

УДК 629.7.058.82-752.4

К ВОПРОСУ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ

© 2013 М. В. Хруцкая, А. М. Камалдинов

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-производственное объединение «Технологии машиностроения»
(ФГУП «НПО «Техномаш»), г. Москва

Рассмотрены технологические возможности повышения ресурса силовых гироскопов и двигателей-маховиков за счёт совершенствования технологии их сборки. Показано, что существенно на долговечность и ресурс силовых гироскопов и двигателей-маховиков влияет предварительная осевая нагрузка на шарикоподшипниковые опоры ротора и необходимо проводить контроль её величины в условиях, приближённых к условиям эксплуатации.

Ресурс, силовой гироскоп, двигатель-маховик, предварительная осевая нагрузка, шарикоподшипниковая опора, технология сборки.

Создание перспективных инерциальных исполнительных органов систем ориентации и стабилизации космических аппаратов – силовых гироскопов (СГ) и двигателей-маховиков (ДМ) – с ресурсом работы 15 и более лет требует разработки новых конструкторских решений и новых технологий производства.

Большинство современных и разрабатываемых СГ и ДМ являются электро-механическими устройствами с быстро-вращающимися на шарикоподшипниковых (ш/п) опорах роторами. Долговечность и ресурс этих приборов определяется долговечностью шарикоподшипниковых опор – наиболее нагруженного элемента в процессе эксплуатации.

Для создания управляющего воздействия на космический аппарат (КА) СГ и ДМ используют разные физические явления.

Так, СГ для обеспечения ориентации и стабилизации КА используют гироскопический момент и ротора СГ вращаются с постоянной достаточно большой скоростью (до 30000 об/мин).

ДМ для обеспечения ориентации и стабилизации КА используют закон сохранения момента количества движения. Ротора ДМ при создании управляющего момента вращаются с ускорением и, соот-

ветственно, скорость вращения ротора изменяется в широких пределах (от -10000 до 10000 об/мин).

Увеличение долговечности и ресурса СГ и ДМ является комплексной конструкторско-технологической задачей, которая решается на этапах разработки конструкции, изготовления деталей и сборки прибора.

В статье рассматриваются вопросы увеличения долговечности и ресурса СГ и ДМ за счёт совершенствования технологии их сборки.

Установлено [1-3], что с увеличением нагрузки на подшипник долговечность его резко падает:

$$h = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{C}{Q}\right)^{3.3}, \quad (1)$$

где h – долговечность подшипников, час; n – скорость вращения, об/мин; C – коэффициент работоспособности для подшипников; Q – приведённая нагрузка на подшипник, Н.

В зависимости (1) единственным фактором, на который может оказывать влияние качество проведения технологических операций, является приведённая нагрузка на ш/п.

Анализ технологических процессов сборки СГ и ДМ позволил выявить опера-

ции, непосредственно влияющие на величину приведённой нагрузки:

- сборка электропривода;
- выставка величины предварительной осевой нагрузки;
- балансировка ротора.

Остальные операции оказывают косвенное влияние на приведённую нагрузку через деформации деталей и изменение условий контакта элементов ш/п. Обычно технологический процесс сборки приборов построен так, что контроль величин, выставленных при сборке СГ и ДМ, осуществляется не только в процессе регулирования величины, но и на других этапах сборки, которые могут повлиять на её значение. Поэтому необходимо контролировать стабильность устанавливаемых величин в рассмотренных операциях на протяжении всего технологического процесса сборки.

В рамках данной статьи рассматривается задача контроля величины предварительной осевой нагрузки ш/п опор СГ и ДМ.

Анализ технологической операции выставки величины предварительной осевой нагрузки показал, что современные методики, технологии и оборудование позволяют регулировать величину предварительной осевой нагрузки с точностью не хуже 10%. При этом в процессе изготовления СГ и ДМ обычно устанавливается предварительная осевая нагрузка на ш/п опоры ротора величиной от нескольких десятков до нескольких сотен ньютонов.

При разработке новых технологий и перспективных СГ и ДМ особое внимание необходимо уделять обеспечению стабильности величины осевой нагрузки на ш/п опоры роторов.

Таким образом, для повышения ресурса необходимо обеспечить оптималь-

ность и стабильность величины осевой нагрузки на ш/п опоры СГ и ДМ в условиях длительного космического полёта.

В табл. 1 представлены существующие методы контроля предварительной осевой нагрузки. Можно отметить следующие основные недостатки существующих технологий и оборудования для контроля величины предварительной осевой нагрузки:

- контроль проводится в «нормальных» условиях;
- контроль проводится на открытом приборе при статическом положении ротора;
- при обработке результатов измерений не учитывается трение в опорах контрольно-измерительных приспособлений, оказывающее существенное влияние на погрешность определения величины осевой нагрузки;

- при проведении контрольных испытаний не исключена и впоследствии не учитывается вероятность резкого (ударного) приложения нагрузки к опорам;

- сравнительно низкая производительность контроля из-за использования достаточно сложных схем закрепления испытываемых изделий.

В условиях космического полёта ротор обычно вращается, и на СГ и ДМ действуют следующие факторы [3, 4]:

- невесомость,
- вакуум,
- изменения температуры и другие.

Существенное увеличение долговечности и ресурса ш/п опор СГ и ДМ возможно за счёт разработки нового оборудования и технологии, обеспечивающих контроль величины осевой нагрузки в условиях, приближённых к рабочим, на всех этапах сборки.

Таблица 1. Методы контроля предварительной осевой нагрузки

Метод	Положение ротора	Точность	Тип ротора	Автоматизация метода	Условия контроля
1) По моменту трения в ш/п опоре ротора. Если эталонный груз на роторе вызывает соответствующий поворот, то натяг достаточный	Статическое при сборке	Низкая	Открытый	Затруднена	«Нормальные» климатические условия
2) По осевой жесткости. Измерение упругого прогиба в осевом направлении подвижного узла относительно неподвижного	Статическое при сборке	Высокая	Открытый	Затруднена	
3) Измерение величины перемещения ротора относительно корпуса статора	Статическое при сборке	Высокая	Открытый	Затруднена	
4) Время выбега ротора по инерции до полного прекращения вращения	Рабочее при сборке	Низкая	Открытый Закрытый	Возможна	Также возможно использовать в рабочих условиях гиросприборы
5) Частотный метод. Определение собственной или резонансной частоты, которые связаны через осевую жесткость с величиной осевой нагрузки	Рабочее и статическое, при сборке и после	Высокая	Открытый Закрытый	Возможна	

Анализ опубликованных сведений о методах контроля осевой нагрузки показал, что наиболее перспективным является частотный метод (метод контроля осевой нагрузки ш/п опор по параметрам вынужденных колебаний ротора) [4, 5], позволяющий контролировать величину осевого натяга как в открытых, так и в закрытых приборах.

Частотный метод контроля основан на существовании зависимости частоты собственных осевых вынужденных колебаний ротора прибора от величины осевой нагрузки [3, 6]:

$$F_a = \frac{1}{27} \cdot \left(\frac{Mk_r(1+k)}{k} \right)^3 \cdot \omega_a^6 = K_{\text{ТГ}} \cdot \omega_a^6, \quad (2)$$

где ω_a – собственная частота осевых колебаний ротора, рад/с; M – приведённая масса ротора гиросприбора, кг; F_a – предварительная осевая нагрузка на ш/п опору ротора, Н; k_r – коэффициент, характеризующий жесткостные свойства ш/п опоры в осевом направлении, $\text{мм}^{1/2} \cdot \text{МПа}$; $K_{\text{ТГ}}$ – коэффициент, характеризующий вибрационные свойства конкретного типа гиросприборов, учитывающий жесткостные свойства фланцев и ш/п (k), приведённую массу ротора (M) и свойства контакта (k_r).

Контроль предварительной осевой нагрузки ш/п опор СГ и ДМ частотным методом в управляемых условиях по температуре и давлению реализован в разработанной установке УИСЧ40 (установка измерения собственной частоты для силовых гироскопов массой до 40 кг). Блок-схема установки УИСЧ40 приведена на рис. 1.

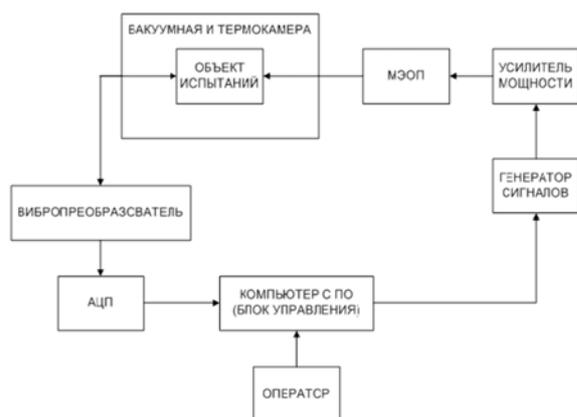


Рис. 1. Блок-схема установки УИСЧ40

Разработанное технологическое оборудование [7], основанное на частотном методе и позволяющее контролировать осевую нагрузку на всех этапах сборки, включает в себя:

- вибровозбудитель;
- виброизмеритель;
- термокамеру;
- вакуумную камеру.



Рис. 2. Установка УИСЧ40 – вид без крышки с установленным силовым гироскопом

Некоторые технические характеристики установки УИСЧ40 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики установки УИСЧ40

Масса устанавливаемых гироскопов в приспособлениях закрепления, не более, кг	40
Масса устанавливаемых двигателей маховиков в приспособлениях закрепления, не более, кг	10
Диапазон рабочих частот, Гц	(20...2000)
Допустимая величина поперечной составляющей толкающей силы, не более, %	10
Максимальное время определения собственной частоты, не более, ч	1,0
Погрешность определения собственной частоты колебаний ротора, не более, Гц	0,5
Условия работы контролируемых гироскопов:	
- давление, кПа	(0,01...102,00)
- температура, °С	(-20...+50)
- напряженность магнитного поля в зоне работы гироскопов по постоянной и переменной составляющим, не более, А/м	400

В упрощённом виде математическая модель оборудования представляет собой двухмассовую колебательную систему (рис. 3).

Испытания установки с помощью методов вибродиагностики – методики вычисления функции частотного отклика при импульсном воздействии силы [2] – позволили определить коэффициенты (собственную частоту, коэффициенты демпфирования) для двухмассовой модели, что отображено в системе уравнений (3) (рис. 4, а, б)

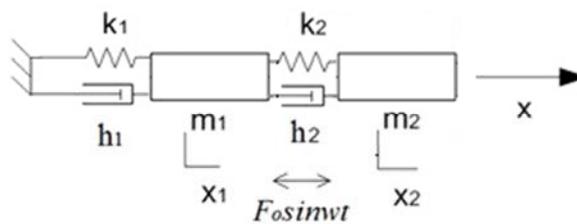


Рис. 3. Двухмассовая колебательная система: m_1, m_2 - массы камеры установки и подвеса соответственно;

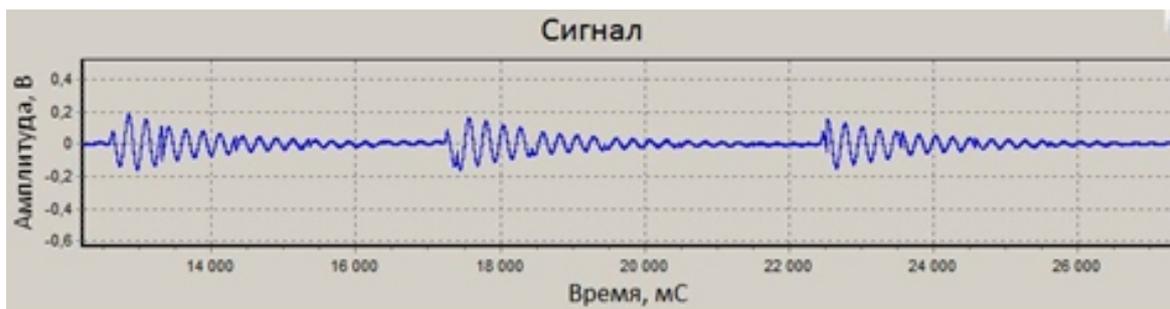
k_i, x_i - жёсткости и перемещения камеры установки и подвеса;

h_1 - коэффициент демпфирования между камерой установки и полом;

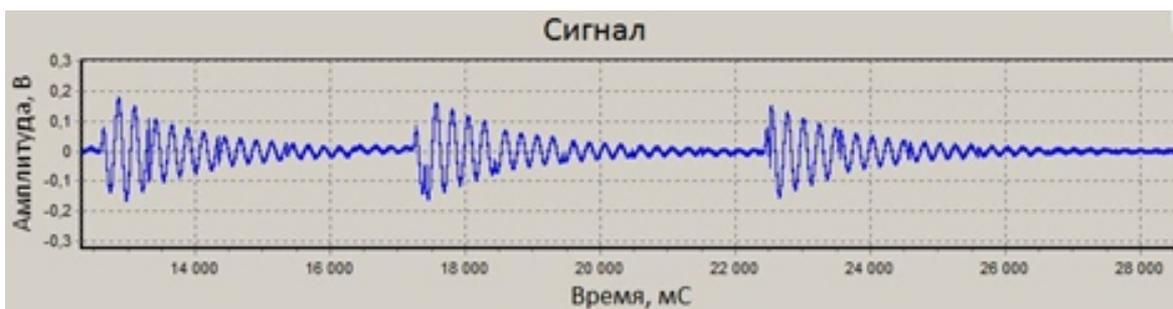
h_2 - коэффициент демпфирования между подвесом и камерой;

F_0 - возбуждающая сила

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = -0,73\dot{x}_1 + 0,71(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - 827,35x_1 + 235,41(x_2 - x_1), \\ \ddot{x}_2 = -4,47(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - 1468,99(x_2 - x_1). \end{cases} \quad (3)$$



а



б

Рис. 4. Результаты испытаний установки при импульсном воздействии: а - на подвес технологического оборудования; б - на камеру с подвесом

При установке прибора, например силового гироскопа, математическую модель можно представить в виде трёхмассовой колебательной системы (рис. 5) и описать системой (4). Для определения коэффициентов необходимо провести

экспериментальные исследования по анализу влияния факторов температуры, давления и скорости вращения ротора на величину осевой собственной частоты колебаний.

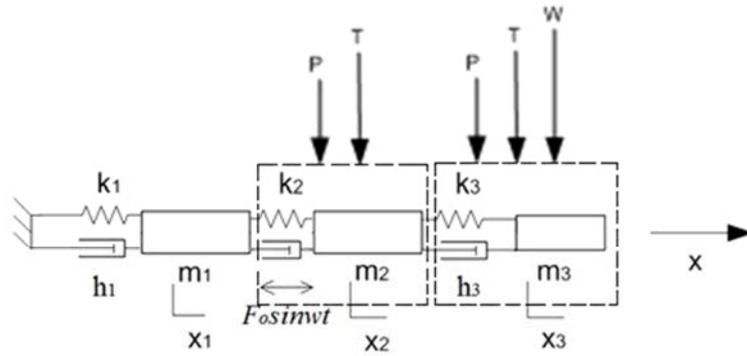


Рис. 5. Трёхмассовая механическая колебательная система с учётом факторов влияния температуры (T), давления (p) и скорости вращения ротора (w)

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F \\ F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{(h_1+h_2)}{m_1} & -\frac{h_2}{m_1} & 0 \\ -\frac{h_2}{m_2} & \frac{(h_2+h_3)}{m_2} & -\frac{h_3}{m_2} \\ 0 & -\frac{h_3}{m_3} & \frac{h_3}{m_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{(k_1+k_2)}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} & 0 \\ -\frac{k_2}{m_2} & \frac{(k_2+k_3)}{m_2} & -\frac{k_3}{m_2} \\ 0 & -\frac{k_3}{m_3} & \frac{k_3}{m_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где m_i, k_i, h_i, x_i – жёсткости, демпфирования и перемещения камеры установки, подвеса и ротора гироскопа соответственно; F_0 – возбуждающая сила.

Влияние факторов температуры, давления и скорости вращения ротора на собственную частоту осевых колебаний ротора для нормированных переменных можно определить с помощью теории планирования эксперимента и представить в следующем виде [3]:

$$\omega_a(T, p, w) = b_0 + \sum b_i \tilde{x}_i + \sum b_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j + \sum b_{ijk} \tilde{x}_i \tilde{x}_j \tilde{x}_k + \sum b_{ii} \tilde{x}_i^2, \quad (5)$$

где b_i – коэффициенты модели; x_i – нормированные значения переменных факторов T, p, w ; T – значение температуры, °С; p – значения давления, Па; w – значение скорости вращения шарикоподшипниковых опор ротора, об/мин.

В частности, для фактора температуры T :

$$\tilde{x}_1 = \frac{T - T_{cp}}{\Delta T}, \quad (6)$$

где T_{cp} – среднее значение температуры на заданном интервале, °С; ΔT – значение полуинтервала варьирования, °С.

Зависимость (5) учитывает предполагаемую существенную нелинейность фактора скорости вращения ш/п опоры.

Первая серия испытаний установки УИСЧ40 на силовом гироскопе (открытом) подтвердила влияние скорости вращения на величину осевой собственной частоты колебаний ротора. Проведены измерения изменения виброускорения при выключенном и при раскрученном до 60 Гц и до 90 Гц СГ. Датчики виброускорения установлены на корпусе СГ и на фланце толкателя технологического оборудования. Видно, что показания штатного датчика на установке соответствуют показаниям датчика, установленного непосредственно на корпус СГ (табл. 3).

При доработке УИСЧ40 и использовании дополнительно датчиков виброскорости вибрационная картина со штатного вибропреобразователя не изменилась (табл. 4). Но стало более удобно воспринимать результат, т.к. на графике изменения значений виброскорости максимальный пик является собственной частотой ротора, а на графике изменения значений виброускорений много пиков в области высоких частот, вызванных резонансами элементов конструкции (рис. 6, 7).

Таблица 3. Результаты испытаний силового гироскопа

Состояние СГ	Значение осевой собственной частоты вынужденных колебаний ротора, Гц	
	Датчик на корпусе СГ (виброускорение)	Датчик штатный (виброускорение)
Гироскоп выключен	154	155
Гироскоп на 60 Гц	146	146
Гироскоп на 90 Гц	147	147

Таблица 4. Результаты испытаний силового гироскопа с дополнительными датчиками виброскорости

Состояние СГ	Значение осевой собственной частоты вынужденных колебаний ротора, Гц		
	Датчик на корпусе СГ (виброускорение)	Датчик штатный (виброускорение)	Датчик виброскорости
Гироскоп выключен	157	157	157
Гироскоп на 90 Гц	152	152	152

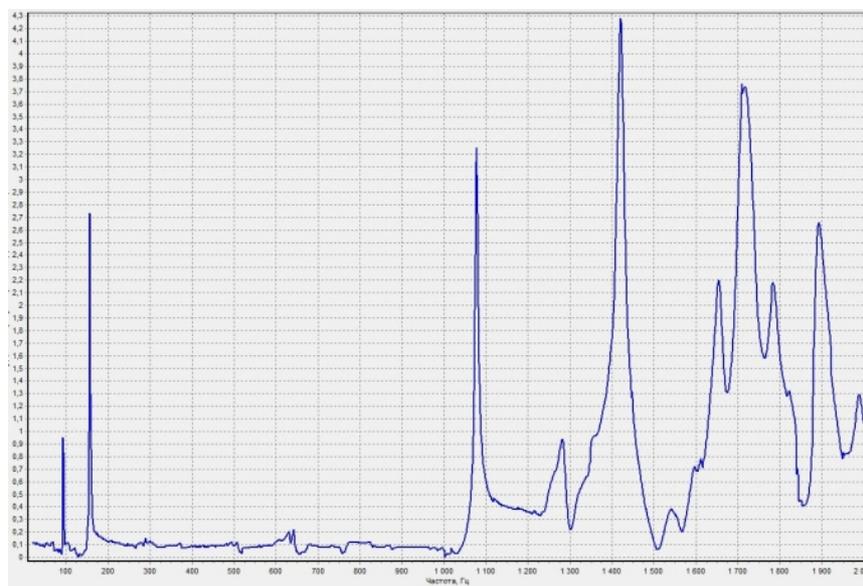


Рис. 6. График изменения значения виброускорения при вибрационном испытании выключенного СГ на штатном датчике

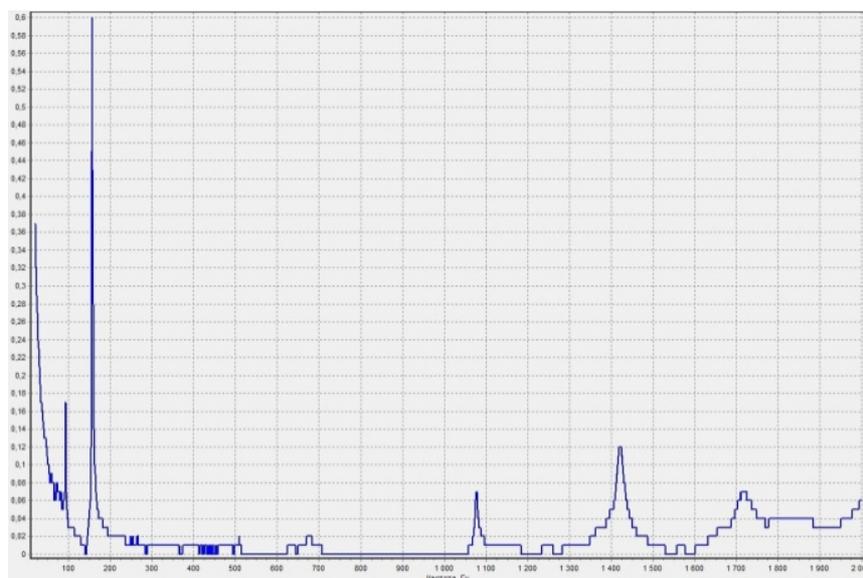


Рис. 7. График изменения значения виброскорости при вибрационном испытании выключенного СГ

Таким образом, разработанное оборудование и технология позволяют проводить технологический контроль на разных стадиях сборки приборов в управляемых условиях.

Повышение стабильности величины предварительной осевой нагрузки, устанавливаемой на ш/п опоры и контролируемой на всех стадиях сборки СГ и ДМ, может послужить основой увеличения их долговечности и ресурса.

Библиографический список

1. Ковалёв, М.П. Опоры и подвесы гироскопических устройств [Текст] / М.П. Ковалев. – М.: Машиностроение, 1970. – 286 с.
2. Бритова, Ю.А. Частотный анализ шарикоподшипниковой опоры исполнительного органа на базе управляемого двигателя-маховика, применяемого для управления ориентацией космического аппарата [Текст] / Ю.А. Бритова. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3.
3. Хруцкая, М.В. Технологические резервы увеличения долговечности

силовых гироскопов и двигателей-маховиков [Текст] / М.В. Хруцкая, А.М. Камалдинов // Сб. науч. тр. «Прогрессивные разработки учёных – новым изделиям ракетно-космической техники». – М.: Издательство ООО «Фолиум», 2013.

4. Пельпор, Д.С. Гироскопические системы. Элементы гироскопических приборов [Текст] / Е.А. Никитин, Е.А. Шестов, В.А. Матвеев.; под ред. Д.С. Пельпора. – 2-е изд. – М.: Высш. школа, 1988. – 432 с.

5. Технология производства гироскопических приборов [Текст] / Б.А. Хохлов, П.В. Сыроватченко, Е.П. Чернышев [и др.] – М.: Машиностроение, 1969. – 416 с.

6. Бальмонт, В.Б. Опоры качения приборов [Текст] / В.Б. Бальмонт, В.А. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

7. Установка для измерения собственной частоты колебаний роторов силовых гироскопов [Текст]: заявка № 2012144251 от 18.10.2012 на выдачу патента РФ на изобретение / А.М. Камалдинов, М.В. Хруцкая, Д.В. Виноградов.

INCREASING THE LIFETIME OF POWER GYROSCOPES AND MOMENTUM WHEELS

© 2013 M. V. Khrutskaya, A. M. Kamaldinov

Federal State Unitary Enterprise “Scientific and Production Association
“Mechanical Engineering Technology” (FSUE “NPO “Technomash”), Moscow

The article discusses technological capabilities of increasing the lifetime of power gyroscopes and momentum wheels due to the improvements in the technology of assembling them. It is shown that the axial preload on the main bearings of power gyroscopes and momentum wheels has a considerable influence on their lifetime. It is necessary to control the magnitude of the axial preload in conditions close to operating ones.

Lifetime, power gyroscope, momentum wheel, axial preload, main bearings, assembly technology.

Информация об авторах

Хруцкая Мария Владимировна, инженер-конструктор отделения «Технологии производства гироскопов и приборов точной механики», «НПО «Техномаш». E-mail: maria.khrutskaya@gmail.com. Область научных интересов: технология производства гироскопических приборов.

Камалдинов Альберт Мубаракovich, кандидат технических наук, начальник отделения «Технологии производства гироскопов и приборов точной механики», «НПО «Техномаш». E-mail: 260@tmnpo.ru. Область научных интересов: технология производства гироскопических приборов.

Khrutskaya Maria Vladimirovna, design engineer of the department “Gyroscopes and precision mechanics instruments production technology”. E-mail: maria.khrutskaya@gmail.com. Area of research: gyroscope production technology, vibration-based diagnostics, momentum measurement, gyroscope rotor balancing.

Kamaldinov Albert Mubarakovich, candidate of technical science, head of the “Gyroscopes and precision mechanics instruments production technology” department. E-mail: 260@tmnpo.ru. Area of research: gyroscope production technology, vibration-based diagnostics, momentum measurement, gyroscope rotor balancing.