraivaemye giroskopy. Teoriya i konstruktsiya [Dynamically tuned gyroscopes. Theory and construction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 263 p.
- [10] Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Run-to-run drift reduction of dynamically tuned gyro. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 1 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1579
Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mech/dsmi/1579.html>

Topilskaya S.V. — Leading Design Engineer, Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics (Prud Klyuchiki ul. 12A, Moscow, 111024 Russian Federation).

Borodulin D.S. — Head of Department, Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics (Prud Klyuchiki ul. 12A, Moscow, 111024 Russian Federation).

Kornyukhin A.V. — Deputy Head of Department, Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics (Prud Klyuchiki ul. 12A, Moscow, 111024 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Korniyukhin A.V. Experimental Estimation of Allowable Mechanical Impact on Dynamically Adjusted Gyroscope. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 4, pp. 69–79 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79