

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

М.В. Хруцкая

maria.khrutskaya@gmail.com

АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены проблемы контроля предварительной осевой нагрузки на шарикоподшипниковую опору ротора силового гироскопа частотным методом. С использованием статистических методов идентификации и оптимизации сложных систем на специальной установке, сочетающей в себе термическую, вакуумную камеры и вибрационную установку, проведено исследование влияния скорости вращения ротора силового гироскопа на собственную частоту его колебаний при варьируемых условиях окружающей среды. В виде математической модели выявлена взаимозависимость скорости вращения ротора, температуры и давления окружающей среды и собственной частоты вынужденных колебаний ротора, причем характер зависимости каждого исследуемого параметра нелинейный. Определено, что влияние скорости вращения на собственную частоту колебаний ротора силового гироскопа существенно меняется при разных значениях температуры и давления окружающей среды, причем при статическом положении ротора значение собственной частоты максимально. Результаты исследования позволяют проводить технологический контроль собственной частоты колебаний ротора на разных стадиях сборки приборов в управляемых условиях и могут быть использованы при разработке методов контроля частотных характеристик инерционных исполнительных органов систем ориентации и стабилизации космических аппаратов

Ключевые слова

Собственная частота, предварительная осевая нагрузка, шарикоподшипниковая опора, силовой гироскоп, статистические методы, технологический контроль, качество сборки

Поступила 26.10.2021

Принята 14.12.2021

© Автор(ы), 2022

Введение. Одним из важнейших элементов инерционных исполнительных органов систем ориентации и стабилизации перспективных высокоманевренных космических аппаратов (КА) орбитальных систем дистан-

ционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются силовые гироскопы (СГ) и двигатели-маховики (ДМ) с шарикоподшипниковыми опорами.

Точность и ресурс СГ и ДМ во многом зависят от предварительной осевой нагрузки на шарикоподшипниковые опоры, формируемой в процессе сборки изделий и задаваемой с учетом рабочей скорости вращения. Взаимосвязь осевой собственной частоты вынужденных колебаний ротора и осевой нагрузки определяется следующим соотношением [1, 2]:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{3}{m_{\text{пр}}}} \frac{\sqrt[6]{D_{\text{ш}} n^2}}{\sqrt{c_{\text{н}} + c_{\text{в}}}} (\sin \alpha)^{5/6} \sqrt[6]{F_a},$$

где ω_a — собственная частота колебаний ротора гироскопа; $m_{\text{пр}}$ — приведенная масса ротора; $D_{\text{ш}}$ — диаметр шарика; n — число шариков; α — угол контакта шарикоподшипника; $c_{\text{н}}$, $c_{\text{в}}$ — коэффициенты контакта шариков по наружному и внутреннему кольцам шарикоподшипника; F_a — предварительная осевая нагрузка на шарикоподшипниковую опору ротора.

Основные сравнительные характеристики существующих методов контроля осевой нагрузки [3–6] на шарикоподшипниковые опоры гироскопов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Методы контроля предварительной осевой нагрузки

Метод контроля	Тип ротора	Климатические условия контроля	Точность контроля
1. По моменту трения в шарикоподшипниковой опоре (осевая нагрузка полагается достаточной, если эталонный груз приводит к требуемому повороту ротора)	Открытый	Нормальные	Низкая
2. По осевой жесткости (по значению упругого прогиба в осевом направлении подвижного узла относительно неподвижного)			Высокая
3. По значению перемещения ротора относительно корпуса статора			Низкая
4. По времени «выбега» ротора по инерции до полного останова			
5. Частотный метод (с определением собственной или резонансной частоты, связанной через осевую жесткость с осевой нагрузкой)	Открытый, закрытый	Нормальные или рабочие	Высокая

Первые три метода предполагают статическое положение ротора при сборке, четвертый — рабочее положение ротора при сборке, пятый — рабочее и статическое положения, что позволяет проводить контроль на всех этапах сборки, влияющих на значение осевой нагрузки; для четвертого и пятого методов возможна автоматизация контроля.

В настоящее время в применяемой технологии сборки СГ и ДМ на предприятиях, производящих СГ и ДМ (АО «НИИ командных приборов», Санкт-Петербург; АО «НПЦ «Полюс», г. Томск; АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва), контроль осевых нагрузок на их шарикоподшипниковые опоры выполняется:

- с ручным измерением перемещений подвижных узлов относительно неподвижных только в осевом направлении;

- только на открытых роторах при их статическом положении;

- в нормальных (по температуре и давлению) условиях.

Погрешность оценки осевой нагрузки составляет ~ 10 %, что неприемлемо для выполнения задач перспективных систем ДЗЗ.

Для соблюдения возросших требований, предъявляемых к функциональным задачам систем ДЗЗ, необходимо обеспечить возможность контроля осевой нагрузки на открытых и закрытых приборах на всех этапах сборки, влияющих на значение осевой нагрузки, и в условиях, максимально приближенных к рабочим (эксплуатационным). Необходимо также максимально автоматизировать технологию контроля осевой нагрузки и уменьшить до 5 % (не менее) погрешность контроля осевой нагрузки.

В рамках решения приведенных задач показано исследование собственной частоты СГ открытого типа частотным методом [7, 8] при изменении скорости вращения ротора, давления и температуры окружающей среды.

Цель настоящей работы — выявить и подтвердить существование взаимосвязи между скоростью вращения ротора гироскопа и собственной частотой его колебаний, а также определить влияние на собственную частоту колебаний ротора параметров окружающей среды — давления и температуры; выяснить вид зависимости собственной частоты от полученных факторов.

В настоящее время известны исследования о влиянии скорости вращения ротора на упругие деформационные свойства шарикоподшипников [9, 10], но только при нормальных значениях температуры и давления. При этом предполагается, что переменность жесткости подшипника и ее нелинейность [11] при изменении параметров окружающей среды суще-

ственно скажутся на амплитудно-частотной характеристике роторной системы [7].

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Исследование проводилось с использованием статистических методов идентификации и оптимизации сложных систем [12, 13] на специально разработанной в АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева» установке (рис. 1) [14].



Рис. 1. Опытный образец установки

Основными элементами установки являются:

- механическая часть станда, включающая в себя термовакуумную камеру, вибростенды, подвесную систему для установки гиросприборов;
- стойка с электронно-вычислительным оборудованием основного блока управления, включая персональный компьютер с установленным разработанным специальным программно-математическим обеспечением;
- две стойки с электронно-вычислительным оборудованием для управления системой терморегулирования;
- комплект приспособлений для закрепления гиросприборов.

Оборудование позволяет выполнять автоматизированный контроль собственной частоты колебаний роторов СГ на всех этапах сборки, создавая в рабочем объеме оборудования условия, приближенные к эксплуатационным: давление 0,01...102,00 кПа и температуру от -20 до 50 °С. Специальное программно-математическое обеспечение позволяет настраивать датчики установки, управлять внешним воздействием на испытуемый прибор, осуществлять расчетное и графическое представление текущего измерения, формировать файл-отчет с результатами измерений (программа Osnag).

Объектом исследования по определению собственной частоты являлся СГ типа Лд811-007 со следующими характеристиками: габаритные размеры гироскопа в сборе 240×190 мм; массы прибора и ротора 24 и 17 кг; скорость вращения (на рабочих оборотах в вакууме) 165 с^{-1} ; номинальная собственная частота ротора в статическом положении при нормальных условиях 140 ± 30 Гц.

В качестве плана эксперимента выбран эксперимент В₃ [15] — полный факторный эксперимент типа 2³, при котором уровни каждого фактора комбинируются со всеми уровнями других факторов. Чтобы проверить, может ли быть соотношение между факторами и зависимой переменной нелинейным, в план эксперимента добавлены опыты в центральных точках (обозначены «0» в столбцах переменных, табл. 2). Диапазоны варьирования факторов, влияние которых на собственную частоту колебаний ротора исследуется в эксперименте, следующие: 0...80 с⁻¹ для скорости вращения ротора (x_1); 20...40 °С для температуры окружающей среды (x_2); 50...750 мм рт. ст. для давления окружающей среды (x_3).

В теории планирования эксперимента используются нормированные факторы, т. е. безразмерные величины, переход к которым для каждого фактора x_i задается соотношением:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$

где X_i — значение i -го фактора в натуральном масштабе измерения; $X_{i0} = (X_{i\max} - X_{i\min})/2$ — натуральное значение основного уровня фактора, соответствующее нулю в безразмерной шкале; $\Delta X_i = (X_{i\max} - X_{i\min})/2$ — интервал варьирования фактора. Фактор x_i в опыте может принимать значение 1 или -1 (верхний и нижний уровень), т. е. областью планирования является гиперкуб, так как $-1 \leq x_i \leq 1$, $i = 1, 2, 3$. Поэтому в табл. 2 обозначены условия проведения опытов для каждой переменной «-», «+», «0», что означает начало, конец интервала и его центральную точку.

Таблица 2

Экспериментальные значения частоты собственных колебаний ротора

Номер опыта	Матрица			Результаты опытов						Медианное значение
	x_1	x_2	x_3	1		2	3			
1	-	-	-	173,0	173,0	180,0	176,5	177,0	174,0	175,2
2	+	-	-	172,0	-	170,0	174,0	173,5	169,5	172,0
3	-	+	-	178,0	-	164,0	163,0	-	164,0	164,0
4	+	+	-	167,0	-	161,0	162,0	-	162,0	162,0
5	-	-	+	156,0	-	154,0	153,5	154,5	150,0	154,0
6	+	-	+	152,0	-	151,0	149,5	148,5	140,5	149,5
7	-	+	+	154,0	144,0	-	144,0	-	145,0	144,5
8	+	+	+	136,0	-	137,0	133,0	-	134,5	135,2

Номер опыта	Матрица			Результаты опытов						Медианное значение
	x_1	x_2	x_3	1		2	3			
9	-	0	0	176,0	-	163,0	161,5	-	168,0	165,5
10	+	0	0	164,0	-	157,0	161,5	-	162,5	162,7
11	0	-	0	163,0	-	174,0	172,0	166,0	162,5	166,0
12	0	+	0	151,0	-	148,0	146,5	-	147,5	147,7
13	0	0	-	174,0	-	162,0	159,5	-	163,0	162,5
14	0	0	+	143,0	143,0	-	142,0	-	142,5	142,8
κ	0	0	0	173,0	160,0	173,0	159,0	-	158,5	160,0

Полученные результаты исследования приведены в табл. 2. Для всех строк матрицы плана выполнено по три рандомизированных серии экспериментов с тремя независимыми повторными измерениями исследуемой характеристики в каждой серии и по осредненным (медианным) значениям их результатов построена регрессионная модель.

Наилучшая модель по (первой + второй + третьей) сериям опытов следующая:

$$y = 158,3 - 2,2x_1 - 6,3x_2 - 11,0x_3 - 1,1x_2x_3 + 5,8x_1^2 - 1,4x_2^2 - 5,6x_3^2. \quad (1)$$

Из модели (1) следует:

- все варьируемые в эксперименте переменные факторы статистически значимо влияют на значение собственной частоты колебаний ротора, при этом характер влияния каждого фактора нелинейный;
- максимальный линейный эффект имеет давление окружающей среды и с его увеличением собственная частота уменьшается;
- конечные эффекты влияния на собственную частоту колебаний ротора всех исследуемых в эксперименте переменных факторов взаимосвязаны: влияние температуры зависит от скорости вращения ротора, а влияние давления — от температуры.

Системы линий уровня, построенные по модели (1), приведены на рис. 2–4, где показаны сечения поверхности отклика при фиксированных и переменных откликах, переменные x_i безразмерные; числа на линиях обозначают линии уровня отклика модели (1), т. е. значения собственной частоты в герцах.

Основной результат исследований — закономерности изменения собственной частоты колебаний ротора СГ при разных скоростях вращения в зависимости от температуры (x_2) и давления (x_3) окружающей среды — показан на рис. 2. График на рис. 2, а соответствует сечению по-

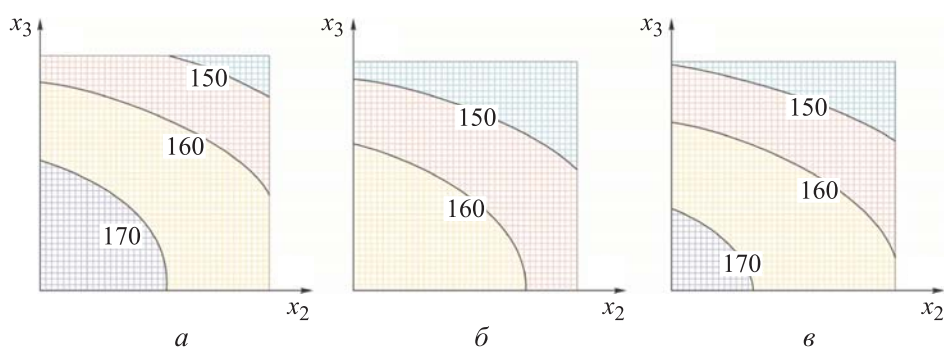


Рис. 2. Общие закономерности изменения собственной частоты ротора гироскопа в зависимости от температуры (x_2) и давления (x_3) окружающей среды для статического положения ротора (a) и вращения со скоростями 40 и 80 с^{-1} ($б, в$)

верхности модели (1) при статическом положении ротора (начало интервала варьирования переменной x_1 , «-») и переменных значениях температуры и давления, рассматриваемых в эксперименте.

Графики на рис. 2, $б, в$ соответствуют сечению поверхности модели (1) при скорости вращения ротора 40 с^{-1} (центральная точка интервала варьирования переменной x_1 , «0») и 80 с^{-1} (конец интервала варьирования переменной x_1 , «+») и переменных значениях температуры и давления.

Характерно, что:

- собственная частота колебаний ротора существенно изменяется при разных значениях температуры и давления;
- минимальные значения собственной частоты выявлены при скорости вращения ротора 40 с^{-1} , т. е. при разгоне;
- максимальные значения собственной частоты при различных значениях температуры и давления определены для статического положения ротора;
- при повышенных скоростях вращения (80 с^{-1}) значение собственной частоты колебаний ротора увеличивается.

Закономерности изменения собственной частоты колебаний ротора СГ при изменении температуры в зависимости от скорости вращения (x_1) и давления окружающей среды (x_3) приведены на рис. 3.

Общими закономерностями являются:

- тенденция к понижению собственной частоты ротора при одновременном увеличении скорости вращения и давления;
- сравнительно слабое влияние температуры на абсолютное значение и характер изменения собственной частоты колебаний ротора от скоро-

сти вращения и давления при относительно более низких (20...30 °С) значениях температуры;

– повышение чувствительности изменения собственной частоты к изменению скорости вращения и давления при температуре более 30 °С.

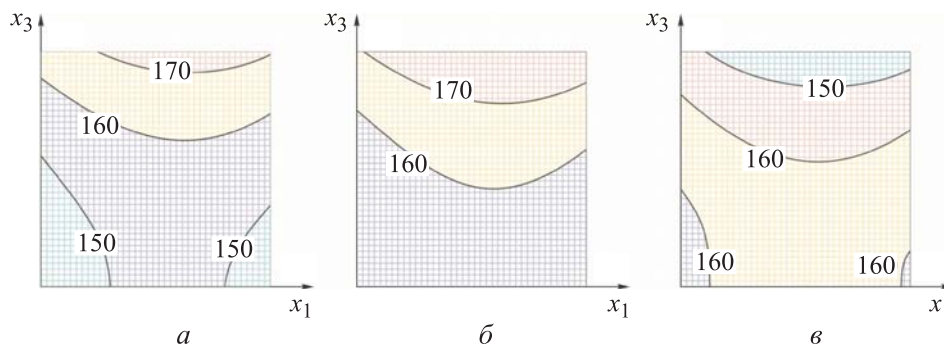


Рис. 3. Общие закономерности изменения собственной частоты ротора гироскопа в зависимости от скорости вращения ротора (x_1) и давления (x_3) окружающей среды при температуре 20, 30 и 40 °С (а–в соответственно)

Закономерности изменения собственной частоты колебаний ротора СГ при изменении давления в зависимости от скорости вращения ротора (x_1) и температуры (x_2) окружающей среды приведены на рис. 4. При нормальном атмосферном давлении (рис. 4, в) и варьируемых значениях скорости вращения и температуры значение собственных частот меньше (до 10 %), чем при пониженных давлениях.

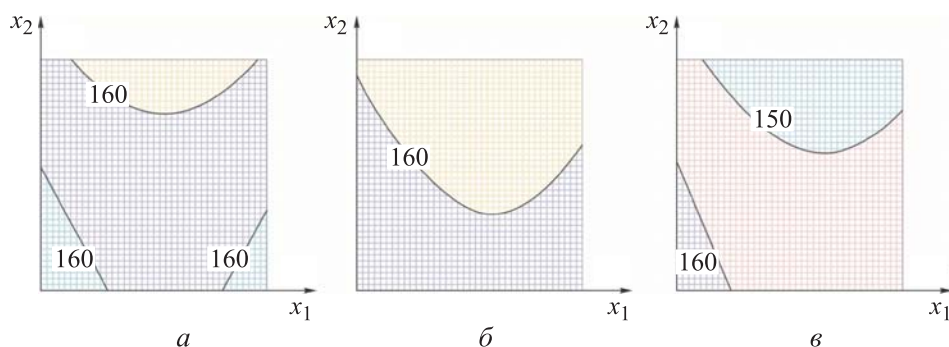


Рис. 4. Общие закономерности изменения собственной частоты ротора гироскопа в зависимости от скорости вращения ротора (x_1) и температуры (x_2) окружающей среды для давления 50, 400 и 750 мм рт. ст. (а–в соответственно)

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты сопоставимы с проведенными ранее исследованиями в плане влияния скорости вращения на нелинейность характеристик шарикоподшипниковой опоры.

Важным является выявление общей зависимости собственной частоты колебаний ротора от влияния трех переменных факторов. При этом следует учитывать, что в эксперименте ограничены значения скорости вращения (по согласованию с производителем СГ), а также значения давления и температуры.

Исследования проводились на СГ, поэтому для других гиросприборов, например ДМ, вид зависимости собственной частоты от скорости вращения и параметров окружающей среды будет другим, что также связано с конструктивными различиями в приборах.

Результаты исследований возможны к применению в технологическом процессе производства силовых гиросприборов при операциях контроля собственной или резонансной частоты на разных стадиях сборки (предварительная и чистовая сборка, сварка стяжки и др.), а также при разных параметрах окружающей среды.

Результаты исследований подтвердили существование нелинейной зависимости между собственной частотой колебаний ротора СГ и его скоростью вращения, а также определили вид зависимости собственной частоты от рассматриваемых факторов.

Направление дальнейшей работы связано с исследованиями частотных характеристик ДМ, принципиально отличающегося от СГ нагрузкой на шарикоподшипниковую опору из-за переменной скорости вращения в рабочем режиме, а также с разработкой методик контроля частотных характеристик инерционных исполнительных органов систем ориентации и стабилизации при варьироваемых параметрах окружающей среды.

Заключение. Исследованы общие закономерности изменения частотных характеристик СГ при рабочем и статическом положениях ротора в условиях варьироваемых значений давления и температуры.

Получена математическая модель изменения собственной частоты вынужденных колебаний ротора от давления и температуры окружающей среды при разных скоростях вращения.

Результаты исследований позволяют проводить технологический контроль на разных стадиях сборки приборов в управляемых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Журавлев В.Ф., Бальмонт В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов. М., Машиностроение, 1986.
- [2] Бальмонт В.Б., Матвеев В.А. Опоры качения приборов. М., Машиностроение, 1984.

- [3] Хохлов Б.А., Сыроватченко П.В., Чернышев Е.П. и др. Технология производства гироскопических приборов. М., Машиностроение, 1969.
- [4] Ковалев М.П. Опоры и подвесы гироскопических устройств. М., Машиностроение, 1970.
- [5] Явленский К.Н., Нарышкин В.Н., Чаадаева Е.Е., ред. Приборные шариковые подшипники. М., Машиностроение, 1981.
- [6] Хруцкая М.В., Камалдинов А.М. К вопросу увеличения ресурса силовых гироскопов и двигателей-маховиков. *Вестник СГАУ*, 2013, № 4, с. 270–278.
DOI: [https://doi.org/10.18287/1998-6629-2013-0-4\(42\)-270-278](https://doi.org/10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-270-278)
- [7] Кораблев С.С., Шапин В.И., Филатов Ю.Е. Вибродиагностика в прецизионном приборостроении. Л., Машиностроение, 1984.
- [8] Фролов К.В., ред. Вибрации в технике. Т. 6. Защита от вибраций и ударов. М., Машиностроение, 1981.
- [9] Бальмонт В.Б., Горелик И.Г., Левин А.М. Влияние частоты вращения на упругодеформационные свойства шпиндельных шарикоподшипников. *Станки и инструмент*, 1986, № 7, с. 15–17.
- [10] Бальмонт В.Б. Статика и динамика высокоточных шарикоподшипниковых узлов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1990, № 1, с. 55–69.
- [11] Фролов А.В., Смирнов С.В. Моделирование квазистатической переменной жесткости шарикоподшипников шпиндельных узлов металлорежущих станков. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 6 (123), с. 44–59.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2018-6-44-59>
- [12] Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М., Мир, 1967.
- [13] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., Наука, 1976.
- [14] Камалдинов А.М., Хруцкая М.В., Виноградов Д.В. Установка для измерения собственной частоты колебаний роторов силовых гироскопов. Патент РФ 2515424. Заявл. 18.10.2012, опубл. 10.05.2014.
- [15] Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М., Машиностроение, 1981.

Хруцкая Мария Владимировна — начальник отдела технологий производства приборов точной механики АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева» (Российская Федерация, 127018, Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хруцкая М.В. Технологические аспекты повышения эксплуатационных характеристик силовых гироскопов космических аппаратов систем дистанционного зондирования Земли. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 3 (142), с. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-71-83>

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF IMPROVING THE POWER GYROSCOPE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SPACE VEHICLES FOR REMOTE EARTH SENSING SYSTEMS

M.V. Khrutskaya

maria.khrutskaya@gmail.com

JSC “NPO “Technomash” named after S.A. Afanasyev”,
Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the problems of controlling the preliminary axial load on the ball-bearing support of a power gyroscope rotor by the frequency method. The study of the effect of the power gyroscope rotor rotation speed on the natural oscillation frequency under varying environmental conditions was performed on a special installation that combines a thermal, vacuum chambers and vibration installation using statistical methods for identifying and optimizing complex systems. The relationship between the natural frequency of the rotor forced oscillations and the speed of rotation, ambient temperature and pressure is identified in the form of a mathematical model, with the effect of each parameter under study being of nonlinear character. It is found that the effect of the rotation speed on the natural frequency of power gyroscope rotor oscillations changes significantly at different values of ambient temperature and pressure, and the value of the natural frequency is maximum at the static position of the rotor. The results of the study allow performing natural frequency technological control at different stages of instrument assembling under controlled conditions and can be used in the development of methods for controlling the frequency characteristics of inertial actuators of orientation and stabilization systems

Keywords

Natural frequency, axial preload, ball bearing, power gyroscope, statistical methods, process control, build quality

Received 26.10.2021

Accepted 14.12.2021

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Zhuravlev V.F., Bal'mont V.B. Mekhanika sharikopodshipnikov giroskopov [Gyro ball bearing mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986.
- [2] Bal'mont V.B., Matveev V.A. Opory kacheniya priborov [Instrument rolling bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984.

- [3] Khokhlov B.A., Syrovatchenko P.V., Chernyshev E.P., et al. *Tekhnologiya proizvodstva giroskopicheskikh priborov* [Gyroscopic production technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969.
- [4] Kovalev M.P. *Opory i podvesy giroskopicheskikh ustroystv* [Supports and suspensions of gyroscopic devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970.
- [5] Yavlenskiy K.N., Naryshkin V.N., Chaadaeva E.E., eds. *Pribornye sharikovye podshipniki* [Instrument ball bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981.
- [6] Khrutskaya M.V., Kamaldinov A.M. Increasing the lifetime of power gyroscopes and momentum wheels. *Vestnik SGAU*, 2013, no. 4, pp. 270–278 (in Russ.).
DOI: [https://doi.org/10.18287/1998-6629-2013-0-4\(42\)-270-278](https://doi.org/10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-270-278)
- [7] Korablev S.S., Shapin V.I., Filatov Yu.E. *Vibrodiagnostika v pretsizionnom priborostroenii* [Vibration diagnostics in precision instrument making]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1984.
- [8] Frolov K.V., ed. *Vibratsii v tekhnike. T. 6. Zashchita ot vibratsiy i udarov* [Vibrations in technology. Vol. 6. Vibration and shock protection]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981.
- [9] Bal'mont V.B., Gorelik I.G., Levin A.M. Influence of rotation frequency on elastic deformation properties of spindle ball bearings. *Stanki i instrument*, 1986, no. 7, pp. 15–17 (in Russ.).
- [10] Bal'mont V.B. Statics and dynamics of high-precision ball bearing units. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 1990, no. 1, pp. 55–69 (in Russ.).
- [11] Frolov A.V., Smirnov S.V. Simulating variable quasistatic stiffness of machine tool spindle unit. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2018, no. 6 (123), pp. 44–59 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2018-6-44-59>
- [12] Hicks C.R. *Fundamental concepts in the design of experiments*. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1964.
- [13] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.P. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Design of experiments in search of optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976.
- [14] Kamaldinov A.M., Khrutskaya M.V., Vinogradov D.V. *Ustanovka dlya izmereniya sobstvennoy chastoty kolebaniy rotorov silovykh giroskopov* [Plant to measure internal frequency of oscillations of rotors of power gyroscopes]. Patent RU 2515424. Appl. 18.10.2012, publ. 10.05.2014 (in Russ.).
- [15] Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Design of experiments in the research of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981.

Khrutskaya M.V. — Head of the Department for Manufacturing Technology of Precision Mechanics Instruments, JSC “NPO “Technomash” named after S.A. Afanasyev” (3-j proezd Marinoy Roshchi ul. 40, str. 1, Moscow, 127018 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Khrutskaya M.V. Technological aspects of improving the power gyroscope performance characteristics of space vehicles for remote Earth sensing systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 3 (142), pp. 71–83 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-71-83>