

◆ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ ◆

УДК 629.78
EDN: RJYUFA

Е. Л. ЛЕБЕДЕВ, А. О. РЕПИН

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С РОТОРАМИ НА ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ ОПОРАХ НА ДИНАМИКУ НАГРЕВА ИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

Представлена модель функционирования силового гироскопа, основанная на системе уравнений, которая описывает моменты и силы, действующие на элементы ротора, а также на тепловом балансе ротора гироскопа в условиях вакуума (отсутствие конвективного теплообмена). Доказана зависимость динамики изменения температуры элементов ротора от наличия нестационарного процесса нагрева с положительной обратной связью между источником тепла (подшипником) и нагреваемыми элементами ротора (вала).

Ключевые слова: силовой гироскоп, вакуум, нагрев ротора, подшипник, термодинамический баланс.

Введение

Одной из основных тенденций развития орбитальных средств является, с одной стороны, уменьшение их габаритов, а с другой – сохранение или даже наращивание их функциональных возможностей. Это приводит к тому, что изменяются требования к условиям функционирования основной или обеспечивающей аппаратуры. В частности, снижение габаритов силовых гироскопических устройств, при сохранении требуемого значения основного функционального параметра – кинетического момента, требует увеличения скорости вращения их роторов [1–6]. Как правило, при одинаковом энергопотреблении электропривода гироскопа выполнить данное требование возможно только в том случае, если будет снижено аэродинамическое сопротивление, которое испытывает маховик ротора при его вращении. Это обеспечивается путем создания вакуума внутри корпуса данных гироскопических устройств. Тем не менее практика

Лебедев Евгений Леонидович. Доктор технических наук, профессор, начальник кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского (С.-Петербург). ORCID 0000-0002-6430-8181.

Репин Алексей Олегович. Аджьонкт, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. ORCID 0000-0003-4197-1893.

эксплуатации этих устройств свидетельствует о низкой стабильности их функционирования, которая выражается в нагреве элементов изделия и останове ротора.

В зависимости от кинематической компоновки ротора наблюдаются различные закономерности его нагрева [7–9]. В статье [10] представлены результаты экспериментальных исследований высокомоментного электродвигателя (рис. 1) в условиях вакуума. Компоновка ротора этого двигателя такова, что нагрев его вала не влияет на нагрузки, действующие на подшипник. Измерялась температура элементов двигателя, места размещения термодпар указаны на рис. 1, динамика нагрева элементов двигателя приведена на рис. 2.

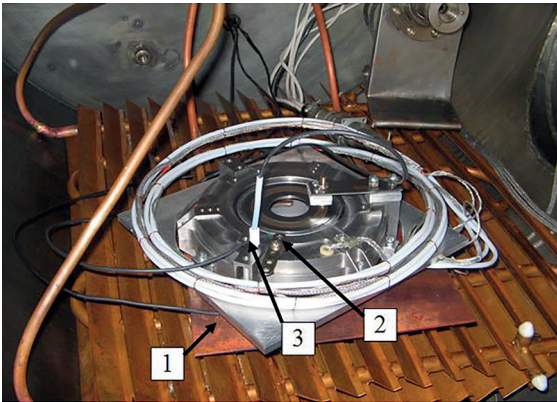


Рис. 1. Высокомоментный электродвигатель на термостабилизированной платформе. Места расположения термодпар: 1 – между поверхностью криоплатформы и корпусом двигателя (Т1); 2 – на корпусе двигателя в непосредственной близости от подшипника (Т2); 3 – во фторопластовой гильзе, касающейся обмотки статора двигателя (Т3) [10]

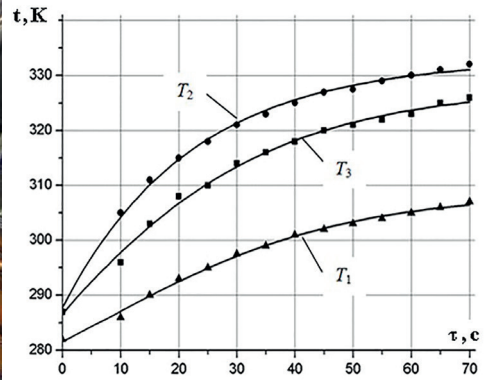


Рис. 2. Зависимость температуры корпуса двигателя (Т1), подшипника (Т2) и обмотки статора (Т3) от времени функционирования [10]

Как показано в [10], тепловая энергия, генерируемая работой подшипника и обмотки статора двигателя, способствует нагреву контролируемых элементов. Вместе с тем при отсутствии конвективного теплообмена нагрев элементов повышает теплообмен за счет теплопередачи между двигателем и термостабилизированной платформой. При этом температура стремится к значению, при котором наступает равновесие генерируемого и отводимого тепла [10].

На практике наблюдается явление, при котором температура элементов гироскопов, функционирующих в вакууме, изменяется по закону экспоненциального роста. Так, известны результаты испытаний гироскопических устройств [1, 18], выполненных по схеме, приведенной на рис. 3. Особенность данной компоновки заключается в том, что подшипники качения маховика закреплены на неподвижном валу, при этом удлинение вала по причине его температурного расширения во время нагрева будет создавать дополнительную осевую нагрузку и тем самым повышать момент, действующий на подшипник. В таком случае, согласно полученным экспериментальным данным, нагрев подшипника и вала будет осуществляться по экспоненциальному закону (рис. 4). Наряду с этим по причине повышения момента на подшипнике наблюдалось либо снижение скорости вращения, либо останов ротора гироскопа. Необходимо отметить, что после остывания гироскоп возобновлял работу. Это свидетельствует о том, что разрушения подшипника не происходит.



Рис. 3. Схема гироскопического устройства

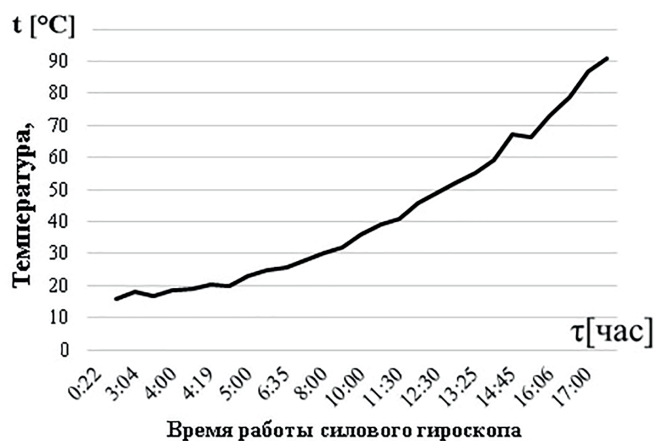


Рис. 4. Результаты телеметрических измерений температуры гироскопа

Особую важность изучение данного явления приобретает при проектировании силовых гироскопических систем, работающих в вакууме автономно в течение длительного времени.

В настоящей статье предлагается кинематическая модель функционирования гироскопа, выполненного по схеме, представленной на рис. 3, а также объясняется наблюдаемая динамика нагрева его элементов [1].

Согласно [11, 13], существующие математические модели функционирования гироскопических систем описывают процесс теплопередачи между их элементами, но при этом не учитывается взаимовлияние элементов друг на друга при их нагреве.

Предлагаемая модель основана на системе уравнений, описывающих моменты и силы, действующие на элементы ротора, а также на тепловом балансе ротора. Рассмотрим следующие уравнения упомянутой системы, характеризующие:

- момент подшипника качения с учетом силы, действующей на подшипник от вала;
- силу, действующую на подшипник от вала с учетом его температурного расширения;
- мощность трения подшипника и генерируемой при этом тепловой энергии в зависимости от момента подшипника;

- балансы тепловых потоков (генерируемого и отводимого) с учетом динамики изменения термодинамического состояния подшипниковых опор ротора в зависимости от параметров его сборки и термодинамического равновесия с учетом особенностей теплообмена в вакууме.

Модель кинетической устойчивости ротора силового гироскопа с учетом теплового баланса в условиях вакуума

Согласно данным, изложенным в [11, 13–17], момент подшипника качения определяется выражением

$$M_{\text{п}} = P \cdot j \text{ [Н} \cdot \text{м]}, \quad (1)$$

где P – усилие, действующее на подшипник [Н], j – коэффициент трения качения [м].

Следует отметить, что при функционировании в условиях невесомости, высокой точности балансировки маховика ротора и поджатия элементов подшипника, необходимого для обеспечения кинетической устойчивости (отсутствия зазоров между внутренним и наружным кольцами и шариком) силового гироскопа, воспринимаемое подшипником основное усилие исходит от вала [12]. Изменение этого усилия может определяться изменением длины вала при его расширении от нагрева. Приращение данной силы от вала диаметром d определяется согласно закону Гука:

$$\Delta P = \pi \frac{d^2}{4} \cdot \varepsilon \cdot E, \quad (2)$$

где ε – относительные деформации вала, E – модуль упругости конструкционного материала вала [Н/м²].

Относительные деформации определяются как отношение абсолютных деформаций вала Δl , к его начальной длине l_0 :

$$\varepsilon = \Delta l / l_0. \quad (3)$$

Абсолютные значения деформации соотносятся с изменением температуры вала t и определяются соотношением

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta t \cdot l_0, \quad (4)$$

где α [1/°C] – коэффициент линейного расширения конструкционного материала вала.

С учетом выражения (5) можно показать, что

$$\Delta P = \pi \frac{d^2 \alpha \cdot \Delta t}{4} \cdot E. \quad (5)$$

Таким образом, приращение момента на подшипнике от температурного расширения вала будет пропорционально повышению температуры вала:

$$\frac{dM_{\text{п}}}{d\tau} = \pi \frac{d^2 \alpha \cdot \dot{t}}{4} \cdot E \cdot j, \quad (6)$$

где \dot{t} – приращение температуры вала в секунду.

Помимо приведенных выше уравнений в предлагаемой модели необходимо учитывать выделение тепловой энергии от сопротивления вращению подшипника в условиях высокой угловой скорости и трения качения [14–16].

Необходимо отметить, что при относительно небольшом трении (какое наблюдается в рассматриваемых гироскопах) в условиях атмосферы, когда присутствует конвективный теплообмен, выделяемое подшипником тепло не является доминирующим при нагреве элементов ротора. Тем не менее в рассматриваемом объекте исследования используется вакуумирование внутреннего пространства корпуса. В этом случае конвективный теплообмен отсутствует, однако выделение тепловой энергии по причине трения в подшипнике может привести к значительному повышению его температуры. Баланс подводимой и отводимой от подшипников опор тепловой энергии обеспечивается в основном теплопроводностью через механизмы крепления вала ротора к корпусу (рис. 5).

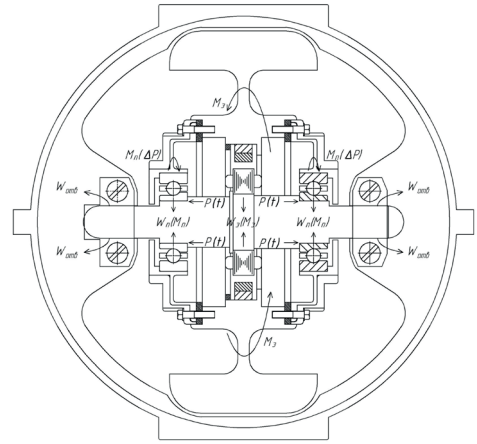


Рис. 5. Схема сил и моментов, действующих на элементы ротора, а также подводимой к валу и отводимой от него тепловой энергии [1]

При этом количество отведенного от вала в корпус тепла $W_{\text{отв}}$ (мощность отводимого от вала тепла $-N_{\text{отв}}$) будет в основном зависеть от наличия зазоров в местах сочленения этих деталей. В свою очередь, наличие зазоров обуславливается усилием поджатия вала к корпусу, а также случайными технологическими неточностями при их изготовлении (повышенной шероховатостью деталей сочленения, нарушением их формы в виде конусности, бочкообразности, седлообразности, овальности и т.д.). Величина технологических неточностей определяется технологией изготовления соответствующих деталей и погрешностью средств измерений, посредством которых осуществляется контроль их геометрии. Некорректными являются результаты измерений геометрических параметров сочленяемых деталей, отклонения которых меньше погрешности средств измерений, поэтому чем больше погрешность средств измерений, тем больше технологическая неточность. Как правило, эта погрешность составляет один микрометр, что достаточно для функционирования рассматриваемых устройств в условиях конвективного теплообмена, однако в вакууме наличие зазоров, даже соизмеримых с тысячными долями миллиметра, способно значительно повысить дисбаланс подводимой к валу и отводимой от него тепловой энергии.

Согласно [7], мощность трения подшипника составляет

$$N_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}} \cdot \omega}{9550} \text{ [Вт]}, \quad (7)$$

где ω – скорость вращения ротора. При этом тепловая энергия, генерируемая подшипником, определяется следующим образом:

$$W_{\text{п}} = 3600 \cdot N \text{ [Дж]}. \quad (8)$$

Важно, что в соответствии с представленными зависимостями тепловая энергия, выделяемая при трении подшипника, обусловлена его моментом, который, как было показано ранее (см. выражение (6)), зависит от температуры, возрастающей по причине

аккумулирования тепловой энергии валом ротора. Повышение момента подшипника приведет к дополнительному увеличению выделяемой тепловой энергии и т.д. Таким образом, модель функционирования рассматриваемого силового гироскопа (рис. 5) описывается выражениями (1), (5)–(8) и представляет собой нестационарный процесс с положительной обратной связью (рис. 6). Применение данной модели доказывает, что даже при незначительном дисбалансе подводимого и отводимого к валу ротора тепла наблюдается повышение температуры системы и увеличение момента подшипника. Это объясняет, почему при функционировании исследуемых устройств происходит снижение скорости или останов ротора: момент подшипника возрастает до значения момента от электродвигателя, в результате ротор заклинивается (перегревается).



Рис. 6. Нестационарный процесс с положительной обратной связью

Анализ описанного процесса требует решения дифференциальных уравнений, учитывающих изменение температуры вала. Если допустить, что несбалансированная тепловая энергия аккумулируется валом, то изменение температуры вала будет определяться соотношением

$$\frac{dt}{dt} = \frac{N_{\Pi} - N_{отв}}{C \cdot M}, \tag{9}$$

где C [Дж/кг·К] – теплоемкость, M [кг] – масса вала. При этом приращение момента подшипника $\frac{dM_{\Pi}}{dt}$ при повышении температуры будет рассчитываться с помощью выражения (6), а приращение выделяемой подшипником тепловой энергии $\frac{dW_{\Pi}}{dt}$ – посредством выражений (7), (8). Качественное решение данной системы дифференциальных уравнений (6)–(9) с учетом указанной положительной обратной связи показано на рис. 7, 8. Представленные зависимости подтверждают, что данный процесс протекает по экспоненциальному закону.

Показано, что чем меньше дисбаланс энергий, а именно разница между подведенной к валу и отведенной от него тепловой энергии ΔW , тем медленнее растет температура вала (рис. 7, а). Из рис. 7, б видно, что при $\Delta W = 0,1\%$ от подводимой к валу тепловой энергии температура вала за время 2×10^6 с (23 дня) повышается только на 2°C . Это свидетельствует о том, что на ранних стадиях функционирования или во время испытаний этих гироскопических систем обнаружить наличие описанного процесса практически невозможно. На рис. 8 приведена зависимость тепловой мощности, аккумулируемой валом $N = N_{\Pi} - N_{отв}$, от времени функционирования при различных дисбалансах ΔW . Зависимость времени нагрева вала до определенной температуры от значения дисбаланса ΔW представлена на рис. 9.

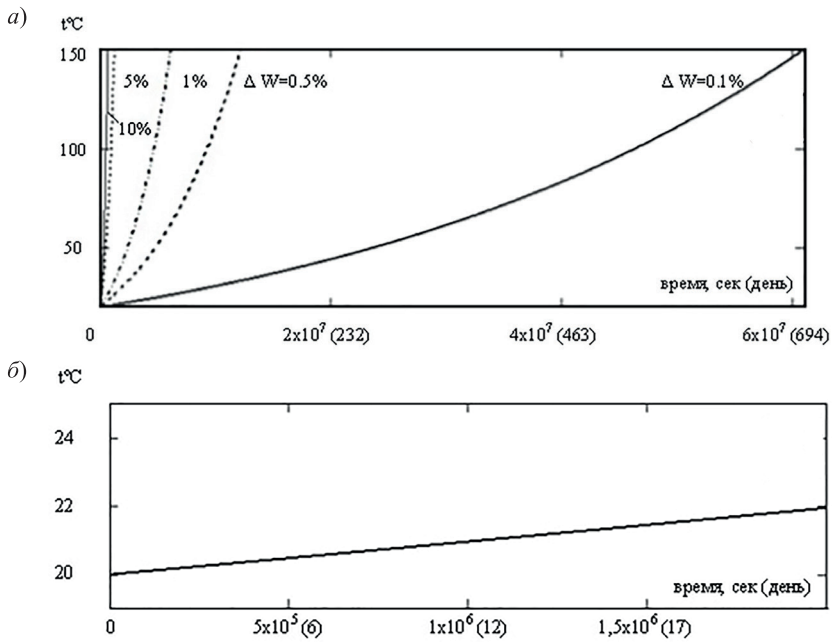


Рис. 7. Зависимость температуры вала от времени функционирования

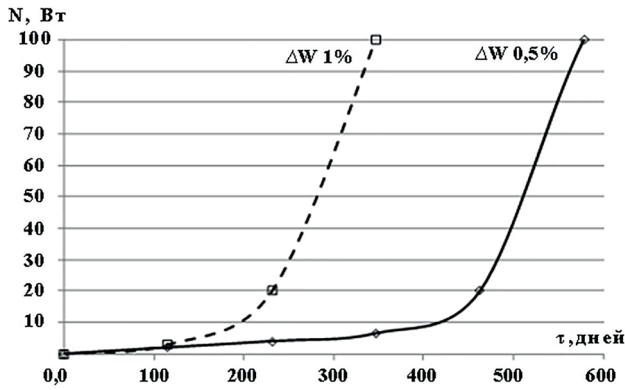


Рис. 8. Зависимость тепловой мощности, подводимой к валу, от времени функционирования при различном балансе тепловой энергии

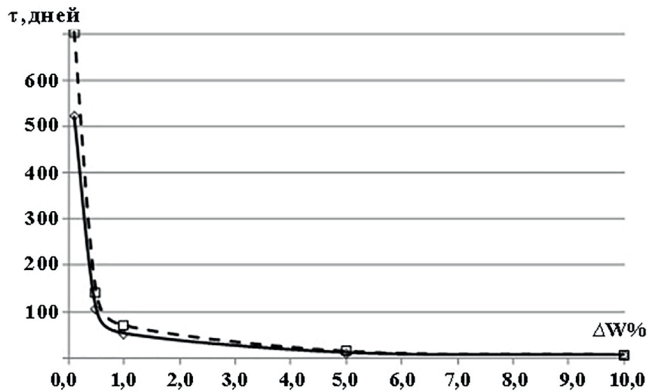


Рис. 9. Зависимость времени нагрева вала от значения дисбаланса ΔW

Приведенная зависимость показывает, что время нагрева вала нелинейно зависит от дисбаланса ΔW и с его увеличением снижается. Если дисбаланс большой, т.е. значительная доля подводимой к валу тепловой энергии (генерируемой подшипником) не отводится от него в корпус, то вал нагревается быстро. Так, при дисбалансе 10% (доля выделяемой подшипником тепловой энергии, аккумулируемая валом) время нагрева до 100°C составляет порядка 5×10^5 с (5 дней), а до 150°C – порядка 6×10^5 с (6 дней). При дисбалансе 1% время нагрева составит приблизительно $4,5 \times 10^6$ с (52 дня) и 6×10^6 с (69 дней) соответственно, а при 0,1% – $4,5 \times 10^7$ с (520 дней) и 6×10^7 с (694 дня).

Если вся генерируемая подшипником энергия будет отводиться через крепление вала к корпусу, то вал нагреваться не будет, при нулевом дисбалансе время нагрева вала будет стремиться к бесконечности. С другой стороны, если теплоотвод от вала отсутствует и вся генерируемая подшипником тепловая энергия аккумулируется валом, то время нагрева окажется минимальным и будет определяться соотношением величины подводимой тепловой энергии и уровня теплоемкости и массы вала.

Заключение

Полученные расчетные данные (рис. 6) качественно соответствуют результатам экспериментальных исследований, приведенным на рис. 4. Это подтверждает правильность представленной модели, которая в отличие от уже существующих учитывает взаимовлияние элементов гироскопа друг на друга при их нагреве. На основании этого можно сформулировать следующие утверждения:

- если кинематическая компоновка ротора силового гироскопа такова, что присутствует обратная, причем положительная, связь между нагреваемым элементом и источником тепла, то выделяемая тепловая энергия источника тепла (подшипника) будет зависеть от нагрева элемента гироскопа (вала), который будет происходить по экспоненциальному закону;
- если кинематическая компоновка ротора силового гироскопа такова, что отсутствует обратная связь между нагреваемым элементом и источником тепла или она отрицательна, то выделяемая тепловая энергия источника тепла (подшипника) не будет зависеть от нагрева элемента гироскопа (вала), и температура элементов ротора будет стремиться к некоторому значению, при котором наступит равновесие между подводимым и отводимым теплом.

Данные закономерности наиболее ярко проявляются при отсутствии конвективного теплообмена. В этом случае незначительная тепловая энергия от работы подшипника может доминировать в процессе нагрева элементов при длительном времени функционирования гироскопических устройств и быть причиной их отказа. Таким образом, при проектировании гиродинов, работающих в условиях вакуума, для обеспечения требуемого значения их тепловой устойчивости целесообразно использовать конструктивную схему шарикоподшипникового подвеса ротора, которая позволит предотвратить возникновение обратной связи между нагреваемым элементом и источником тепла, или эта связь будет отрицательной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мкртычян А.Р., Башкеев Н.И., Акашев Д.И., Андришин Е.О., Коноплев А.В., Чудаков В.В.** Отдельные вопросы создания силовых гироскопических комплексов для систем ориентации малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // IV научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва: ВНИИЭМ им. Иосифьяна, 2016. С. 120–124.
2. **Сорокин А.В., Башкеев Н.И.** Сравнительный анализ силовых гироскопических комплексов высокодинамичных космических аппаратов // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. С. 272–277.
3. **Мкртычян А.Р., Башкеев Н.И., Якимовский Д.О. и др.** Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов // Гироскопия и навигация. 2015. №1(88). С. 93–99.
4. **Левский М.В.** О повышении маневренности космического аппарата, управляемого инерционными исполнительными органами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2020. №5. С. 157–176.
5. **Углова А.О., Лукьяненко М.В.** Оценка преимуществ использования гиродинов в системах ориентации и стабилизации космических аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики в 3-х томах / под общей редакцией Ю. Ю. Логинова. Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2019. Том 1. С. 601–603.
6. **Яковец О.Б., Акашев Д.И.** Перспективный силовой гироскопический комплекс для высокоманевренных космических аппаратов // Ракетно-космическая техника. 2013. Т. 1. № 1(2). С. 16.
7. **Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л.** Переходные тепловые процессы в электрических машинах. Л.: Электроатомиздат, 1983. 216 с.
8. **Пожидаев В.М.** Электрические машины и приводы космических аппаратов. Л.: ВИКА, 1986. 317 с.
9. **Готгер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин. Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. 480 с.
10. **Белый А. В., Карпович А.Н., Биленко Э.Г.** Диагностика высокомоментного электродвигателя в условиях эксплуатации при низких температурах в вакууме // Приборы и методы измерений. 2011. № 2(3). С. 81–87.
11. **Никитин Е.А., Шестов С.А., Матвеев В.А.** Гироскопические системы: элементы гироскопических приборов / 2-е изд. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
12. **Шепелев Н.И.** Сборка, регулировка и испытание гироскопических приборов. Москва: Машиностроение, 1977. 192 с.
13. **Шепилов С.И., Лихошерст В.В.** Комплексная математическая модель гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 34–42.
14. **Сломьянский Г.А., Агапов А.В., Родионов Е.М., Румянцев С.И., Тимофеева А.Д.** Детали и узлы гироскопических приборов. Москва: Машиностроение, 1975. 364 с.
15. **Перель Л.Я.** Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. Москва: Машиностроение, 1983. 545 с.
16. **Федулов А.А., Некрасов И.И., Спиридонов В.А., Александрова А.С.** Монтаж подшипниковых опор. Екатеринбург: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет, 2019. 44 с.
17. **Веркович Г.А., Головенкин Е.Н., Голубков В.А. и др.** Справочник конструктора точного приборостроения. Л.: Машиностроение, 1989. 792 с.
18. **Gurrisi, Ch., Seidel, R., Dickerson, S., Didziulis, S.V., Frantz, P.P., and Ferguson, K.M.,** Space Station Control Moment Gyroscope Lessons Learned, NASA technical Reports Server (NTRS), 2010, pp. 1–16.

Lebedev, E.L. and Repin, A.O. (A.F. Mozhaysky Military-Space Academy, St. Petersburg, Russia)
Influence of Kinematic Layout of Control Moment Gyros with Ball-Bearing Supported Rotors on the Dynamics of Heating their Elements in Vacuum, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 2 (121), pp. 121–130.

Abstract. A model of a control moment gyro operation is presented, based on a system of equations that describes the moments and forces acting on the rotor elements and on the thermal balance of the gyro rotor in vacuum environment (no convective heat transfer). The dependence of the rotor elements temperature dynamics on the nonstationary heating process with positive feedback between the heat source (bearing) and the heated elements of the rotor (shaft) is proved.

Key words: control moment gyro, vacuum, rotor heating, bearing, thermodynamic balance.

Материал поступил 20.02.2023