

УДК 531.383-1:537.2
EDN XESCEE

С. Г. РОМАНЕНКО, С. Л. ЛЕВИН, С. Н. ФЕДОРОВИЧ, А. Ю. ФИЛИППОВ,
Т. Г. ЛЕОНОВА, А. А. МЕДВЕДКОВ

БЕСКАРДАНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП С РОТОРОМ БЕЗ ПОКРЫТИЯ НИТРИДОМ ТИТАНА

В статье сравниваются результаты испытаний бескарданных электростатических гироскопов, укомплектованных роторами, светоконтрастный рисунок на которые нанесен или по покрытию из нитрида титана, или по бериллию. Предложены и обоснованы критерии, по которым сопоставляются приборы с разными типами роторов. Проанализирована необходимость внесения изменений в технологию изготовления ротора в зависимости от совершенствования его конструкции и отработки отдельных операций технологического процесса. Показана обоснованность маркирования на определенном этапе растрового рисунка по нитрид-титановому покрытию, при этом в дальнейшем сохраняется возможность снова наносить рисунок непосредственно на бериллиевую поверхность ротора.

Ключевые слова: электростатический гироскоп, сплошной ротор, дисбаланс, параметры формы, светоконтрастный растровый рисунок, критерии оценки качества приборов.

1. Введение

Точностные характеристики гироскопов с шаровым ротором в основном определяются его формой и дисбалансом [1, 2]. Ввиду этого разработчики и изготовители таких приборов прикладывают много усилий, чтобы обеспечить минимально возможные некруглость и дисбаланс этого уникального узла гироскопа, которые при современных технологиях составляют 0,01...0,02 мкм [3]. Для идеального сферического сбалансированного ротора момент уводящих сил близок к нулю [1].

При бескарданном применении таких приборов требуется определить положение ротора относительно корпуса в широком диапазоне угловых перемещений. Для этого в рассматриваемом ниже бескарданном электростатическом гироскопе (БЭСГ), ротор которого представляет собой бериллиевый сплошной шар диаметром 1 см (рис. 1), используется оптическая система списывания по нанесенному на поверхность ротора растровому рисунку [4]. При этом чем выше контрастность рисунка, требуемая для устойчивого функционирования оптической системы, тем сильнее после маркирования искажается форма ротора.

Романенко Светлана Георгиевна. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Левин Сергей Львович. Кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Федорович Сергей Николаевич. Начальник лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Филиппов Александр Юрьевич. Ведущий инженер-технолог, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Леорова Татьяна Георгиевна. Инженер 1 категории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Медведков Андрей Александрович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».



Рис. 1. Ротор бескарданного ЭСГ

Этапы развития технологии нанесения светоконтрастного рисунка были связаны с постепенным снижением требований к значениям контрастности, обусловленным совершенствованием системы списывания.

На начальных этапах разработки БЭСГ для нормального функционирования системы списывания углового положения ротора требовалось, чтобы относительная контрастность рисунка составляла не менее 0,7. С учетом имевшихся на тот момент технологий это обеспечивалось только за счет маркирования светоконтрастного рисунка электрохимическим методом по бериллию [5]. Глубина проникновения рисунка при этом достигала 5 мкм. На поверхности бериллиевого ротора в зоне нанесения полос появлялся характерный (до 0,2 мкм) подъем материала. Профилограмма, снятая в экваториальной плоскости, имела вид восьмизубой шестеренки – по числу светоконтрастных полос, что сильно искажало первоначальную форму ротора.

При снижении требований к контрастности до $0,5 \pm 0,05$ было принято решение наносить рисунок на ротор гироскопа БЭСГ с помощью лазера по предварительно напыленному на бериллиевую сферу покрытию из нитрида титана (TiN) [6]. Этот метод обеспечивал лучшие параметры рисунка, в том числе требуемое значение его контрастности, и при этом минимально из существующих на тот момент подходов изменял на финишных операциях форму ротора. При этом наибольший вклад в деформацию ротора вносила операция напыления нитрид-титанового покрытия.

Дальнейшие исследования по отработке системы списывания сигнала датчика угла позволили снизить контрастность растрового рисунка до $0,4 \pm 0,05$, а следовательно, и вносимые при этом искажения формы ротора. В связи с этим стал актуален вопрос о возможности возврата к технологии маркирования растрового рисунка непосредственно по бериллию.

В ходе эволюции технологии изготовления ротора возникла необходимость разработки методики сравнения точностных характеристик гироскопов БЭСГ, укомплектованных роторами, светоконтрастный рисунок на которые нанесен или по покрытию из нитрида титана, или по бериллию.

2. Отработка технологии изготовления ротора

Известны 3 способа создания растрового рисунка: электрохимический, фотолитографический, лазерное маркирование [7].

Электрохимический метод (ЭХМ) [5] предполагает заполнение электролитом выемки электрода, формирующего растр. Далее электрод с электролитом в специальной оснастке, ориентирующей расположение каждого электрода относительно динамической оси ротора, подносится к поверхности ротора. Подается напряжение, и цветообразование осуществляется за счет электрохимического воздействия, в результате которого формируется черный отпечаток.

Метод фотолитографии [8] предполагает нанесение равномерного и тонкого светочувствительного слоя (фоторезиста) на ротор в зоне размещения рисунка и формирование светового изображения заданной топологии на сферической поверхности ротора. Для роторов БЭСГ эта методика не применялась, поскольку ее реализация требует использования сложного оборудования.

Лазерный метод [9] заключается в следующем: современные лазерные комплексы, интегрированные с компьютером, посылают на маркировку фрагмент чертежа растра, оформленный в распознаваемом системой формате.

Как было сказано выше, при снижении требований к контрастности растрового рисунка на роторе до значений $0,5 \pm 0,05$ анализ существующих технологий [6] позволил выбрать именно лазерный метод нанесения рисунка, благодаря которому удалось получить следующие преимущества по сравнению с ЭХМ:

- 1) технологический брак во время такой операции маловероятен;
- 2) гибкость технологии позволяет перестроить технологический процесс при необходимости изменения конфигурации рисунка;
- 3) было подтверждено уменьшение диссипативных потерь, влияющих на торможение и уходы ротора (следует отметить, что глубина рисунка при лазерном маркировании существенно меньше, чем при ЭХМ);
- 4) появилась заметная стабильность в параметрах модели погрешности оптической системы съема информации;
- 5) неравномерность контрастности рисунка уменьшилась на практике в два раза – с 15% при ЭХМ до 7% при лазерном маркировании.

Маркирование рисунка с помощью лазера по предварительно нанесенному на ротор методом вакуумного напыления нитрид-титановому покрытию [9, 10] позволяет:

- сравнить рисунок вместе с покрытием, если он не получился, и сохранить при этом бериллиевую сферу для повторного маркирования;
- управлять цветовой гаммой, что обеспечивает нужную контрастность.

При маркировании рисунка лазерным методом путем подбора режимов напыления TiN удалось практически избавиться от нарушения качества поверхности ротора, наблюдаемого после ЭХМ в зоне нанесения светоконтрастного рисунка. Однако за счет неравномерности наносимого слоя и температурных деформаций ротора операция напыления покрытия из TiN все равно приводила к возрастанию амплитуд нечетных гармоник формы до величин, зачастую превышающих предельно допустимые.

Для устранения этой проблемы отработывалась технология сферодоводки ротора [11, 12], позволявшая придать перед напылением ротору форму, у которой значения амплитуд гармоник не превышают 30% от допустимых величин. Тем не менее это не обеспечило сохранность формы ротора, и наблюдаемый технологический отход после операции маркирования оставался весьма существенным.

Накопленный за последние годы технологический потенциал позволил вернуться к операции маркирования ротора непосредственно по бериллиевой поверхности.

Это решение обосновано следующими факторами:

- отработкой системы списывания, обеспечивающей устойчивый сигнал об угловом положении ротора для относительной контрастности $0,4 \pm 0,05$, что существенно уменьшило искажения формы ротора в ходе маркирования;
- переходом от ЭХМ нанесения рисунка к лазерному маркированию;
- совершенствованием операции сферодоводки.

В результате удалось значительно улучшить форму ротора и снизить трудоемкость его изготовления и технологический отход.

Следует отметить, что существенную роль в сохранении формы ротора и качества гироскопа играет контрастность рисунка, однако эта проблема здесь не рассматривается.

3. Методика проверки качества ротора

Достижение неплохих технологических результатов в обеспечении требуемых величин гармоник формы, дисбаланса и контрастности рисунка поставило перед разработчиками задачу выбора лучшего исполнения ротора: с рисунком по бериллию или по покрытию из нитрида титана.

Качество ротора оценивалось по его влиянию на точностные характеристики БЭСГ. Критериями оценки точности БЭСГ послужили значения параметров видимого движения и коэффициенты модели ухода (КМУ) гироскопа, при этом их допусковые значения полагались известными. Эти предположения были основаны на расчетных оценках и на большой базе статистических данных, накопленных при эксплуатации гироскопа.

Качество роторов проверялось в ходе их испытаний в разборном технологическом гироскопе при двух противоположных полярных ориентациях осевой составляющей дисбаланса и двух направлениях вращения ротора – положительном и отрицательном ($Y1+$, $Y2+$, $Y1-$, $Y2-$). Эти операции проводились в одном взвешивании каждого испытуемого ротора, чтобы исключить влияние изменения напряжений подвеса от запуска к запуску.

Для упрощения дальнейшего изложения введем понятия «идеального» гироскопа, на который не действуют никакие уводящие моменты, и «хорошего» гироскопа, на который действуют только так называемые первичные моменты [13], связанные с осевым дисбалансом и отклонением формы ротора от идеальной сферы.

Используемые при анализе теоретические зависимости были получены из решения уравнений движения ротора с применением модели дрейфа «хорошего» гироскопа [14, 15].

В результате в основу методики проверки были положены следующие критерии.

Критерий №1 основан на сравнении периода прецессионного движения ротора с периодом вращения Земли, так как для идеального ротора в «идеальном» гироскопе $T_p = 24$ ч. Чем дальше от этого значения период, тем хуже ротор.

Главный анализируемый параметр – период прецессионного движения ротора гироскопа, который содержит сведения об общем уходе и связан с частотой ω_p прецессионного движения соотношением $\omega_p = 360/T_p$. С учетом принятой модели дрейфа для полярной ориентации $Y1+$ выражение для ω_p можно представить в виде [14]

$$\omega_p \approx U + K + (k_1 + k_3)V_z,$$

где U – угловая скорость вращения Земли ($15^\circ/\text{ч}$);

$K \approx k_0 + k_2(V_z^2 - V_y^2) + k_4V_z^2$ – коэффициент, зависящий от четных гармоник формы ротора (k_0, k_2, k_4); $V_i = U_i/U_0$ – относительные напряжения по осям подвеса; U_i – контрольные напряжения подвеса; U_0 – опорное напряжение; $(k_1 + k_3)V_z$ – коэффициент, зависящий от осевого дисбаланса и нечетных гармоник формы ротора.

Коэффициенты модели ухода (КМУ) описываются следующими выражениями [15]:

$$\begin{aligned} k_0 &= k_4 = 35 f_0 r a_4 S_{14} H^{-1}, \\ k_1 &= 2 f_0 r_0 (2 a_1 S_{11} - 3 a_3 S_{13}) H^{-1}, \\ k_2 &= 3 f_0 r_0 (2 a_2 S_{12} - 3 a_4 S_{14}) H^{-1}, \\ k_3 &= 30 f_0 r_0 a_3 S_{13} H^{-1}, \\ f_0 &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 u_0^2 h_0^{-2}, \end{aligned}$$

где H – кинетический момент гироскопа; h_0 – номинальный рабочий зазор в подвесе; r_0 – радиус ротора; a_n – амплитудное значение n -й сферической гармоники в разложении формы ротора по полиномам Лежандра $P_n(\gamma_j)$ (γ_j – направляющие косинусы оси вращения ротора в системе осей, связанных с корпусом прибора).

Значения коэффициентов S_{1n} определяются формулой

$$S_{1n} = 2\pi r_0^2 \int_{\mu_2}^{\mu_1} P_n(\mu) d\mu,$$

$\mu_1 = \cos v_1, \mu_2 = \cos v_2, v_1, v_2$ – угловые размеры электродов.

Видно, что значения КМУ k_i существенно зависят от амплитуд гармоник формы ротора.

Критерий №2 основан на проверке адекватности реального физического движения ротора математической модели, используемой для алгоритмической компенсации его уходов. Анализ заключается в сравнении коэффициентов K и $(k_1 + k_3)V_z$, вычисленных из выражений для частоты прецессионного движения при двух противоположных ориентациях осевой составляющей дисбаланса и двух направлениях вращения ротора. При этом коэффициенты модели ухода в разных ориентациях для «хорошего» гироскопа должны быть близки.

Для ориентаций

$$(Y1+): \quad \omega_p(Y1+) \approx U + K + (k_1 + k_3)V_z, \quad (1)$$

$$(Y2+): \quad \omega_p(Y2+) \approx U + K - (k_1 + k_3)V_z, \quad (2)$$

$$(Y2-): \quad \omega_p(Y2-) \approx U - K + (k_1 + k_3)V_z, \quad (3)$$

$$(Y1-): \quad \omega_p(Y1-) \approx U - K - (k_1 + k_3)V_z. \quad (4)$$

Используя выражения (1)–(4) (сочетания из 4-х элементов по 2), можем вычислить значения коэффициентов K и $(k_1 + k_3)V_z$:

$$(Y1+, Y2+): \quad K = \frac{\omega_p(Y1+) + \omega_p(Y2+)}{2} - U, \quad (5)$$

$$(k_1 + k_3) \cdot V_z = \frac{\omega_p(Y1+) - \omega_p(Y2+)}{2}; \quad (6)$$

$$(Y1+, Y2-): \quad (k_1 + k_3) \cdot V_z = \frac{\omega_p(Y1+) + \omega_p(Y2-)}{2} - U, \quad (7)$$

$$K = \frac{\omega_p(Y1+) - \omega_p(Y2-)}{2}; \quad (8)$$

$$(Y2+, Y1-): \quad (k_1 + k_3) \cdot V_z = U - \frac{\omega_p(Y2+) + \omega_p(Y1-)}{2}, \quad (9)$$

$$K = \frac{\omega_p(Y2+) - \omega_p(Y1-)}{2}; \quad (10)$$

$$(Y2-, Y1-): \quad K = \frac{\omega_p(Y2-) + \omega_p(Y1-)}{2} - U, \quad (11)$$

$$(k_1 + k_3) \cdot V_z = \frac{\omega_p(Y2-) - \omega_p(Y1-)}{2}. \quad (12)$$

В общем случае коэффициенты K и $(k_1 + k_3)V_z$, вычисленные по формулам (5)–(12), будут различаться, так как задействуется модель дрейфа, учитывающая только основные первичные моменты. Разность между максимальным и минимальным значениями этих коэффициентов характеризует уровень моментов, не учтенных в модели дрейфа.

Критерий №3 основан на том, что для «хорошего» гироскопа частота прецессионного движения отличается от $15^\circ/\text{час}$. Для этого вычисляется сумма частот прецессионного движения при разных ориентациях и разных направлениях вращения ротора:

$$A \quad \omega_p(Y1+) + \omega_p(Y2+) + \omega_p(Y1-) + \omega_p(Y2-), \quad (13)$$

$$B \quad \omega_p(Y1+) + \omega_p(Y1-), \quad (14)$$

$$B \quad \omega_p(Y2+) + \omega_p(Y2-). \quad (15)$$

С учетом (1)–(4) и для выполнения условий минимизации номинальные значения сумм (13)–(15) должны лежать в диапазоне: для $A - (60 \pm 1)^\circ/\text{час}$, для B и $B - (30 \pm 0,5)^\circ/\text{час}$.

Критерий №4 основан на оценке вклада в дрейф нечетных гармоник формы ротора. Это связано с тем, что именно эти гармоники больше всего исказили форму ротора при покрытии нитридом титана. Анализируемые параметры – систематическая составляющая дрейфа гироскопа и все нечетные гармоники формы ротора.

Чтобы отделить вклад в сумму $(k_1 + k_3)V_z$ именно нечетных гармоник (k_3V_z) , необходимо оценить систематическую составляющую дрейфа гироскопа БЭСГ k_1V

(k_1 – коэффициент модели дрейфа, зависящий в основном от осевого дисбаланса, $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ – модуль относительного управляющего напряжения на электродах подвеса), которая может быть вычислена из координаты γ_2^0 центра годографа полярного гироскопа:

$$k_1 V = \frac{\gamma_2^0 \cdot \omega_p}{\cos(\phi)}, \quad (16)$$

где ϕ – широта места, которая для Гатчины равна $59^\circ 34' 29''$.

Координата γ_2^0 наряду с систематической составляющей дрейфа содержит:

- погрешности определения углов рассогласования оптической и корпусной систем координат (элементы матрицы привязок);
- погрешности выставки стенда относительно географической системы координат;
- нечетные гармоники формы ротора;
- неучтенные моменты.

Это вносит погрешность в определение $k_1 V$. Для исключения первых двух погрешностей следует вычислять систематическую составляющую дрейфа как среднее значение из 4-х ориентаций:

$$k_1 V \approx \frac{|k_1 V(Y1+)| + |k_1 V(Y2+)| + |k_1 V(Y1-)| + |k_1 V(Y2-)|}{4}. \quad (17)$$

Из формулы (17) можно с минимальной погрешностью найти коэффициент $k_1 V$. Коэффициент $k_3 V_z$ рассчитывается из среднего значения коэффициента $(k_1 + k_3) V_z$ с учетом $k_1 V_z$:

$$k_3 V_z = (k_1 + k_3) V_z - k_1 V_z. \quad (18)$$

Формула (18) позволяет оценить не только 3-ю, но и все последующие нечетные гармоники формы ротора [17], поскольку они входят в коэффициент k_3 .

Обработка результатов испытаний показала, что на роторах без покрытия TiN значение коэффициента $k_3 V_z$ не превышало $0,5^\circ/\text{ч}$. Это значение коэффициента можно принять за допуск на коэффициент $k_3 V_z$.

4. Результаты испытаний

Приведем результаты обработки данных, полученных в ходе испытаний приборов с роторами с покрытием и без него с учетом изложенной в разделе 3 методики оценки качества ротора. В эксперименте было задействовано 6 приборов с ротором без покрытия и 6 приборов с покрытым ротором. Для сравнения взяты роторы практически с одинаковой контрастностью рисунка. Результаты представлены в табл. 1–3.

В табл. 1 приведены средние по указанным приборам значения параметров ротора из карты геометрических измерений: $a_i (i = 2 \dots 6)$ – гармоники формы ротора; ε_0 , ε_r – осевая и радиальная составляющие дисбаланса.

Из таблицы видно, что в приборах с ротором с покрытием за рамки допуска выходят амплитуды 3-й и 5-й гармоник. В приборах с роторами без покрытия все пара-

метры ротора – в пределах допустимого и величины амплитуд нечетных гармоник существенно меньше.

Т а б л и ц а 1

Средние значения геометрических параметров ротора с покрытием и без

Тип ротора	a_2 , мкм	a_3 , мкм	a_4 , мкм	a_5 , мкм	ϵ_0 , мкм	ϵ_2 , мкм
Допуск по КД	не более					
	0,05	0,025	0,020	0,015	0,030	0,06±0,02
с TiN	0,046	0,034	0,011	0,017	0,024	0,049
без TiN	0,027	0,006	0,020	0,005	0,029	0,080

В табл. 2 приведены рассчитанные по 6 приборам средние значения периодов (T_p) прецессионного движения, разностей периодов (ΔT_p) в разных ориентациях, коэффициентов модели ухода K и $(k_1 + k_3)V_z$, а также средние разности между максимальными и минимальными значениями этих коэффициентов, вычисленные для разных ориентаций. В табл. 3 представлены средние суммы прецессионного движения гироскопов.

Т а б л и ц а 2

Средние значения коэффициентов модели ухода приборов

Тип ротора	T_p , час	ΔT_p , час	K , °/ч	ΔK , °/ч	$(k_1 + k_3)V_z$, °/ч	$\Delta(k_1 + k_3)V_z$, °/ч	$k_1 V_z$, °/ч	$k_3 V_z$, °/ч
с TiN	27,05	18	3,74	0,85	1,654	0,845	0,237	1,45
без TiN	25,85	8	3,34	0,23	0,663	0,205	0,273	0,39

Т а б л и ц а 3

Средние значения сумм частот прецессионного движения

Тип ротора	Случай А	Случай Б	Случай В
	$\omega_p(Y1+) + \omega_p(Y2+) + \omega_p(Y1-) + \omega_p(Y2-)$, °/ч	$\omega_p(Y1+) + \omega_p(Y1-)$, °/ч	$(Y2+) + \omega_p(Y2-)$, °/ч
с TiN	61,357	30,725	30,632
без TiN	60,01	29,93	30,08

Из табл. 2 видно:

- 1) период прецессионного движения БЭСГ с роторами без покрытия ближе к 24 часам, т.е. для этих гироскопов уровень уводящих моментов меньше (критерий №1);
- 2) расчетные значения коэффициентов K и особенно $(k_1 + k_3)V_z$, а также разности ΔK и $\Delta(k_1 + k_3)V_z$ между максимальными и минимальными значениями этих коэффициентов, вычисленными для разных ориентаций (см. критерий №2), для роторов без покрытия меньше, чем для роторов с покрытием. Это характеризует значительно меньший уровень моментов, не учтенных в модели дрейфа, а также то, что модель дрейфа, учитывающая моменты, связанные с осевым дисбалансом и отклонением формы ротора от идеальной сферы, более адекватна реальному движению;
- 3) значения коэффициентов $k_3 V_z$ (табл. 2) для роторов без покрытия значительно меньше, чем для роторов с покрытиями (см. критерий №4), что указывает на значительное снижение уровня моментов от нечетных гармоник формы ротора при исключении покрытия из TiN;

- 4) приведенные в табл. 3 средние суммы частот прецессионного движения ротора БЭСГ (критерий №3), вычисленные по 6 приборам, для роторов с покрытием оказались за пределами допуска, что связано с отрицательным влиянием моментов от нечетных гармоник формы ротора. Для роторов без покрытия – в пределах допуска, т.е. моменты от нечетных гармоник минимальны.

5. Заключение

Обоснована возможность наносить рисунок непосредственно на бериллиевую поверхность ротора при условии снижения требований к контрастности растрового рисунка и обработке операций маркирования и сферодоводки.

Разработана методика оценки качества ротора по результатам испытаний в составе прибора. Выполненное в соответствии с ней сравнение результатов испытаний приборов с роторами с покрытием TiN и без него показало, что на данном этапе развития технологии исключение нитрид-титанового покрытия улучшает форму ротора и, как следствие, уменьшает действие на него возмущающих моментов. Все роторы без покрытия удовлетворяют критериям предложенной методики оценки их качества и могут быть использованы в приборах БЭСГ.

Дополнительно следует отметить упрощение технологии изготовления ротора без нанесения покрытия и снижение его стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мартыненко Ю.Г.** Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. Москва: «Наука», 1988.
2. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем. // Гироскопия и навигация. 2011. №1(72).
3. **Marcelja, F., De Bra, D.B., Keiser, G.M., and Turneure, J.P.,** Precision spheres for the Gravity Probe B experiment Class, *Quantum Grav.*, 2015, 32, 224007.
4. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.
5. **Юльметова О.С. и др.** Сравнительная оценка электрофизических и электрохимических способов создания рисунка на роторах электростатических гироскопов // Металлообработка. 2016. №4(94).
6. **Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Садыков З.Б.** Электрохимическое маркирование деталей. Москва: «Машиностроение», 1993.
7. **Гинзбург В.А., Парминова Н.В., Филиппов А.Ю.** Расчет плоских фотошаблонов для проецирования заданных изображений на сферической поверхности // Гироскопия и навигация. 1997. №3(18).
8. **Фомичев А.М. и др.** Использование плазменной и лучевой технологий для обработки узлов гироскопов // Металлообработка. 2014. №1(79).
9. **Юльметова О.С.** Ионно-плазменные и лазерные технологии в гироскопическом приборостроении. Дисс. ... степени д.т.н. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019.
10. **Юльметова О.С., Фомичев А.М., Новиков В.И.** Разработка средств математического обеспечения процесса формирования тонкопленочных покрытий на роторах шаровых гироскопов // Металлообработка. 2015. №2 (86).
11. **Федорович С.Н.** Современное состояние и перспективы развития технологии сферодоводки прецизионных узлов // Металлообработка. 2018. №1(103).
12. **Федорович С.Н.** Моделирование процесса доводки сферического ротора шарового гироскопа // Известия высших учебных заведений. Серия «Приборостроение». 2021. №4(64).
13. **Eby, P. and Darbro, W.,** Electrical torques on the electrostatic gyro in the gyro relativity experiment, *Space Sciences Laboratory NASA*. October 1980.

14. Романенко С.Г., Гуревич С.С., Ландау Б.Е., Левин С.Л. Движение бескарданного электростатического гироскопа под действием консервативных и неконсервативных сил // Гироскопия и навигация. 1996. №3(14). С. 7–13.
15. Буравлев А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г. Модель дрейфа бескарданного электростатического гироскопа и идентификация ее параметров // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2002. №1 (13).

Romanenko, S.G., Levin, S.L., Fedorovich, S.N., Filippov, A.Yu., Leonova, T.G., and Medvedkov, A.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia).

Gimballed Electrostatic Gyroscope with a Rotor without TiN Coating, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 157–166.

Abstract. *The article compares the test results for gimballed electrostatic gyroscopes containing rotors with a light-contrast pattern applied to titanium nitride (TiN) coating or to beryllium. The criteria for comparing the devices with different types of rotors are proposed and justified. The need to modify the rotor manufacturing technology in order to improve the rotor design and mature some technological operations is analyzed. It has been shown that at a certain stage it is rational to mark the raster pattern on the titanium nitride coating, and currently the pattern can be again applied directly to the rotor beryllium surface.*

Key words: electrostatic gyroscope, solid rotor, unbalance, shape parameters, light-contrast raster pattern, quality criteria.

Материал поступил 07.11.2023