

СТАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ

Предложена процедура балансировки первых четырех гармоник неоднородного распределения массы металлического цилиндрического беззубцового резонатора волнового твердотельного гироскопа с использованием метода электрохимического растворения металлов. Требуемый алгоритм удаления массы с поверхности резонатора достигается за счет аналитически рассчитанных угла и глубины наклонного погружения резонатора в электрохимическую ванну с его поворотом вокруг оси симметрии цилиндра.

Введение

Балансировка резонаторов волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) является одной из основных технологических операций при их изготовлении. Необходимость балансировки связана с отклонениями геометрии резонатора от идеальной осесимметричной формы, которые приводят к ухудшению характеристик ВТГ. Теория этого явления достаточно подробно описана в работах [1–4]. Асимметрия резонатора приводит к неоднородному распределению массы резонатора M по окружному углу φ , которое может быть представлено в виде ряда Фурье

$$M(\varphi) = M_0 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cos k(\varphi - \varphi_k),$$

где k – номер формы дефекта распределения массы резонатора; M_0 – равномерно распределенная масса резонатора по окружному углу; M_k – величина k -й формы дефекта распределения массы резонатора; φ_k – ориентация k -й формы дефекта распределения массы резонатора относительно условного нуля окружного угла.

Отличие от нуля величин M_1 , M_2 или M_3 приводит к колебаниям центра масс резонатора при работе гироскопа, дополнительному рассеянию энергии колебаний резонатора в местах его закрепления и к систематической погрешности ВТГ. При ненулевом значении M_4 возникает расщепление собственной ча-

Басараб Михаил Алексеевич. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Лунин Борис Сергеевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Матвеев Валерий Александрович. Доктор технических наук, профессор. Руководитель Научно-учебного комплекса «Информатика и системы управления», заведующий кафедрой «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Чуманкин Евгений Алексеевич. Кандидат технических наук, заместитель начальника отдела ОАО «АНПП «ТЕМП-АВИА», г. Арзамас.

стоты резонатора, приводящее к случайным погрешностям прибора. Для устранения таких явлений резонатор балансируют по этим четырем формам дефекта распределения массы, т.е. определяют параметры M_k и ϕ_k для $k=1,2,3,4$ и удаляют неуравновешенную массу.

Известны технические решения, позволяющие отбалансировать резонатор. В технологии балансировки, разработанной фирмой Delco Electronics (США), неуравновешенная масса удаляется лазерным испарением со специальных балансировочных зубцов, расположенных на кромке кварцевого резонатора [5]. При колебаниях резонатора зубцы не деформируются, поэтому нарушения структуры стекла, возникающие при лазерном облучении, не изменяют добротность резонатора. Для балансировки беззубцовых кварцевых резонаторов используют ионно-плазменные технологии, при этом неуравновешенная масса распыляется с его поверхности ионным пучком [6].

Обе эти, а также некоторые другие технологии, позволяют решить поставленную задачу, но характеризуются большой трудоемкостью и сложностью применяемого оборудования и используются образцом для балансировки кварцевых резонаторов точных ВТГ [7, 8]. Вместе с тем в последние годы возник спрос на дешевые датчики угловой скорости общего применения, примером такого прибора может служить ВТГ, описанный в [9]. Он имеет простую конструкцию, основой которой является цилиндрический металлический резонатор с приклеенными пьезоэлементами. Погрешность измерения угловой скорости при этом составляет несколько градусов в час, что, наряду с низкой себестоимостью, открывает для таких датчиков ряд перспективных применений во многих областях техники. Характеристики таких ВТГ могут быть значительно улучшены проведением балансировки их резонаторов по первым четырем формам дефекта распределения массы. Цель настоящей работы состояла в разработке простой и недорогой технологии балансировки металлических резонаторов ВТГ общего применения, пригодной для использования в серийном производстве приборов.

Электрохимическое удаление неуравновешенной массы

Для удаления неуравновешенной массы использован метод электрохимического растворения металлов, который имеет два основных преимущества. Прежде всего этот метод позволяет удалять материал с высокой точностью. Действительно, согласно закону Фарадея, количество удаленного металла прямо пропорционально электрическому заряду, прошедшему через обрабатываемую поверхность. Для удаления массы m через поверхность надо пропустить заряд

$$Q = \frac{m}{K}, \quad (1)$$

где K – экспериментально определяемый постоянный коэффициент, зависящий от материала резонатора и состава электролита.

Величину пропускаемого через поверхность электрического заряда контролируют временем пропускания постоянного тока I

$$t = \frac{Q}{I}. \quad (2)$$

Рекомендуемая величина тока определяется произведением

$$I = jS, \quad (3)$$

где j – плотность тока, рекомендуемая для конкретного состава электролита и температуры электрохимического растворения, S – площадь обрабатываемой поверхности.

Могут быть использованы любые электролиты, предпочтительно кислотные, обеспечивающие растворение продуктов, образующихся при электрохимическом растворении металла. Согласно (1)–(3) точность удаления массы с обрабатываемой поверхности определяется нестабильностью тока I и ошибкой времени обработки t . На практике погрешность этих величин не превышает 0,01–0,1%, что обеспечивает высокую точность удаления неуравновешенной массы.

Другим преимуществом этого метода является дешевизна производственного оборудования и простота автоматизации процесса балансировки. Разработанная технология может быть использована для балансировки как зубчатых [10], так и беззубцовых металлических резонаторов, для которых предварительно измерены параметры M_k и φ_k ($k=1,2,3,4$) одним из известных методов (см., например, [6]).

При балансировке беззубцовых резонаторов неуравновешенную массу необходимо удалять непосредственно с поверхности резонатора. Это можно сделать за счет наклонного погружения резонатора в электрохимическую ванну. Процедура такой обработки показана на рис. 1.

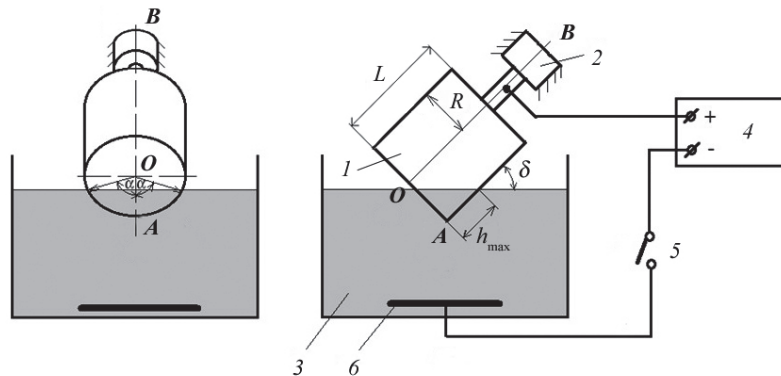


Рис. 1. Электрохимическая балансировка металлического резонатора:
1 – резонатор; 2 – крепежное устройство; 3 – электролит; 4 – источник тока;
5 – выключатель; 6 – электрод

Цилиндрический металлический беззубцовый резонатор I радиуса R и длиной L с предварительно определенными значениями параметров массового дефекта устанавливают в крепежном приспособлении 2 и погружают в электрохимическую ванну с электролитом 3. Обработке подвергается внутренняя и внешняя боковая поверхность цилиндрического клина с центральным углом 2α и высотой $h_{\max}$. При $\alpha=90^\circ$ погруженное тело называют «цилиндрическим копытом» (англ. - cylindrical hoof [11]). Величина центрального угла цилиндрического клина регулируется высотой $h_{\max}$ и углом наклона резонатора δ . Поворачивая резонатор вокруг оси OB , совмещают угол ориентации удаляемой формы неоднородности распределения массы φ_k с плоскостью $A-O-B$, где A – точка максимального погружения. Резонатор электрически соединяют с выходом источника постоянного тока 4, а другую клемму источника тока 4 через выключа-

тель 5 соединяют с электродом 6. При замыкании выключателя 5 на интервал времени t по электрической цепи протекает постоянный ток I , при этом согласно (1)-(3) с погруженной в электролит внутренней и внешней поверхности резонатора удаляется равномерный по толщине слой металла массой m .

Алгоритм балансировки

Выберем угол наклона резонатора в пределах $0 < \delta < 90^\circ$ (при $\delta = 0$ получается $h_{\max} = L$ и погружается верхняя, нерабочая кромка резонатора; при $\delta = 90^\circ$ отсутствует эффект от углового поворота вокруг оси OB). Максимальная глубина погружения в ванну при этом удовлетворяет ограничению

$$h_{\max} \leq \min\{L, 2R \operatorname{ctg} \delta\},$$

т.е. погружение производится до тех пор, пока либо нижняя торцевая поверхность цилиндра не окажется в электролите, либо поверхность электролита не достигнет его верхней торцевой поверхности.

Величина массы, снимаемой с боковой поверхности резонатора пропорциональна расстоянию от погружаемого торца цилиндра до поверхности электролита вдоль образующей [11]:

$$h(\varphi) = \begin{cases} h_{\max} \frac{\cos \varphi - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}, & |\varphi| < \alpha, \\ 0, & |\varphi| \geq \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Разложим $h(\varphi)$ в ряд Фурье:

$$h(\varphi) = \frac{h_{\max}}{\pi(1 - \cos \alpha)} \left[(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + (\alpha - \cos \alpha \sin \alpha) \cos \varphi + \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=2}^{\infty} \frac{k \cos k\alpha \sin \alpha - \cos \alpha \sin k\alpha}{k(1 - k^2)} \cos k\varphi \right]. \quad (5)$$

Для балансировки резонатора ВТГ практический интерес представляют первые четыре гармоники разложения (5)

$$h(\varphi) = h_{\max} [C_0(\alpha) + C_1(\alpha) \cos \varphi + C_2(\alpha) \cos 2\varphi + \\ + C_3(\alpha) \cos 3\varphi + C_4(\alpha) \cos 4\varphi], \quad (6)$$

коэффициенты которого приведены в табл. 1. Графики функций $C(\alpha)$ представлены на рис. 2. Следует отметить, что коэффициент C_0 характеризует равномерно распределенную массу, удаляемую с поверхности резонатора, величина которой не влияет на работу гироскопа.

При балансировке резонатора необходимо удалять первые четыре формы неоднородного распределения массы резонатора поочередно и независимо друг от друга. При этом следует учитывать, что балансировка любой k -й гармоники приводит к появлению кратных гармоник с номерами nk ($n = 2, 3, 4, \dots$). Таким образом, при удалении 1-й формы неоднородности массы образуются гармоники с номерами 2, 3, 4, ..., а при удалении 2-й формы – все четные гармоники. Балансировка 3-й и 4-й форм дефекта влечет за собой появление лишь старших

гармоник с номерами >4 , существенно не влияющих на характеристики прибора. Поэтому следует балансировать сначала последовательно 1-ю и 2-ю гармоники, а затем – 3-ю и 4-ю гармоники (в произвольном порядке).

Т а б л и ц а 1

Функции $C_k(\alpha)$ и их производные $C'_k(\alpha)$

k	$C_k(\alpha)$	$C'_k(\alpha)$
0	$C_0(\alpha) = \frac{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha}{\pi(1 - \cos \alpha)}$	$C'_0(\alpha) = \frac{\sin \alpha (\alpha - \sin \alpha)}{\pi(1 - \cos \alpha)^2}$
1	$C_1(\alpha) = \frac{\alpha - \cos \alpha \sin \alpha}{\pi(1 - \cos \alpha)}$	$C'_1(\alpha) = \frac{\sin \alpha [\alpha + (2 - \cos \alpha) \sin \alpha]}{\pi(1 - \cos \alpha)^2}$
2	$C_2(\alpha) = \frac{2 \sin^3 \alpha}{3\pi(1 - \cos \alpha)}$	$C'_2(\alpha) = -\frac{2 \sin^2 \alpha [1 - (3 - 2 \cos \alpha) \cos \alpha]}{3\pi(1 - \cos \alpha)^2}$
3	$C_3(\alpha) = \frac{2 \sin^3 \alpha \cos \alpha}{3\pi(1 - \cos \alpha)}$	$C'_3(\alpha) = -\frac{2 \sin^2 \alpha [1 - (4 - 3 \cos \alpha) \cos^2 \alpha]}{3\pi(1 - \cos \alpha)^2}$
4	$C_4(\alpha) = \frac{2 \sin^3 \alpha (6 \cos^2 \alpha - 1)}{15\pi(1 - \cos \alpha)}$	$C'_4(\alpha) = \frac{2 \sin^2 \alpha}{15\pi(1 - \cos \alpha)^2} (1 - 24 \cos^4 \alpha + 30 \cos^3 \alpha + 8 \cos^2 \alpha - 15 \cos \alpha)$

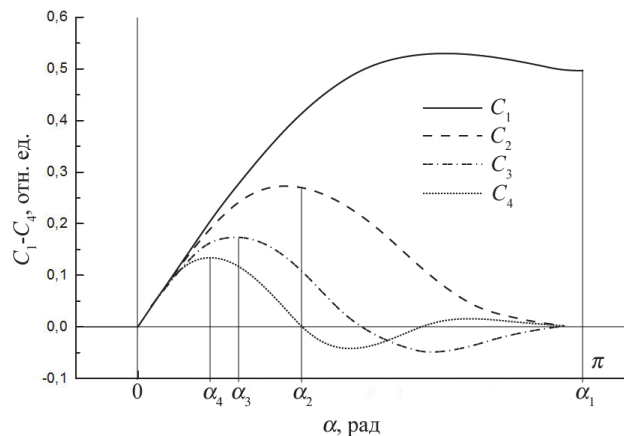


Рис. 2. Зависимость коэффициентов C_k ($k = 1, 2, 3, 4$) от угла α

Для нахождения оптимальных параметров обработки необходимо знать, при каких углах α амплитуды гармоник $C_k(\alpha)$ обращаются в нуль либо становятся максимальными (обращаются в нуль их производные $C'_k(\alpha)$). Данные углы приведены в табл. 2.

Если осуществлять N -кратное электрохимическое травление поверхности цилиндра, последовательно повернутого на угол $2\pi/N$ вокруг оси OB , функция контура погружаемой поверхности цилиндра вместо (6) будет иметь вид

$$h_N(\varphi) = h_{\max} \sum_{k=0}^{\infty} C_k(\alpha) \sum_{j=0}^{N-1} \cos k \left(\varphi + \frac{2\pi j}{N} \right) = h_{\max} N \sum_{k=0}^{\infty} C_{kN}(\alpha) \cos(kN\varphi). \quad (7)$$

Рассмотрим далее лишь случаи симметричного одно-, двух-, трех- и четырехкратного травления, опустив гармоники с номером выше четвертой:

$$\begin{aligned} h_1(\varphi) &= h_{\max} [C_0(\alpha) + C_1(\alpha)\cos\varphi + C_2(\alpha)\cos 2\varphi + C_3(\alpha)\cos 3\varphi + C_4(\alpha)\cos 4\varphi], \\ h_2(\varphi) &= 2h_{\max} [C_0(\alpha) + C_2(\alpha)\cos 2\varphi + C_4(\alpha)\cos 4\varphi], \\ h_3(\varphi) &= 3h_{\max} [C_0(\alpha) + C_3(\alpha)\cos 3\varphi], \\ h_4(\alpha) &= 4h_{\max} [C_0(\alpha) + C_4(\alpha)\cos 4\varphi]. \end{aligned} \quad (8)$$

Т а б л и ц а 2

Нули функций $C(\alpha)$ и $C'(\alpha)$, рад

k	$C(\alpha)$	$C'(\alpha)$
1	$\alpha_{11} = 0$	$\alpha'_{11} \approx 2,139$ $\alpha'_{12} = \pi$
2	$\alpha_{21} = 0$ $\alpha_{22} = \pi$	$\alpha'_{21} = \pi/3$ $\alpha'_{22} = \pi$
3	$\alpha_{31} = 0$ $\alpha_{32} = \pi/2$ $\alpha_{33} = \pi$	$\alpha'_{31} = \arccos[(1 + \sqrt{13})/6] \approx 0,696$ $\alpha'_{32} = \arccos[(1 - \sqrt{13})/6] \approx 2,020$ $\alpha'_{33} = \pi$
4	$\alpha_{41} = 0$ $\alpha_{42} = \arccos(1/\sqrt{6}) \approx 1,150$ $\alpha_{43} = \arccos(-1/\sqrt{6}) \approx 1,991$ $\alpha_{44} = \pi$	$\alpha'_{41} \approx 0,521$ $\alpha'_{42} \approx 1,501$ $\alpha'_{43} \approx 2,327$ $\alpha'_{44} = \pi$

При однократном погружении распределение электрохимически растворенной массы на единицу окружного угла имеет вид

$$M(\varphi) = \rho d R h_{\max} [C_0(\alpha) + C_1(\alpha)\cos\varphi + C_2(\alpha)\cos 2\varphi + C_3(\alpha)\cos 3\varphi + C_4(\alpha)\cos 4\varphi], \quad (9)$$

где ρ – плотность материала резонатора; d – толщина удаляемого металлического слоя.

При удалении 1-й формы дефекта оптимальное значение половины центрального угла цилиндрического клина обрабатываемой поверхности составляет $\alpha_1 = \alpha'_{12} = \pi$ или 180° . При этом $C_2 = C_3 = C_4 = 0$ и, согласно (9) в ходе электрохимического травления удаляется только 1-я форма дефекта.

При удалении 2-й формы дефекта оптимальное значение $\alpha_2 = \alpha_{42} \approx 1,150$ рад или примерно $65,9^\circ$ (когда $C_4 = 0$), причем электрохимическое травление поверхности резонатора проводят в два этапа. Сначала в установленном положении резонатора пропускают через обрабатываемую поверхность половину рассчитанного электрического заряда, затем поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на 180° и пропускают через обрабатываемую поверхность такой же заряд. При этом в распределении (9) только коэффициенты

C_0 и C_2 отличны от нуля, т. е. избирательно удаляется 2-я форма дефекта распределения массы резонатора.

Соответственно удаление 3-й формы дефекта резонатора проводят в три этапа при $\alpha_3 = \alpha'_{31} \approx 0,696$ рад или примерно $39,9^\circ$ (в этом случае величина коэффициента C_3 максимальна и, следовательно, электрохимическая обработка наиболее эффективна). На каждом этапе снимается 1/3 часть общей удаляемой массы.

Удаление 4-й формы осуществляется в четыре этапа, при этом $\alpha_4 = \alpha'_{41} \approx 0,521$ рад (примерно $29,9^\circ$). На каждом этапе снимается 1/4 часть общей удаляемой массы.

Общая величина массы, удаляемой с поверхности при балансировке k -й формы дефекта распределения массы резонатора, определяется выражением

$$m_k = \frac{2M_k}{C_k} \int_0^{\alpha_k} (C_0 + C_k \cos \varphi) d\varphi. \quad (10)$$

Из (10) получим

$m_1 = 2\pi M_1$, $m_2 \approx 2,756M_2$, $m_3 \approx 1,685M_3$, $m_4 \approx 1,265M_4$.
Согласно (1), (2) общее время электрохимического травления равно

$$t_k = \frac{m_k}{kKI} \quad (11)$$

или приближенно

$$t_1 \approx \frac{6,283M_1}{KI}, \quad t_2 \approx \frac{1,378M_2}{KI}, \quad t_3 \approx \frac{0,562M_3}{KI}, \quad t_4 \approx \frac{0,316M_4}{KI}.$$

Величина тока при балансировке формы с номером k выбирается исходя из соотношения (3) с учетом того, что общая площадь обрабатываемой поверхности (внешняя и внутренняя)

$$S = 4kR \int_0^{\alpha} h(\varphi) d\varphi. \quad (12)$$

Подставив (4) в (12), получим [9]:

$$S = 4kh_{\max} R \frac{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}.$$

Пример балансировки. Проведем устранение 4-й формы дефекта распределения массы величиной $M_4 = 10$ мг в металлическом цилиндрическом беззубцовом резонаторе, изготовленном из нержавеющей стали. Ориентация массового дефекта относительно условного нуля резонатора составляет $\varphi_4 = 0^\circ$.

Цилиндрический металлический беззубцовый резонатор ВТГ 1 с предварительно определенными значениями параметров 4-й формы дефекта погружают в электрохимическую ванну с электролитом на глубину $h_{\max}$ (см. рис. 1). Изменением угла наклона δ устанавливают величину половины центрального угла цилиндрического клина $\alpha_4 = 29,9^\circ$, поворачивают резонатор вокруг оси симметрии и совмещают угол ориентации удаляемой формы массового дефекта φ_4 с ориентацией цилиндрического клина, образованного погруженной частью ре-

зонатора (плоскость $A-O-B$). Электрически соединяют резонатор с выходом источника постоянного тока 4, а другую клемму источника тока 4 через выключатель 5 – с электродом 6. В качестве электролита для электрохимической обработки нержавеющей стали можно использовать кислотный электролит следующего состава [12]: азотная кислота концентрированная (70%), уксусная кислота концентрированная (30%).

Экспериментально определенное авторами значение коэффициента K при электрохимическом травлении нержавеющей стали в указанном электролите составляет $K = 0,176$ мг/Кл. Общая удаляемая масса равна $m_4 = 12,65$ мг, а общий пропускаемый заряд $Q_4 = 71,877$ Кл. Время электрохимического травления при $L = 1$ см и токе $I = 0,1$ А составляет $t_4 = 179,6$ с. Для удаления неуравновешенной массы замыкают электрическую цепь выключателем 5 на время t_4 , затем поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на 90° , например, по часовой стрелке и вновь замыкают электрическую цепь выключателем 5 на время t_4 . Повторяют эту операцию еще дважды, поворачивая каждый раз резонатор на 90° по часовой стрелке и замыкая электрическую цепь на время t_4 . Таким образом, общее время травления составляет около 12 мин.

Заключение

Использование электрохимического травления для удаления неуравновешенной массы позволяет реализовать простую технологию балансировки металлических резонаторов ВТГ, пригодную для условий серийного производства. Такая технология позволит повысить точность ВТГ общего применения без существенного увеличения себестоимости изделий. Предложенный алгоритм удаления неуравновешенной массы может быть обобщен на случай балансировки по первым четырем гармоникам дефекта распределения массы других типов беззубцовых резонаторов ВТГ, в частности полусферических.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lynch, D.D.** Vibration-induced drift in the hemispherical resonator gyro // Proc. Annual Meeting of the Institute of Navigation. - 23-25 June, 1987. - Dayton, Ohio. - pp. 34-37.
2. **Жбанов, Ю.К., Журавлев, В.Ф.** О балансировке волнового твердотельного гироскопа // Известия РАН. Механика твердого тела. - 1998. - №4. - С. 4-16.
3. **Жбанов, Ю.К., Каленова, Н.В.** Поверхностный дебаланс волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. Механика твердого тела. - 2001. - №3. - С. 11-18.
4. **Egarmin, N.E., Yurin, V.E.** Introduction to theory of vibratory gyroscopes. - М.: Binom, 1993. - 111 p.
5. **Rozelle, D.M.** The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets // Spaceflight Mechanics. - 2009. - vol. 134. - AAS09-176.
6. **Бодунов, Б.П., Лопатин, В.М., Лунин, Б.С.** Способ балансировки резонаторов волнового твердотельного гироскопа // Патент РФ. - 7G01C 19/56. RU 2147117. - 1998.
7. **Мейер Д., Розелле Д.** Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. - 2012. - №3(78). - С. 45-54.
8. **Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж.** Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. - 2013. - №4(83). - С. 24-34.
9. **Chikovani, V.V., Yatsenko, Yu.A.** Investigation of azimuth accuracy measurement with metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope // Proc. of XVII International Conference on Integrated Navigation Systems. - 31 May – 2 June, 2010. St.-Petersburg. - St.-Petersburg: "Elektropribor", 2010. - pp. 25-30.

10. Матвеев, В.А., Лунин, Б.С., Басараб, М.А., Чуманкин, Е.А. Балансировка металлических резонаторов волновых твердотельных гироскопов низкой и средней точности // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. - 2013. - № 06. DOI: 10.7463/0613.0579179.
11. Harris, J.W., Stocker, H. Handbook of Mathematics and Computational Science. - New York: Springer-Verlag, 1998. - pp. 103-104.
12. Розбери, Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии. - М.: Энергия, 1972. - 456 с.

Abstract. Mass debalance of resonators of the cylindrical vibratory gyroscopes substantially influences the performance of these devices. In particular, it can lead to splitting of the resonator natural frequency in the operating mode. An algorithm for balancing the first harmonics of such anomalies for the metallic cylindrical resonator is proposed. The technology is based on the immersion of resonator parts into the chemical bath. The balancing is performed by removing masses at certain locations of the resonator surface by the electrochemical etching. The required law of mass removal from the resonator surface is achieved by analytically evaluated angles and depths of its inclined immersion into the bath (Fig. 1). To remove the harmonic number N it is necessary to immerse the resonator into the bath N times with its sequential rotation by the angle $2\pi/N$ around the symmetry axis. The proposed technique is precise and at the same time simple to implement. The surface mass removal algorithm can be generalized to balancing of other types of resonators, for instance, the hemispherical resonator.

Key words: solid-state wave gyroscope, cylindrical resonator, balancing

Материал поступил 6.05.14