

753 ОД  
23 НОЯ 1998

На правах рукописи

ПОДАЛКОВ Валерий Владимирович

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ  
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ТИПОВ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ  
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

01.02.06 - динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Москва - 1998

Работа выполнена на кафедре теоретической механики  
Московского энергетического института  
(технического университета)

Научный консультант - доктор физико-математических наук,  
профессор Ю.Г.Мартыненко

Официальные оппоненты:


доктор физико-математических наук, профессор Ю.Ф.Голубев,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник А.В.Грушовский,  
доктор технических наук, профессор В.П.Николаев.

Ведущее предприятие - ГИЦ ЦНИИЭлектроприбор (Санкт-Петербург).

Защита состоится 18 декабря 1998 г. в 13 час. 10 мин.  
на заседании диссертационного Совета Д 053.16.03 в Московском  
энергетическом институте по адресу: 111250, Москва, Красноказар-  
менная, 17, ауд. Б-409.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направ-  
лять по адресу: 111250 Москва, Е-250, Красноказарменная,  
14, Ученый совет МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.  
Автореферат разослан "3" ноября 1998 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета  
к.т.н., доцент  С.А.Серков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Анализ публикаций и докладов на международных и всероссийских конференциях, посвященных гироскопической и навигационной технике, показывает, что, несмотря на появление спутниковых систем типа Global Position System (GPS) и Глонасс, остаются достаточно широкие сферы применения для систем навигации и ориентации, использующих гироскоп с электростатическим подвесом ротора (ЭСГ), который имеет сверхвысокую точность (допустимая погрешность  $10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-4}$  град/час), и волновой твердотельный гироскоп (ВТГ), обладающий высокой и средней точностью (допустимая погрешность находится в пределах  $5 \cdot 10^{-4}$ - $10^{-1}$  град/час).

Для электростатического гироскопа появились новые перспективные области использования: высокоточные системы ориентации для космических аппаратов, геодезия, проверка общей теории относительности.

Волновой твердотельный гироскоп обладает такими уникальными качествами, как слабая зависимость уходов от температуры, малые габариты, высокая устойчивость (до нескольких десятков g) к перегрузкам и малая стоимость.

Активные исследования гироскопических приборов, использующих ЭСГ, ведутся в США (Honeywell, Rockwell International, Stanford University), Франции (Saqem), Китае (Thinghua) и России (ЦНИИЭлектрприбор, Институт проблем механики РАН).

Работы по исследованию ВТГ ведутся в США (Litton Guidance & Control Systems, Goleta, CA) и России (Московский институт электро-

механики и автоматики, Раменское приборостроительное конструкторское бюро, Институт проблем механики РАН, Научно-промышленное объединение Медикон, г.Миасс).

Из проводимых исследований ЭСГ можно сделать вывод, что для дальнейшего совершенствования динамических характеристик этого гироскопического прибора недостаточно ограничиться моделью абсолютно твердого тела для чувствительного элемента - ротора гироскопа, а требуется учитывать конечную жесткость ротора и механические свойства его пленочного покрытия.

Основной причиной ухудшения динамических характеристик ЭСГ является несферичность ротора. К причинам возникновения несферичности ротора относятся:

- погрешности изготовления ротора;
- деформации ротора, вызванные центробежными силами, возникающими при его вращении;
- термоупругие деформации, появляющиеся при изменении температуры.

Основными источниками погрешностей ВТГ являются: погрешности изготовления, неоднородность, а также упругая и вязкоупругая анизотропия материала, из которого сделан резонатор гироскопа, нелинейные деформации срединной поверхности резонатора.

Достижение высоких точностей ЭСГ и ВТГ ставит перед исследователями комплекс новых актуальных задач: учет влияния на точностные характеристики этих гироскопов инерционных сил, температуры, упругой и вязкоупругой анизотропии и нелинейных деформаций. Решению перчисленного комплекса проблем посвящена данная работа.

Цель работы состоит в

- определении уходов рассматриваемых гироскопических устройств, вызванных конечной жесткостью материала чувствительных элементов,

либо тонкими эффектами нелинейности колебаний или анизотропией материала (для волнового твердотельного гироскопа);

- теоретическом обосновании технологических приемов (асферизация ротора ЭСГ) повышения точности;

- разработке требований к покрытию поверхности ротора ЭСГ при вынужденной его посадке, вызванной аварийным отказом подвеса.

Методы исследования опирались на классическую теорию упругости и вязкоупругости, теорию тонких оболочек. В работе использовались методы классической механики и механики композитных материалов, современные методы анализа нелинейных задач механики.

Достоверность полученных результатов определяется правдомерным применением соответствующих математических методов и методов анализа деформируемого тела, а также сопоставлением полученных результатов с экспериментальными данными и результатами, полученными другими авторами.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, заключается в том, что в ней решен комплекс фундаментальных задач, определяющих динамическое поведение новых типов датчиков ориентации подвижных объектов:

- предложены расчетные модели определения погрешностей электростатического гироскопа, вызываемых деформациями ротора под действием центробежных сил или вследствие изменения температуры окружающей среды;

- доказана нереализуемость использования режима "двойного вращения" для уменьшения погрешностей из-за внутренней диссипации энергии в роторе электростатического гироскопа;

- дано полное теоретическое исследование технологического процесса асферизации ротора электростатического гироскопа;

- предложена методика расчета механических характеристик не-

нокомпозитных алмазоподобных защитных пленок, наносимых на ротор электростатического гироскопа, и получены формулы, определяющие критические напряжения при потере устойчивости этих пленок;

- найдены погрешности волнового твердотельного гироскопа, вызываемые анизотропией упругих и вязкоупругих свойств материала резонатора, а также нелинейностью его деформаций.

Практическая ценность работы заключается в

- установлении общих закономерностей поведения вязкоупругого ротора в идеальном электростатическом подвесе при "двойном вращении";

- создании новых математических моделей для определения уходов электростатического и волнового твердотельного гироскопов, вызванных деформациями их чувствительных элементов; -

- получении расчетных формул для нахождения основных характеристик технологического процесса асферизации;

- разработке методики определения механических характеристик защитных пленок роторов ЗСГ и критических напряжений при расчетах этих пленок на устойчивость.

Результаты диссертации в виде расчетных моделей, формул, рекомендаций внедрены на предприятиях авиационно-космической, судостроительной и приборостроительной промышленности. Автор выражает благодарность научным группам Ш.Ф.Чарышева и В.И.Повторайко (Раменское), В.З.Гусинского и В.Е.Ландау (Санкт-Петербург) за предоставленный экспериментальный материал, участие в обсуждении рассматриваемых задач и помощь во внедрении результатов.

Апробация работы.

По теме диссертации опубликованы 24 научных статьи.

Результаты работы докладывались и обсуждались на

-Пятом Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной меха-

нике (Алма-Ата, май - июнь 1981 г.);

- Всесоюзной конференции "Современные вопросы информатики, вычислительной техники и автоматизации" (Москва, апрель 1985 г.);

-семинаре "Прикладные методы в задачах прочности" под руководством академика И.Ф.Образцова (Москва, октябрь 1984 г.);

-научном семинаре "Электродинамика и механика сплошных сред" (Рига, февраль 1987 г.);

-Всесоюзной конференции "Нелинейные колебания механических систем" (Горький, сентябрь 1987 г.);

-Всесоюзной конференции "Современные проблемы механики и технологии машиностроения" (Москва, апрель 1989 г.);

-семинарах кафедры прикладной механики МГУ под руководством академика А.Ю.Ишлинского и профессора И.В.Новожилова (Москва, июнь 1989 г., апрель 1992 г.);

-научной конференции "Проблемы электродинамики и механики сплошных сред" (Рига, февраль 1990 г.);

-Четвертом Российско-Китайском симпозиуме по инерциальной технологии (Санкт-Петербург, май 1993 г.);

-I Санкт-Петербургской международной конференции по гироскопической технике (Санкт-Петербург, май 1994 г.);

-Всероссийской конференции "Наука - Транспорт - Автоуслуги" (Москва, май 1994 г.);

-Всероссийской конференции "Современные проблемы механики и ее приложений" (Москва, июль 1996 г.);

-XX межотраслевой научно-технической конференции памяти Н.Н.Острякова (Санкт-Петербург, ноябрь 1996 г.);

-научно-практической конференции МТУСИ (Москва, январь 1997 г.);

-Международной конференции "Информационные средства и техно-

логии" (Москва, май 1997 г.);

-научных семинарах кафедры теоретической механики МЭИ (Москва, 1975 - 1998 г.г.).

Тексты или тезисы 15 докладов и сообщений опубликованы.

Научные исследования по теме диссертации выполнялись при поддержке Международного научного фонда (International Science Foundation) - grant IBN 100, DYNAMIC OF A RIGID IN ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS, 1995 у.; Российского фонда фундаментальных исследований, код проекта 97-01-00212; ФЦП "Интеграция" МАИ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объем работы 234 стр., включая 197 листов машинописного текста, 26 листов с рисунками, 11 стр. списка литературы, насчитывающего 115 наименований.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается, что среди приборов инерциальной навигации, активно разрабатываемых в последние 10 - 25 лет, важное место занимают электростатический гироскоп (ЭСГ) и волновой твердотельный гироскоп (ВТГ). Хотя принцип действия и достигаемые точности у этих приборов различны, общим у них является наличие систем управления, использующих электрическое взаимодействие через вакуумированную полость чувствительного элемента (ротора - у ЭСГ или резонатора - у ВТГ) с электродами, жестко связанными с корпусом прибора.

При исследовании динамики ЭСГ и ВТГ обычно применяется приближенный подход, при котором предполагается, что потенциалы на управляющих (поддерживающих) электродах не зависят от положения



чувствительного элемента - поверхности ротора или резонатора. Это означает, что электрическое взаимодействие чувствительного элемента с электродами определяется их потенциалами, формой и взаимным расположением. Считается, что электрические потенциалы определяются системой управления, а сами электроды жестко связаны с корпусом прибора и пренебрежимо мало изменяют свою форму. Таким образом, одной из важнейших причин, влияющих на динамические свойства и определяющих точность ЭСГ и ВТГ, является форма и масс-инерционные свойства чувствительного элемента.

Приведен обзор публикаций по указанным выше проблемам.

В первой главе проводятся исследования возмущающих моментов, действующих на ротор ЭСГ, который совершает движение Эйлера - Пуансо.

Ротор ЭСГ - сферическая оболочка, помещенная внутри вакуумированного кожуха. На внутренней поверхности полости кожуха расположена система электродов, при помощи которых создается электростатическое поле, обеспечивающее неконтактный подвес ротора.

Ротор гироскопа предварительно раскручен вспомогательной системой и в рабочем режиме совершает движение Эйлера-Пуансо (двойное вращение).

В электростатическом подвесе поддерживающие силы действуют по нормали к поверхности ротора, поэтому если его поверхность - идеальная сфера, то момент ponderomotorных сил относительно центра сферы равен нулю, и при совпадении центра масс ротора с его геометрическим центром кинетический момент гироскопа будет неограниченно долго сохранять неизменное направление в пространстве. В действительности поверхность ротора не является идеально сферической, поэтому в реальном электростатическом подвесе возникает возмущающий момент, вызванный несферичностью ротора, который

в значительной степени и определяет точность прибора.

Режим двойного вращения ротору ЭСГ придается с той целью, чтобы избавиться от возмущающих моментов, вызванных нечетными гармониками в форме его поверхности.

Однако, при движении Эйлера - Пуансо инерционные силы, действующие на ротор, вызывают искажение формы его поверхности по четным гармоникам. Влияние этих гармоник на точность прибора анализируется в первой главе.

Рассматривается гироскоп, ротор которого имеет форму сферической упругой оболочки радиуса  $R$  с одинаковыми отверстиями в ползсах ( $r_0 = R \cos \alpha_0$ ).

В качестве порождающего решения задачи принимается движение по Эйлеру - Пуансо, а влияние упругости ротора в соответствии с идеями метода возмущения рассматривается как малое возмущение Эйлера движения.

Задача об определении деформаций ротора решена с применением уравнений моментной и безмоментной теорий изгиба оболочек.

Так как угловая скорость  $\omega$  собственного вращения ротора на несколько порядков меньше частоты собственных упругих колебаний оболочки, то данная задача решается в квазистационарной постановке.

Показано, что при небольших размерах отверстий на ползсах ( $\alpha_0 \approx 15^\circ$ ), которые имеют место на практике, возмущенную поверхность ротора можно принять в виде

$$r_1 = R - \frac{\rho R^3 J^2 (2+\mu)}{E} \left[ \frac{1}{(2+\mu)} \left( \frac{1}{I_2^2} + \frac{\mu}{2I_1^2} \right) - \left( \frac{1}{I_2^2} + \frac{1}{2I_1^2} \right) \cos^2 \alpha - \right. \\ \left. - \frac{1}{I_1 I_2} \operatorname{ctg} \theta \sin 2\alpha \cos(\nu t - \beta) - \frac{1}{2I_1^2} \sin^2 \alpha \cos(2\nu t - 2\beta) \right] \sin^2 \theta, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность материала,  $L$  - кинетический момент ротора,  $\mu$  - коэффициент Пуассона,  $E$  - модуль Юнга,  $I_1, I_3$  - моменты инерции ( $I_3 > I_1$ ),  $\vartheta$  - угол нутации,  $\alpha, \beta$  - сферические углы ( $0 \leq \alpha \leq \pi$ ,  $0 \leq \beta \leq \pi$ ).

Формула (1) преобразована с учетом предварительной сферизации ротора.

В работе рассматривается подвес, у которого электроды представляют собой три пары одинаковых сферических сегментов с осями симметрии, направленными по осям симметрии граней куба.

Получены зависимости модуля возмущающего момента от угла нутации  $\vartheta$ . Возмущающий момент монотонно возрастает с ростом угла нутации, причем значение угла  $\vartheta = \pi/2$  является наилучшим с точки зрения уходов гироскопа, вызываемых упругими деформациями его ротора.

Рассмотрен числовой пример. Электростатический гироскоп, масса ротора  $m = 0.02$  кг, опорное напряжение, подаваемое на электроды,  $3$  кВ,  $R = 0.02$  м, относительный зазор между ротором и электродами  $10^{-2}$ , материал ротора - бериллий, имеющий механические характеристики :  $\rho = 1850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 3 \cdot 10^{11}$  Па,  $\mu = 0.03$ . Угловая скорость  $\omega = 3 \cdot 10^4$  об/мин. Моменты инерции ротора при  $\alpha_0 = 15^\circ$  :  $I_1 = 1.25 \cdot 10^{-5}$  кг м<sup>2</sup>,  $I_3 = 1.31 \cdot 10^{-5}$  кг м<sup>2</sup>. Вектор кинетического момента лежит в неподвижной плоскости  $\xi_1 \xi_3$  и образует с осью  $\xi_3$  угол  $70^\circ$ . В этом случае величина возможного ухода гироскопа, вызванного деформацией ротора,  $\omega_0 = 0.08$  град/час, и это значение достигается, когда угол нутации  $\vartheta = \pi/2$ .

Так как ЭСГ относится к приборам высокой степени точности, то уходы гироскопа, вызванные режимом двойного вращения ротора, являются недопустимыми для приборов этого класса точности.

В аналогичной постановке определены уходы ЭСГ, ротор которо-

го имеет форму сплошной сферической оболочки с тонким упругим кольцом в экваториальной плоскости. В результате решения уравнения моментной теории изгиба оболочек для искаженной внешней поверхности ротора получена формула

$$r_1(\alpha, \beta) = R \left[ 1 + \epsilon_{20} P_2^{(0)}(\cos\alpha) + \frac{1}{2} \epsilon_{21} P_2^{(1)}(\cos\alpha) \cos(vt - \beta) + \epsilon_{22} P_2^{(2)}(\cos\alpha) \cos 2(vt - \beta) + \epsilon_{40} P_4^{(0)}(\cos\alpha) \right], \quad (2)$$

где  $P_i^{(k)}(\cos\alpha)$  - присоединенные функции Лежандра, а постоянные  $\epsilon_{ij}$  находятся при решении соответствующей краевой задачи и зависят как от физических и геометрических параметров ротора, так и от угла нутации  $\theta$ .

Для ротора, геометрические и физические параметры которого были указаны на стр.11, а ширина и толщина кольца  $2 \cdot 10^{-3}$  л, величина максимально возможного ухода гироскопа, вызванного деформациями ротора, имеет место при  $\theta = \pi/2$  и равняется 0.04 град/час.

В главе 2 найдены деформации ротора ЭСР, изготовленного в форме однородного сплошного шара радиуса  $R$ , который совершает регулярную прецессию Эйлера - Пуансо. Учитывается наличие вязкого трения в материале по модели Кельвина - Фогта. Диссипативная функция Релея  $\Phi$ , которая характеризует рассеяние энергии в материале, представлена формулой

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_V \left[ (\lambda^* + 2G^*) (\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\alpha\alpha}^2 + \dot{\epsilon}_{\beta\beta}^2) + 4G^* (\dot{\epsilon}_{r\alpha}^2 + \dot{\epsilon}_{r\beta}^2 + \dot{\epsilon}_{\alpha\beta}^2) \right] dv, \quad (3)$$

где  $V$  - объем сферы,  $G^*, \lambda^*$  - вязкоупругие модули,  $\dot{\epsilon}_{rr}, \dots, \dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$  - компоненты тензора скоростей деформаций.

Диссипативная функция принимается в виде (3) из тех сообра-

жений, чтобы она обращалась в нуль, если в теле отсутствует внутреннее движение, т.е. когда тело совершает движение как абсолютно твердое, это и означает, что функция  $\Phi$  должна зависеть не от самой скорости, а от ее градиента.

При помощи теоремы Релея о скорости убывания механической энергии  $H$

$$\frac{dH}{dt} = - 2\Phi \quad (4)$$

и осреднения на периоде  $2\pi/\nu$  найдено дифференциальное уравнение, которому подчиняется угол нутации

$$\frac{d\theta}{dt} = - \frac{2\pi(I_3 - I_1) G^* \rho^2 R^2 L f(\mu)}{15 I_3^2 I_1^2 G^2} \sin 2\theta \left[ \left( \frac{I_3}{I_1} \right)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right] \quad (5)$$

$$f(\mu) = \frac{3058\mu^2 + 6682\mu + 3309}{105(7 + 5\mu)^2}$$

где  $G$  - модуль сдвига материала ротора.

Решение уравнения (5) показывает, что при наличии вязкого трения тело, совершающее движение Эйлера - Пуансо, стремится занять положение, когда вращение происходит вокруг оси с наибольшим моментом инерции.

Найдены постоянные времени  $\tau$  затухания нутационного движения для двух видов роторов.

1. Бериллиевого ротора радиуса  $R = 5 \cdot 10^{-2}$  м с угловой скоростью вращения  $\omega = 18 \cdot 10^4$  об/мин. Логарифмический декремент затухания -  $\eta = 0.02$ . В этом случае для постоянной времени получено  $\tau = 73$  часа,

2. Ротора из алюминия  $R = 5 \cdot 10^{-2}$  м с угловой скоростью вращения  $\omega = 18 \cdot 10^4$  об/мин. Плотность алюминия  $\rho = 2.72 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,

модуль сдвига  $G = 2.65 \cdot 10^{10}$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu = 0.32$ . В этом случае постоянная времени  $\tau = 3$  часа.

Как видно из этих числовых результатов, для поддержания режима двойного вращения ротора в течение достаточно продолжительного времени, что требуется на практике для приборов этого типа, необходимо к ротору прикладывать силовые моменты, что само по себе вызывает дополнительные погрешности в работе прибора.

Далее в этой главе получено уравнение возмущенной поверхности деформированного ротора при его двойном вращении

$$r_1 = R - \frac{\rho R^3 (2+\mu)}{2G(1+\mu)} L^2 \left[ -\sin^2\vartheta \left( \frac{1}{I_3^2} + \frac{1}{2I_1^2} \right) * \right. \\ \left. * \left[ \cos^2\alpha - 1/3 \right] + \frac{1}{2I_1 I_3} \sin 2\vartheta \sin 2\alpha \cos(\beta - \nu t) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2I_1^2} \sin^2\vartheta \sin^2\alpha \cos(2\nu t - 2\beta) \right]. \quad (6)$$

Для электростатического подвеса с бериллиевым ротором и при опорном напряжении, подаваемом на электроды,  $V_0 = 450$  В, относительным зазором между ротором и электродами  $a = 6 \cdot 10^{-3}$ , кинетическом моменте, лежащем в плоскости  $\xi_1, \xi_2$  и имеющем с осью  $\xi_3$  угол  $\pi/4$ , величина возможного ухода гироскопа  $\omega^* = 3.5 \cdot 10^{-2}$  град/час.

Для ротора, который имеет произвольный тензор инерции ( $I_1 \neq I_2 \neq I_3$ ), рассматривается влияние сил вязкого трения в материале на его движение, когда он находится в режиме двойного вращения. Показано, что, как и в осесимметричном случае, ротор с течением времени стремится прийти к вращению вокруг оси с наибольшим моментом инерции. Найдена постоянная времени затухания нутационного движения. Затем получено уравнение деформированной поверхности ротора и найдены уходы гироскопа, обусловленные этими деформациями.

В третьей главе работы рассматривается влияние неравномерности нагрева ротора ЭСГ на его динамические характеристики. Неравномерность нагрева ротора возникает из-за наличия источников тепла, имеющихся внутри прибора: геттерно-исонного микронасоса, обеспечивающего вакуумирование полости, в которой левитирует ротор, катушек демпфирования нутационных колебаний, оптических датчиков, высоковольтных усилителей системы подвеса, электронных блоков и т.п.

Рассматривается влияние температуры окружающей среды во время эксплуатации на угловую скорость ротора. С этой целью решена центральносимметричная задача о нестационарном распределении температуры внутри ротора из-за нагрева его путем лучистого теплообмена, описываемого законом Стефана - Больцмана.

Для практически важного случая, когда частота колебаний температурного поля принимается немного меньше частоты собственных упругих колебаний ротора, его деформация является результатом решения квазистационарной задачи термоупругости. Эти деформации дают закон изменения момента инерции ротора как функции времени. В результате составлено и проинтегрировано дифференциальное уравнение вращательного движения ротора с переменным моментом инерции, для его угловой скорости получено выражение

$$\Omega(t) = \Omega_0 \left[ 1 + \int_0^t N_1(t-\xi) F(\xi) d\xi \right], \quad (7)$$

где

$$N_1(t) = \frac{2\alpha_1}{\tau_1 - \tau_2} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \exp\left[-\frac{t}{\tau_1}\right] - \exp\left[-\frac{t}{\tau_2}\right] \right],$$

$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{i\omega_n t}$  - закон изменения температуры окружающей среды,

$\alpha_1$  - коэффициент линейного расширения материала,  $\tau_1 = c\rho R/(12\sigma T_0^3)$  - постоянная теплообмена ротора с окружающей средой,  $c$  - теплоемкость ротора,  $\sigma$  - коэффициент лучеиспускания,  $T_0$  - средняя температура окружающей среды,  $\tau_2 = \frac{2mR^2}{5K_0}$  - постоянная времени эквивалентного двигателя, заменяющего подвес,  $K_0$  - постоянный коэффициент,  $m$  - масса ротора.

В ЦНИИЭлектроприбор были сделаны замеры угловой скорости вращения ротора и температуры кожуха прибора, которую можно принять в качестве температуры окружающей среды. Сравнение экспериментальной (ЦНИИЭлектроприбор) и теоретической (7) кривых показало, что выбранная теоретическая модель адекватно отражает реальный процесс.

Изложенная выше методика была применена для определения законов распространения температуры и деформаций в роторе, который представляет собой полую сферическую оболочку ( $R_1$  - радиус внутренней, а  $R_2$  - внешней сферы). Оказалось, что зависимость от времени угловой скорости ротора совпадает по структуре с формулой (7), только постоянную времени  $\tau_2$  следует заменить на

$$\bar{\tau}_2 = \frac{2mR^2 (r_2^3 - r_1^3)}{5K_0 (r_2^3 - r_1^3)},$$

где  $r_1 = R_1/R$ ,  $r_2 = R_2/R$ ,  $R$  - характерный размер. В качестве примера рассмотрено влияние температуры окружающей среды, изменяющейся по гармоническому закону, на угловую скорость ротора ЭСГ.

Найдены уходы ЭСГ, вызванные деформациями его внешней поверхности, возникающими от наличия стационарного осесимметричного нагрева ротора. Уходы ротора гироскопа в этом случае имеют порядок  $10^{-5}$  град/час.



В главе 4 проведено теоретическое исследование процесса асферизации при изготовлении ротора.

Для уменьшения массы ротора электростатического гироскопа и повышения его перегрузочной способности ротор изготавливается в виде оболочки переменной толщины или в виде сферической оболочки постоянной толщины с кольцевым утолщением в экваториальной части и т.д. (подобные конструкции ротора необходимы для того, чтобы обеспечить неравенство моментов инерции ротора, и, тем самым, уменьшить время готовности прибора к работе, определяемое, в основном, временем демпфирования нутационных колебаний ротора, возникающих во время его раскрутки). При наличии эллипсоидальной полости внутри ротора или кольцевого утолщения в экваториальной области жесткость оболочки в направлении оси симметрии оказывается минимальной, поэтому если внести оболочку в камеру с повышенным давлением, то внешняя поверхность оболочки деформируется в сплюснутый сфероид. Можно обработать внешнюю поверхность оболочки ротора в камере таким образом, чтобы она превратилась в сферу. После снятия внешнего давления силы упругости превратят поверхность оболочки в желаемый втянутый эллипсоид вращения. Описанная процедура называется асферизацией ротора.

Вначале рассматривается ротор ЭСГ, имеющий форму сферической оболочки постоянной толщины с кольцевым утолщением в экваториальной области. Показано, что процесс асферизации дает возможность избавиться от второй гармоники, которая имела бы место в форме его поверхности при вращении ротора. Однако при этом в разложении поверхности ротора по полиномам Лежандра появляются гармоники высшего порядка, амплитудные значения которых соизмеримы с амплитудными значениями гармоник, возникающих при наличии инерционных сил. Обработка ротора под действием внешнего давления их не ком-

пенсирует, т.е. изготовление ротора в форме тонкой сферической оболочки с неоднородностью, локализованной в ее экваториальной зоне, не позволяет эффективно провести его асферизацию.

Далее рассматривается задача об асферизации ротора ЭСГ, представляющего собой тонкую оболочку переменной толщины, у которой внешняя поверхность есть сфера радиуса  $R_2$ , а внутренняя поверхность есть поверхность вращения, симметричная относительно экваториальной плоскости ротора.

Уравнение срединной поверхности оболочки принимается в виде

$$\begin{aligned} R(\alpha) &= R[1 + \varepsilon f(\alpha)]; \quad \varepsilon \ll 1, \\ f(\alpha) &= \frac{\sin^2 \alpha}{1 - k^2 \sin^2 \alpha}; \quad k^2 \ll 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Величина  $R$  в (8) - "средний" радиус срединной поверхности оболочки.

При помощи метода малого параметра найдены формы ротора при его асферизации с учетом высших гармоник, возникающих как при действии центробежных сил, так и при действии равномерно распределенного внешнего давления, которые взаимно не компенсируются. Проведенные числовые расчеты показывают, что амплитудное значение прогиба при четвертой гармонике после проведенной асферизации может быть лишь в 10 раз меньше, чем при второй гармонике до асферизации.

Точность уравнений теории изгиба тонких оболочек не позволяет получить достоверные результаты для амплитудных значений гармоник выше второй, которые имеют место при проведении асферизации. Поэтому задача об асферизации ротора ЭСГ с учетом четвертой гармоники в форме поверхности ротора была решена с привлечением методов пространственной теории упругости. В этом случае уравне-

ние внутренней поверхности ротора было представлено таким образом, что при проведении его асферизации появилась возможность избавиться не только от второй, но и от четвертой гармоник.

В пятой главе выполнен расчет механических характеристик защитных пленок ротора ЭСГ.

При аварийной остановке ЭСГ необходимо обеспечить возможность скольжения ротора по поверхности кожуха и не допустить разрушения его поверхности. Поэтому ротор ЭСГ покрывается тонкой, устойчивой к фрикционному разрушению пленкой, определению механических характеристик которой посвящена эта глава.

Внешнее покрытие ротора рассматривается как микронеоднородная композитная среда, математическая модель которой представляет ее как среду, состоящую из  $m$  случайно перемешанных изотропных составляющих, сцепленных между собой с идеальной адгезией.

Нахождение упругих макромоделей среды свелось к решению интегральных уравнений пространственной задачи теории упругости, которое было найдено в сингулярном приближении. В результате были получены уравнения для определения эффективных констант композита

$$G_0 \sum_q v_q \left\{ G_0 + \frac{2}{5} [1 + 2G_0 \sum_q (3K_q + 4G_0)^{-1}] (G_q - G_0) \right\}^{-1} = 1, \quad (9)$$
$$3K_0 = 4G_0 - \left[ \sum_q v_q (3K_q + 4G_0)^{-1} \right]^{-1}, \quad (t=1, \dots, m).$$

Здесь  $G_0, K_0$  - модуль сдвига и коэффициент объемного сжатия эффективной среды,  $V_q$  - объемная концентрация  $q$ -ой фазы,  $G_q, K_q$  - модуль сдвига и коэффициент объемного сжатия  $q$ -ой компоненты.

Соотношения (9) были использованы для определения эффективных упругих констант втомномасштабных композитов, полученных на

основе аморфного углерода и кремния (*DLN*) с добавлением диспергированных металлов и их соединений (*Me - DLN*, *MeC - DLN*, *MeN - DLN*).

Расчеты, проведенные по формулам (9), и их сопоставление с экспериментальными данными показали, что выбранная стохастическая модель механической смеси удовлетворительно описывает особенности структуры металлосодержащих алмазоподобных пленок и может служить основой для определения их упругих характеристик.

Тонкие покрытия наносятся на подложку (поверхность ротора) в условиях высокотемпературного нагрева в ненапряженном, но термодеформированном состоянии, и вследствие различия термомеханических свойств покрытия и основания при остывании в такой полиматериальной композиции возникают остаточные напряжения. Если напряжения сжимающие, то тонкое покрытие при некоторых условиях может потерять статическую устойчивость, что приведет к искажению его формы или разрушению. К потере устойчивости может также привести дальнейшее использование покрытия или его обработка (например, шлифовка, полировка и др.).

Задача потери устойчивости покрытия решена в двух постановках: в первом случае основание считается упругим полупространством, во втором - сплошным шаром. Это сделано для того, чтобы выяснить, можно ли более простой случай упругого полупространства распространить на более сложную задачу упругой сферы.

Если покрытие толщиной  $h$  нанесено на плоскость, ограничивающую полупространство, и в нем действуют остаточные сжимающие напряжения  $\sigma$ , то критические значения остаточного напряжения и соответствующая критическая длина волны находятся из условия минимума функции

$$\sigma_0 = \frac{2\pi^2}{3(1-\mu^2)z^2} + \frac{n_k [4\sqrt{2}\pi(1-\mu_0^2) + n_k(1-\mu^2)S]S}{4\pi[2\pi(3-4\mu_0)(1+\mu_0)^2 + \sqrt{2}n_k(1-\mu^2)(1-\mu_0^2)S]} \quad (10)$$

где  $\sigma_0 = \sigma/E$ ,  $E$  - модуль упругости покрытия,  $S = l/n$ ,  $l$  - длина волны,  $n_k = E_0/E$ ,  $E_0$  - модуль упругости основания,  $\mu_0$  и  $\mu$  - коэффициенты Пуассона основания и покрытия.

Формула (10) получена, когда при взаимодействии покрытия и основания учитываются как нормальные, так и касательные к плоскости раздела составляющие напряжений.

Так как выражение (10) не позволяет получить явной зависимости критических параметров от упругих свойств основания и покрытия, то была использована упрощенная модель, в которой взаимодействие покрытия и основания происходит только посредством нормальных составляющих напряжений, а касательные напряжения полагаются равными нулю.

В этом случае для критического значения напряжения  $\sigma_0^*$  и длины волны  $z^*$  получены следующие формулы:

$$z^* = 2\sqrt{2}\pi \left[ \frac{(1-\mu_0^2)}{3n_k(1-\mu^2)} \right]^{1/3}, \quad \sigma_0^* = \frac{1}{4(1-\mu^2)} \left[ \frac{3n_k(1-\mu^2)}{1-\mu_0^2} \right]^{2/3} \quad (11)$$

Проведен численный анализ зависимостей  $\sigma_0^*$  и  $z^*$  от упругих параметров основания и покрытия при помощи "точного" выражения (10) и "приближенных" (11). Оказывается, что для покрытия, жесткость которого не превышает жесткость основания более, чем в 10 раз, отклонения "точных" значений от "приближенных" не превышают 7% для  $\sigma_0^*$  и 4% для  $z^*$ .

При решении задачи об устойчивости тонкого покрытия, не-

сенного на однородный шар, найдена следующая формула для критического напряжения, при котором покрытие теряет устойчивость:

$$\sigma_0^* = \frac{1}{4(1-\mu^2)} \left[ 3n_{\kappa} \frac{(1-\mu^2)}{(1-\mu_0^2)} \right]^{2/3} + n_{\kappa}^2 \left[ 3n_{\kappa} \frac{(1-\mu^2)}{(1-\mu_0^2)} \right]^{-2/3}, \quad (12)$$

где  $n_{\kappa} = h/R$ ,  $R$  - радиус сферы.

Сравнивая (11) и (12), можно сделать вывод, что напряжение, при котором покрытие теряет устойчивость на шаре, больше того, которое имеет место для полупространства. Этот результат позволяет существенно упростить анализ устойчивости тонких покрытий на сферических поверхностях и, в частности, переносить результаты экспериментов на плоских поверхностях на поведение покрытий на сфере.

Шестая глава диссертации посвящена анализу погрешностей волнового твердотельного гироскопа, вызываемых анизотропией упругих и вязкоупругих свойств чувствительного элемента - резонатора, а также нелинейными деформациями резонатора.

В качестве прибора инерциальных навигационных систем в последнее время находит применение волновой твердотельный гироскоп (ВТГ). В волновом твердотельном гироскопе используется свойство инертности упругих волн. Оно состоит в том, что волновая картина, возбужденная в резонаторе, прецессирует относительно основания, которое вращается в инерциальном пространстве.

Чувствительным элементом ВТГ является резонатор, выполненный в виде тонкой полусферической оболочки переменной толщины, закрепленной в полюсе. В резонаторе возбуждаются посредством электрического воздействия через кольцевые электроды, установленные по периметру верхней (свободной) кромки, поперечные колебания, на

частоте, совпадающей с частотой собственных колебаний резонатора. Рабочей формой колебаний является вторая форма.

Резонатор помещается в вакуумированную камеру, и в нем возбуждаются поперечные колебания на рабочей частоте. Колебания поддерживаются настроенным в резонанс напряжением, подаваемым на кольцевой электрод. Для того, чтобы рассеяние энергии колебаний было минимальным, в качестве материала резонатора выбираются плавленый или кристаллический кварц, сапфир и тому подобные материалы.

Следует отметить, что основная энергия колебаний сосредотачивается вдоль свободной кромки резонатора, поэтому и кольцевой электрод, и датчики, регистрирующие амплитуду и фазу колебаний точек срединной поверхности резонатора, а также управляющие электроды располагаются вдоль свободной кромки. Ширина их составляет обычно  $1/5$ ,  $1/10$  радиуса срединной поверхности.

В главе 6 приводится решение трех задач: задачи о погрешностях резонатора, изготовленного из анизотропного материала, задачи о погрешностях резонатора, изготовленного из вязкоупругого анизотропного материала, а также погрешности, вызванные нелинейными деформациями резонатора.

В качестве модели резонатора рассматривается кольцо, осевая линия которого в недеформированном состоянии представляет собой окружность радиуса  $R$ . Предполагается, что кольцо получено из трансверсально-изотропного материала с ГПУ (гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой). Считается, что плоскость, содержащая осевую линию кольца, наклонена под углом  $\varepsilon$  к плоскости изотропии материала.

Относительное "раздвоение частот"  $\Delta\omega$ , вызванное анизотропностью материала, определяется формулой

$$\Delta\omega = \frac{1}{2} \alpha_2 \varepsilon^* \omega_0,$$

где  $\omega_0$  является второй собственной частотой колебаний анизотропного кольца, которое изготовлено идеально, т.е. ось изотропии совпадает с геометрической осью ( $\varepsilon = 0$ ).

Наличие раздвоения рабочей частоты резонатора ВГТ приводит к уходу, пропорциональному величине раздвоения частот.

В качестве примера рассмотрено кольцо из  $\beta$  - кварца. В этом случае

$$\Delta\omega \approx 2,0 \varepsilon^* \omega_0.$$

Уход ВГТ, резонатор которого - кольцо с радиусом осевой линии  $R = 0,03$  м, толщина  $h = 5 \cdot 10^{-4}$  м, ось изотропии отклонена от геометрической оси кольца на угол  $\varepsilon = 1,5 \cdot 10^{-3}$  град, составляет

$$\Delta\dot{\omega} = \Delta\omega/4 = 5/4 \text{ град/час.}$$

Рассматривается модель резонатора в виде кольца с осевой линией в недеформированном состоянии в виде окружности радиуса  $R$ , полученное из трансверсально-изотропного материала с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, вязкоупругие свойства которого описываются моделью Кельвина-Фогта, т.е. тензоры напряжений  $\sigma$  и деформаций  $\varepsilon$  связаны соотношением

$$\sigma = E\varepsilon + \mu_* \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (13)$$

где  $E, \mu_*$  - тензоры упругих и вязкостных постоянных.

Предполагается, что структуры тензоров  $E$  и  $\mu_*$  одинаковы, а плоскость, содержащая осевую линию кольца, наклонена под малым



углом  $\epsilon$  к плоскости изотропии материала. В этом случае модуль Юнга  $E$  в направлении единичного вектора  $\bar{q}$ , находящегося в плоскости осевой линии и каскающегося ее в произвольной точке, положение которой определяется углом  $\phi$ , находится с точностью до величин порядка  $\epsilon^4$ .

Показано, что в волновом твердотельном гироскопе, кроме расщепления частот, вызванного анизотропией упругих свойств, присутствует погрешность, обусловленная неравномерностью демпфирования вдоль кольца.

Если в резонаторе сформированы колебания, представляющие собой стоячую волну, то она остается, как это можно доказать, стоячей волной в дальнейшем. Рассматриваются именно эти колебания. Анизотропия вязкоупругих свойств резонатора вызывает прецессию стоячей волны

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg[C \exp(\epsilon^4 \omega_0^2 \beta_4 t/2)], \quad (14)$$

где  $\theta$  - угол, определяющий положение пучности стоячей волны, постоянная  $C$  находится из начальных условий, а  $\beta_4$  - коэффициент, определяемый вязкоупругими свойствами материала.

Рассмотрено влияние анизотропии вязкоупругих модулей на частоты собственных колебаний резонатора. Найдены формулы, позволяющие найти изменение рабочей частоты резонатора вследствие анизотропии упругих и вязкоупругих свойств материала.

Исследованы собственные колебания резонатора ВГГ в виде тонкой гибкой цилиндрической оболочки. Свойства материала оболочки являются линейными и подчиняются закону Гука, а нелинейность вызвана конечными деформациями ее срединной поверхности. Колебания оболочки имеют произвольный характер и не являются, вообще гово-

ря, стоячими волнами.

Проанализировано влияние нелинейных деформаций срединной поверхности резонатора на эволюцию волновой картины, которое заключается в ее прецессии относительно резонатора. Это явление требует обязательного учета при разработке волновых твердотельных гироскопов.

Установлено существование двух нелинейных эффектов: первый состоит в том, что колебания резонатора происходят с зависящей от амплитуды частотой; второй основной нелинейный эффект заключается в том, что волновая картина вследствие погрешностей, вносимых системой поддержания амплитуды колебаний, оказывается суперпозицией стоячей волны с конечной амплитудой  $A$  и бегущей волны с малой амплитудой  $\Delta_A$ . При этом стоячая волна прецессирует относительно резонатора с угловой скоростью

$$\dot{\beta} = \frac{\nu}{4\pi} \frac{A\Delta_A}{R^2} \omega, \quad (15)$$

где  $\nu$  - параметр, зависящий от геометрии резонатора,  $\omega$  - рабочая частота,  $n$  - форма колебаний.

Величина дрейфа, определяемая этим выражением, является погрешностью прибора и может достигать весьма больших значений, что иллюстрируется следующим примером.

Резонатор ВТГ, выполненный в форме цилиндрической оболочки с размерами: радиус - 0,02 м, длина - 0,03 м, толщина -  $4 \cdot 10^{-4}$  м,  $n = 2$ , материал - бериллий,  $A = 8 \cdot 10^{-6}$  м,  $\Delta_A = 2 \cdot 10^{-6}$  м имеет угловую скорость дрейфа стоячей волны  $\dot{\beta} = 2$  град/час, которая является недопустимой для гироскопа этого класса.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе,

можно сформулировать следующим образом.

- Выявлены общие закономерности уходов ЭСГ, вызванных конечной жесткостью ротора электростатического гироскопа, совершающего движение Эйлера - Пуансо.

- Найдена силовая функция возмущающих моментов, возникающих из-за упругих деформаций ротора электростатического гироскопа, в зависимости от угла нутации и ориентации вектора кинетического момента относительно осей, связанных с кожухом.

- Исследована эволюция угла нутации ротора электростатического гироскопа, материал которого является вязкоупругим.

- Решена задача о влиянии нестационарного температурного поля на угловую скорость упругого ротора электростатического гироскопа; полученные теоретические результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными.

- Найдены уходы электростатического гироскопа, вызванные стационарными температурными деформациями.

- Разработано полное теоретическое обоснование процесса асферизации ротора при предварительной обработке его поверхности под равномерным давлением. Приведены формулы для расчета давления и указаны случаи, когда подобный технологический прием не дает необходимого результата.

- Разработана теория расчета механических характеристик упругого некомпозитного материала, покрывающего поверхность ротора. Найденные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментом.

- Решены задачи устойчивости тонкого пленочного покрытия на шаре и полупространстве.

- Найдены уходы волнового твердотельного гироскопа, вызываемые анизотропностью материала резонатора и анизотропией вязкоуп-

ругих свойств резонатора.

- В нелинейной постановке решена задача о погрешностях волнового твердотельного гироскопа. Показано, что уходы волнового твердотельного гироскопа, вызванные нелинейностью деформаций, могут достигать недопустимо больших величин для прибора такого класса и, кроме того, дрейф меняет не только величину, но и направление.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Александров А.М., Повторайко В.И., Подалков В.В. Погрешности волнового твердотельного гироскопа с анизотропным резонатором // Известия вузов. Приборостроение.- 1990.- т. XXXIII.- №3.- С. 33-36.
2. Александров А.М., Повторайко В.И., Подалков В.В. Погрешности волнового твердотельного гироскопа с вязкоупругим анизотропным резонатором // Тр. ин-та / Моск. энерг. ин-т. В сб. "Матем. моделирование динамики управл. систем, машин и механизмов".- 1991.- №655.- С. 116-119.
3. Баркин О.Г., Подалков В.В. Влияние геометрических и упругих свойств основания на статическую устойчивость тонкого покрытия // Вестник Моск. энерг. ин-та.- 1998.- Вып.3.- С. 51-56.
4. Баркин О.Г., Подалков В.В. О выборе формы ротора электростатического гироскопа // Изв. РАН. МТТ.- 1999 г.- №2. (принята к печати).
5. Волоховская О.А., Дорфман В.Ф., Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. Определение эффективных упругих констант алмазоподобных пленок с диспергированным металлом // Прикладная физика / Межотрасл. н.-т. сборник.- М.- 1994.- Вып. 4. С. 51-57.
6. Волоховская О.А., Подалков В.В. Локальная прочность стохастически композитных материалов // Механика композитных материалов.- 1992.- №3.- С. 324 - 328.

7. Волоховская О.А., Подалков В.В. К расчету упругопластических деформаций в стохастических композиционных средах // Изв. РАН. МТТ.- 1994.- №5.- С. 92-101.
8. Волоховская О.А., Подалков В.В. О пластическом деформировании изотропно упрочняющегося поликристаллического материала // СО АН СССР. ПМТФ. 1991. №5. С. 148-153.
9. Волоховская О.А., Подалков В.В. О расчете пластических деформаций в многокомпонентном поликристаллическом материале // СО РАН ПМТФ.- 1994.- №1.- С. 121-128.
10. Карипбаев С.Ж., Ландау Б.Е., Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. Зависимость угловой скорости электростатического гироскопа от температуры окружающей среды // Изв. РАН. МТТ.- 1993.- № 3. - С. 42-49.
11. Мартыненко Ю.Г., Омаров А.Ж., Подалков В.В. Влияние упругости ротора на точность гироскопа с неконтактным подвесом // В кн.: Нелинейные колебания механических систем. Тезисы докл. и сообщ. Всесоюз. конф.- Горький.- 1987.-№2.- С.17.
12. Мартыненко Ю.Г., Омаров А.Ж., Подалков В.В. Движение упругой сферической оболочки в неконтактном подвесе // Изв. АН СССР. МТТ. - 1989.- №4.- С. 25-30.
13. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. О нереализуемости двойного вращения ротора в идеальном электростатическом гироскопе // Гироскопия и навигация.- 1994.- №2.- С.83.
14. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. О нутациях твердого тела в неконтактном подвесе // Изв. РАН. МТТ.- 1995.- №2.- С. 26-31.
15. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. О необходимости учета высших гармоник при асферизации полого ротора электростатического гироскопа // Гироскопия и навигация.- 1996.- №4(15).- С.50-51.
16. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. Асферизация полого ротора

- электростатического гироскопа // Гироскопия и навигация.- 1997.- №2.- С. 56 - 65.
17. Подалков В.В. Деформации стохастически неоднородного тела с трещиной при наличии массовых сил // Тр. ин-та / Моск.энерг. ин-т.- 1984.- Вып. 185.- С. 141-145.
18. Подалков В.В. Погрешности волнового твердотельного гироскопа, вызванные нелинейными деформациями резонатора // Гироскопия и навигация.- 1998. (в печати).
19. Подалков В.В., Александров А.М. Влияние вязкоупругости материала на нутационные колебания электростатического датчика инерциальной информации // Междунар. конф. "Информ. средства и технологии": Докл.- Моск. энерг. ин-т.- 1997.- Т.2.- С. 54-58.
20. Подалков В.В., Романов В.А. Концентрация напряжений на границе микронеоднородного упругого полупространства // Прикладная математика и механика.- 1978.- Т.42.- В.3.- С.540-545.
21. Подалков В.В., Романов В.А. Деформация упругого анизотропного микронеоднородного полупространства // Прикладная математика и механика.- 1983.- Т.47.- В.3.- С. 455-461.
22. Подалков В.В., Романов В.А. Оценка приближенного решения одной задачи теории упругости неоднородных сред // Изв. АН ССР. МТТ.- 1987.- №4.- С.122-127.
23. Подалков В.В., Романов В.А. Деформации склеенных и армированных микронеоднородных тел // Тр. ин-та. / Моск.энерг. ин-т.- 1989.- Вып.192.- С.69-73.
24. Martynenko Yu., Podalkov V.V. On The Impossibility of The Double Rotation of a Rotor in an Ideal Electrostatic Suspension // 1 S.-Petersburg Int. Conf. on Gyros. Technology: Rep.- S.-P.- 1994.- P. 53-60.

Печ. л. 20

Тираж 100

Заказ 495

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13.