

References

1. **Molodenkov A. V.** *K resheniyu zadachi Darbu* (On the Solution of the Darboux), *Problem. Izv. Akad. Nauk. Mekh. Tverd. Tela*, 2007, no. 2, pp. 3–13 (in Russian).
2. **Molodenkov A. V.** *Ob opredelenii orientatsii tverdogo tela po ego uglovoi skorosti* (Rigid body orientation determination by its angular velocity), *Vestnik of the Saratov State Tech. Univ.*, 2007, no. 1, pp. 67–73 (in Russian).
3. **Lurie A. I.** *Analiticheskaya mekhanika* (Analytic Mechanics), Moscow, Fizmatgiz, 1961, 824 p. (in Russian).
4. **Branets V. N., Shmyglevskii I. P.** *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela* (The Use of Quaternions in Problems of Orientation of Solid Bodies), Moscow, Nauka, 1973, 320 p. (in Russian).
5. **Chelnokov Yu. N.** *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya* (Quaternion and Bi-quaternion Models and Methods in Mechanics of Solids and Their Applications), Moscow, Fizmatlit, 2006, 512 p. (in Russian).
6. **Chelnokov Yu. N.** *Kvaterniony i svyazannye s nimi preobrazovaniya v dinamike simmetrichnogo tverdogo tela. Ch. 2* (Quaternions and Related Transformations in Dynamics of a Symmetric Rigid Body. Part II), *Izv. Akad. Nauk. Mekh. Tverd. Tela*, 1998, no. 5, pp. 3–18 (in Russian).
7. **Ivanova E. A.** *Ob odnom podkhode resheniyu zadachi Darbu* (On One Approach to Solving the Darboux Problem), *Izv. Akad. Nauk. Mekh. Tverd. Tela*, 2000, no. 1, pp. 45–52 (in Russian).
8. **Zubov V. I.** *Analiticheskaya dinamika giroskopicheskikh sistem* (Analytic Dynamics of Gyro Systems), Leningrad, Sudostroenie, 1970. 317 p. (in Russian).
9. **Kalenov V. I., Morozov V. M.** *O primenении методов теории приводимости некоторым задачам динамики giroskopicheskikh sistem* (On the Application of Reducibility Methods to Problems of Dynamics of Gyro Systems), *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1987, no. 1, pp. 8–14 (in Russian).
10. **Morozov V. M., Kalenova V. I.** *Otsenivanie i upravlenie v nestatsionarnykh lineinykh sistemakh* (Estimation and Control in Non-stationary Linear Systems), Moscow, Publishing house of MSU, 1988, 143 p. (in Russian).
11. **Sachkov G. P., Kharlamov Yu. M.** *Ob integriruemosti kinematicheskikh uravnenii vrashcheniya po ego uglovoi skorosti* (On Determining the Object Orientation in Rodrigues-Hamilton Parameters from Its Angular Velocity), *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1991, no. 6, pp. 11–15 (in Russian).
12. **Chelnokov Yu. N.** *Ob opredelenii orientatsii ob"ekta v parametrah Ro-driga-Gamil'tona po ego uglovoi skorosti* (On Determining the Object Orientation in Rodrigues-Hamilton Parameters from Its Angular Velocity), *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1977, no. 3, pp. 11–20 (in Russian).
13. **Plotnikov P. K.** *Izmeritel'nye giroskopicheskie sistemy* (Gyroscopic Measurement Systems), Saratov, Publishing house of Saratov Univ., 1976, 167 p. (in Russian).
14. **Erugin N. P.** *Privodimye sistemy* (Reducible Systems), *Trudy Mat. Inst. Steklov*, 1947, vol. 13, pp. 1–95 (in Russian).
15. **Savage P. G.** *Strapdown Analytics*, Strapdown Associates Inc., Maple Plan, Minnesota, 2007.

УДК 681.586.5

DOI: 10.17587/mau/17.340-346

В. И. Бусурин, д-р техн. наук, проф., vbusurin@mai.ru, **В. В. Коробков**, канд. техн. наук, доц., vvor@bk.ru, **Иин Наинг Вин**, аспирант, integratedchip.88@gmail.com,

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости¹

Рассмотрены вопросы построения кольцевого волнового преобразователя угловой скорости на основе оптического туннелирования. Исследовано влияние параметров кольцевого резонатора и оптоэлектронного модулятора на радиальное движение, зазор и отражательную способность. Предложена математическая модель оптоэлектронного преобразователя на основе оптического туннелирования, обеспечивающая квазилинейную функцию преобразования.

Ключевые слова: кольцевой волновой резонатор, оптоэлектронный преобразователь, угловая скорость, оптическое туннелирование, пьезоактюатор, функция преобразования, зазор, радиальное движение

Введение

Определение угловой скорости осуществляется традиционно с помощью механических преобразователей — гироскопов, использующих быстро вращающееся тело с несколькими степенями свободы [1]. Известно, что они имеют ряд недостатков — значительную массу и большое энергопотребление.

Современные малогабаритные микроэлектромеханические преобразователи угловой скорости часто используют кольцевой волновой резонатор и емкостной способ съема информации [2]. В таких преобразователях для съема информации к подвижной части преобразователя прикреплен обкладка конденсатора, а вторая обкладка закреплена неподвижно. При наличии угловой скорости подвижная часть преобразователя смещается отно-

сительно обкладки на неподвижной части. Функция преобразования при таком способе съема информации имеет существенную нелинейность.

Для получения квазилинейной функции преобразования при измерении угловой скорости предлагается использовать преобразователи внешних воздействий на основе управляемого оптического туннельного эффекта (ОТЭ) с переменным зазором между базовой поверхностью и кольцевым резонатором.

Функциональная схема кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Кольцевой резонатор является одним из основных узлов микроэлектромеханических преобразователей для измерения угловой скорости относительно полярной оси. При его вращении на него действуют силы Кориолиса, которые являются причиной возникновения радиального движения по периметру кольца. При деформации кольцевого резонатора можно выделить два режима [3].

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447).

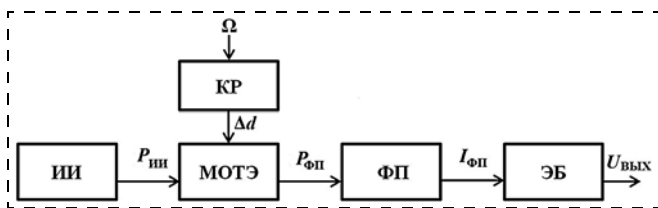


Рис. 1. Структурная схема одноканального оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

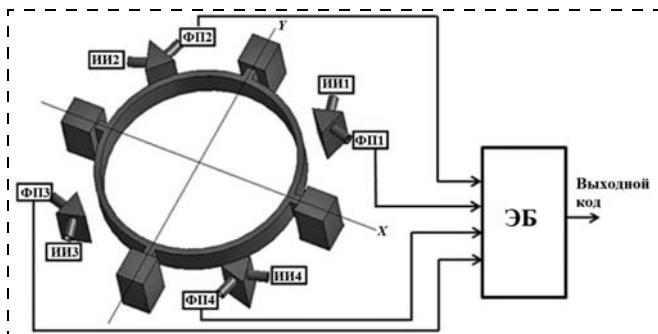


Рис. 2. Функциональная схема кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Если в кольцевом резонаторе возбуждены только постоянные виброколебания, то при отсутствии угловой скорости кольцо принимает форму эллипса. Такое состояние называется первым режимом. Первый режим может возбуждаться с помощью ряда средств, включая электромагнитные, электростатические или пьезоэлектрические. Ускорение Кориолиса, возникающее из-за угловой и линейной скоростей каждого элемента кольца, вызывает распределение в плоскости сил инерции вокруг кольца. Эти силы вызывают второй режим.

Во втором режиме движение кольца пропорционально прикладываемой угловой скорости. Движение во втором режиме может быть обнаружено емкостным, электростатическим и пьезорезистивным способами. Предлагается регистрировать движения второго режима с помощью ОТЭ, что позволит уменьшить амплитуду колебаний резонатора и получить квазилинейную характеристику.

Структурная схема одноканального оптоэлектронного преобразователя угловой скорости (рис. 1) включает в себя: источник излучения (ИИ), кольцевой резонатор (КР), модулятор на основе ОТЭ (МОТЭ), фотоприемник (ФП), электронный блок обработки (ЭБ).

Кольцевой резонатор преобразователя закреплен, например, двумя парами пьезоактюаторов (рис. 2), расположенных на осях OX (0°) и OY (90°), и имеет возможность деформироваться. Амплитуда деформационных колебаний кольцевого резонатора зависит от возбуждающего напряжения.

Возникающие под действием угловой скорости силы Кориолиса деформируют кольцевой резонатор, являясь причиной дополнительного радиального движения. Зная амплитуду радиального движения, можно определить направление и величину угловой скорости.

При воздействии высокочастотных вибраций в первом режиме кольцо принимает форму эллипса, вытянутого вдоль осей OX или OY . При наличии угловой скорости кольцо дополнительно деформируется в эллипс, вытянутый вдоль осей, расположенных под углами 45° и 135° относительно главной оси. При отсутствии угловой скорости точки кольца вдоль дополнительных осей не изменяют своего положения при высокочастотных вибрациях.

Для съема информации о радиальном движении второго режима использованы две пары считывающих оптических узлов. Эти считывающие узлы определяют величину радиального движения вдоль дополнительных осей под углом 45° и 135° . Амплитуда радиального движения пропорциональна угловой скорости вращения.

Для обеспечения возможности гальванической развязки цепей возбуждения и съема информации использован оптоэлектронный способ считывания на основе оптического туннелирования. При этом оптическое излучение от стабилизированного ИИ проходит через МОТЭ, взаимодействуя с КР, и достигает фотоприемника. Сигнал с ФП поступает на ЭБ, где преобразуется в нормированное напряжение.

Характеристики второго радиального движения кольцевого резонатора оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

При разработке систем управления летательных аппаратов необходимо использовать данные об угловой скорости, диапазон измерения которой может составлять, например, несколько сотен градусов в секунду. Значения выходного сигнала в схемах с кольцевым волновым резонатором зависит от частоты его колебаний. Частота колебаний резонатора зависит от его диаметра и толщины, а также от плотности и модуля упругости материала [4]:

$$f_n = \frac{n(n^2 - 1)}{\pi D^2 \sqrt{n^2 + 1}} \sqrt{\frac{1}{3} \frac{Eh^2}{\rho}}, \quad (1)$$

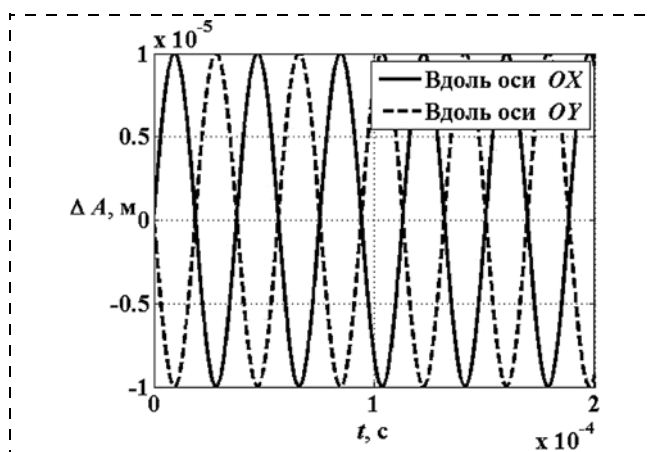


Рис. 3. Зависимость амплитуды первого движения ΔA вдоль осей OX и OY от времени

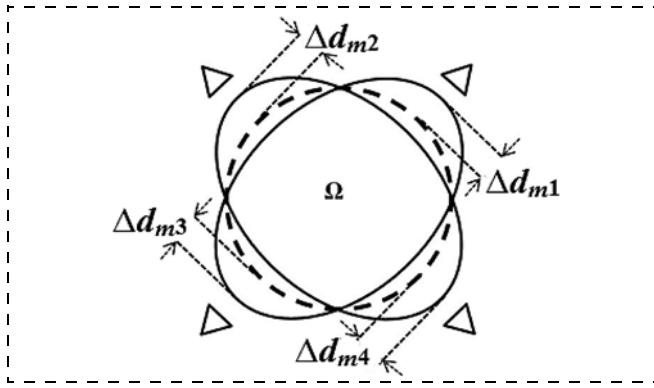


Рис. 4. Деформирование (второе движение) кольцевого преобразователя под действием угловой скорости

где E — модуль упругости (Юнга), h — толщина кольца, ρ — плотность материала, D — диаметр кольца.

Амплитуда первого радиального движения ΔA составляет около 10 мкм (рис. 3) при следующих параметрах КР: частоте возбуждающих колебаний $f = 26$ кГц, модуле упругости (Юнга) $E = 1,65 \cdot 10^{11}$ Па и плотности материала $\rho = 2330$ кг/м³.

Второе радиальное движение кольцевого резонатора зависит от угловой скорости вращения Ω , амплитуды постоянных вибраций ΔA , частоты колебаний и демпфирования γ . Амплитуда второго радиального движения может быть определена по формуле [3]

$$\Delta d_{mi}(\Omega) = \frac{2n\Omega A}{(n^2 + 1)\gamma f_n}. \quad (2)$$

С учетом зависимости частоты колебаний (1) амплитуда второго радиального движения определится как

$$\Delta d_{mi}(\Omega) = \frac{2A\pi D^2}{\gamma h(n^2 - 1)} \sqrt{\frac{3\rho}{(n^2 + 1)E}} \Omega, \quad (3)$$

где Δd_{mi} — амплитуда второго радиального движения кольцевого резонатора; γ — демпфирование; Ω — угловая скорость; ρ , h — плотность и толщина КР; D — диаметр; n — узловой диаметр; E — модуль упругости КР.

Деформирование (второе движение) кольцевого преобразователя под действием угловой скорости показано на рис. 4. Угловая скорость Ω вдоль полярной оси кольца вызывает второе радиальное движение, амплитуда которого Δd_{mi} пропорциональна амплитуде постоянных вибраций (первое движение) A и угловой скорости Ω .

При увеличении угловой скорости амплитуда второго радиального движения кольцевого резонатора увеличивается. Для съема информации об амплитуде второго радиального движения использованы две пары оптических узлов считывания, работающие в противофазе.

Исследование влияния геометрических параметров кольцевого резонатора на характеристики оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Изменяя геометрические параметры кольцевого резонатора, определим их влияние на второе радиальное движение. На рис. 5 приведены зависимости амплитуды второго радиального движения кольцевого резонатора от угловой скорости Ω при различных значениях диаметра резонатора D (рис. 5, а) и толщины резонатора h (рис. 5, б) для следующих параметров: модуль упругости (Юнга) $E = 1,65 \cdot 10^{11}$ Па, плотность материала $\rho = 2330$ кг/м³.

При уменьшении толщины h кольцевого резонатора увеличивается второе радиальное движение. Увеличение диаметра D кольцевого резонатора также приводит к увеличению второго радиального движения. Амплитуда второго радиального движения линейно зависит от угловой скорости и может достигать нескольких сотен нанометров при достаточно малых размерах кольцевого резонатора. Такие

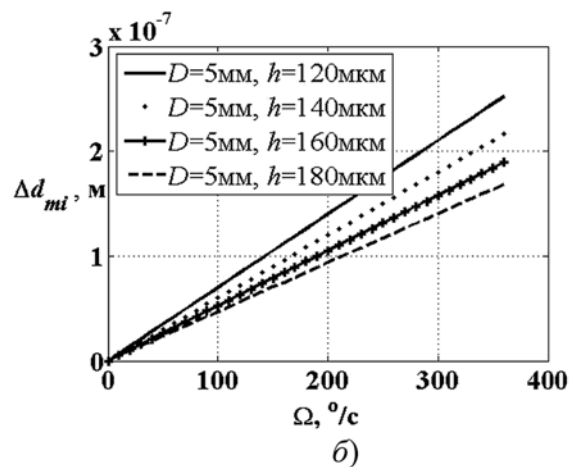
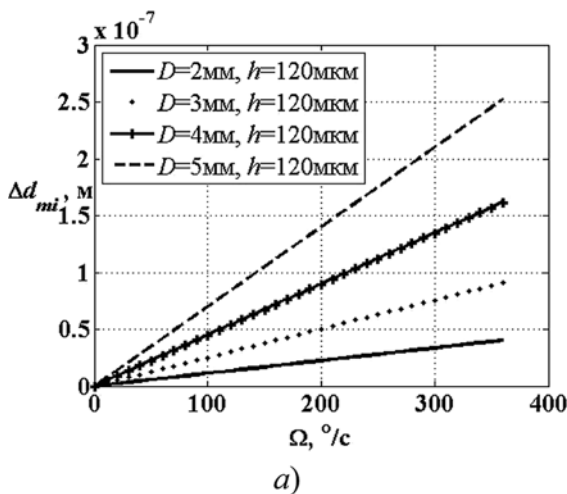


Рис. 5. Зависимость амплитуды второго радиального движения от угловой скорости при изменении диаметра (а) и толщины (б) кольцевого резонатора

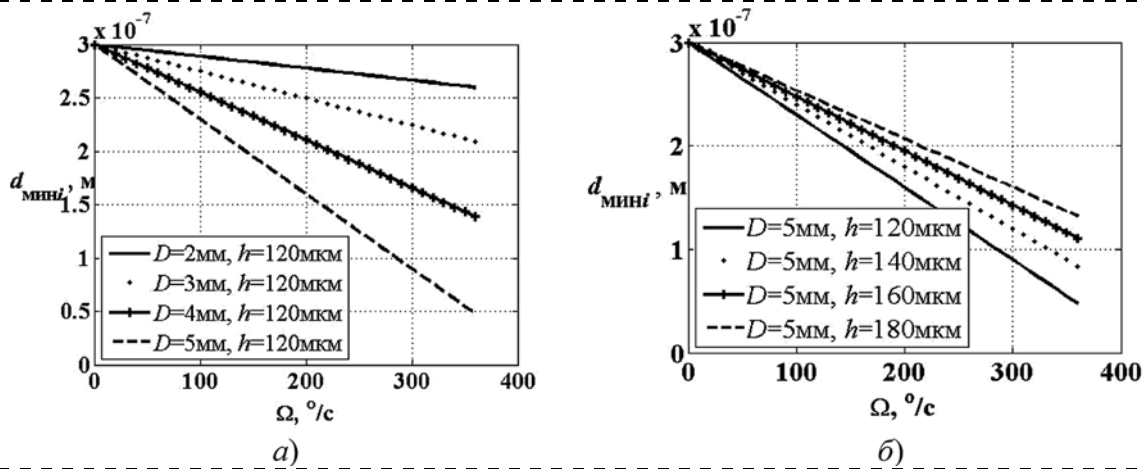


Рис. 6. Зависимость зазора от угловой скорости при изменении диаметра (а) и толщины (б) кольцевого резонатора

значения второго радиального движения соответствуют диапазону работы оптических узлов считывания информации на основе оптического туннелирования.

В общем случае зазор $d_{\text{мини}}$ между оптическим элементом считывания и кольцевым резонатором зависит от начального зазора d_0 , предусмотренного конструкцией, и второго радиального движения кольцевого резонатора $\Delta d_{\text{ми}}(t, \Omega)$, которое зависит от времени t и измеряемой угловой скорости Ω . Зазор $d_{\text{мини}} = f(t, \Omega)$ между призмой и кольцевым резонатором определяется как

$$d_{\text{мини}}(t, \Omega) = d_0 - \Delta d_{\text{ми}}(t, \Omega). \tag{4}$$

При увеличении угловой скорости амплитуда изменений зазора увеличивается, в результате чего амплитуда изменений выходной оптической мощности также увеличивается. При этом следует учитывать, что при увеличении второго радиального движения кольцевого резонатора $\Delta d_{\text{ми}}(t, \Omega)$ происходит уменьшение зазора $d_{\text{мини}}(t, \Omega)$, что приводит к уменьшению выходной оптической мощности. По амплитуде изменений выходной мощности можно измерять угловую скорость. На рис. 6 приведена

зависимость изменения зазора от угловой скорости при изменении диаметра D (рис. 6, а) и толщины резонатора h (рис. 6, б).

Изменения амплитуды второго радиального движения происходят с постоянной частотой, равной частоте возбуждающих колебаний ($f_n = 26$ кГц), и приведены на рис. 7. Под действием постоянной угловой скорости $\Omega = 360$ °/с изменение амплитуды второго радиального движения составляет около 200 нм при следующих параметрах резонатора: диаметр $D = 5$ мм, толщина $h = 160$ мкм.

Зазор кольцевого резонатора изменяется в противофазе с амплитудой второго радиального движения. При выборе начального зазора $d_0 = 300$ нм зазор $d_f(t)$ изменяется от 100 до 500 нм (рис. 8), что соответствует диапазону измерения при использовании оптического туннельного эффекта.

Таким образом, целесообразно выбирать радиус кольцевого резонатора r порядка единиц миллиметров при толщине h в сотни микрометров, что обеспечивает необходимую максимальную амплитуду второго радиального движения и зазор около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

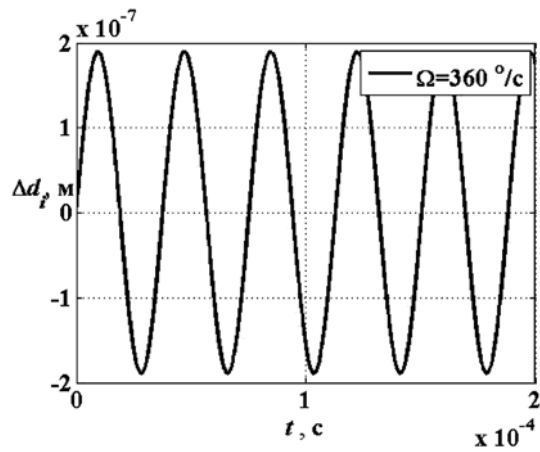


Рис. 7. Зависимость амплитуды второго радиального движения от времени при постоянной угловой скорости

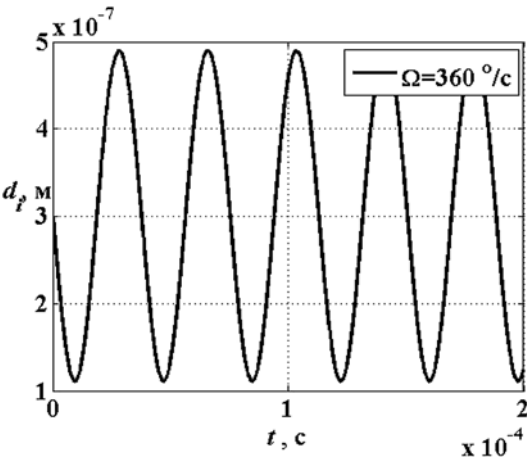


Рис. 8. Зависимость зазора от времени при постоянной угловой скорости

Функция преобразования кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Считывающие оптические узлы преобразователя угловой скорости представляют собой совокупность источников излучения, призм полного внутреннего отражения (с показателем преломления n_1), кольцевого резонатора, фотоприемников. Изменение

мощности выходного излучения каждого канала можно оценить по отражательной способности модулируемой границы сред. Отражательная способность $R_i = f[d_i(t, \Omega)]$ периодически изменяется во времени с амплитудой, зависящей от угловой скорости, в противофазе с изменением зазора $d_i(t, \Omega)$ и определяется как

$$R_i[d_i(t, \Omega)] = 0,5 \frac{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\perp} - \phi_{23\perp})}{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\perp} + \phi_{23\perp})} +$$

$$+ 0,5 \frac{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\parallel} - \phi_{23\parallel})}{\exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i(t, \Omega) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}\right) + 2\cos(\phi_{12\parallel} + \phi_{23\parallel})}, \quad (5)$$

где $\phi_{21\perp}$, $\phi_{23\perp}$, $\phi_{12\parallel}$, $\phi_{23\parallel}$ — фазы волны при отражении от раздела сред [5].

В преобразователе оптическая мощность излучения на фотоприемнике $P_{\text{ФП}}$ определяется с учетом отражательной способности в контактной оптической области модулируемой границы призмы, зависящей от изменения зазора Δd_i (рис. 9) под действием измеряемой угловой скорости. Предполагается, что зазор постоянен вдоль контактной оптической области, причем выходную оптическую мощность $P_{\text{ФП}}$ можно определить по приближенной модели, в которой расчет зазора Δd_i осуществляется по центральному лучу источника излучения как точки контакта на модулируемой границе призмы [5].

При моделировании работы считывающего оптического узла использованы следующие параметры: начальный зазор $d_0 = 300$ нм, диаметр кольца $D = 5$ мм, толщина кольца $h = 160$ мкм, показатель преломления призмы $n_1 = 1,5$; длина волны света $\lambda = 900$ нм; показатель преломления воспринимающего элемента $n_3 = 3,4$; разделительная среда — вакуум ($n_2 = 1$).

Необходимо учитывать, что при изменении угла падения светового излучения на призму изменяется отражательная способность. При увеличении угла падения светового потока отражательная способность границы раздела "призма—зазор—кольцо" увеличивается, но с увеличением отражательной способности растет нелинейность, и нужно избегать возникновения больших погрешностей.

Целесообразно выбрать минимально допустимый угол падения θ , равный приблизительно 42° , что обеспечивает малые погрешности нелинейности при угловых скоростях сотни градусов в секунду (рис. 10).

В преобразователе изменение мощности оптического излучения, падающей на фотоприемник, можно оценить по отражательной способности модулируемой границы сред, т. е. по отношению мощности отраженного излучения к мощности падаю-

щего. С учетом отражательной способности R_i , зависящей от зазора d_i , мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\} = f\{R_i[d_i(t, \Omega)], P_{\text{ИИ}}\}$ на фотоприемнике определяется как

$$P_{\text{ФП}}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\} = P_{\text{ИИ}} R_i[d_i(t, \Omega)] K_{\text{П}}, \quad (6)$$

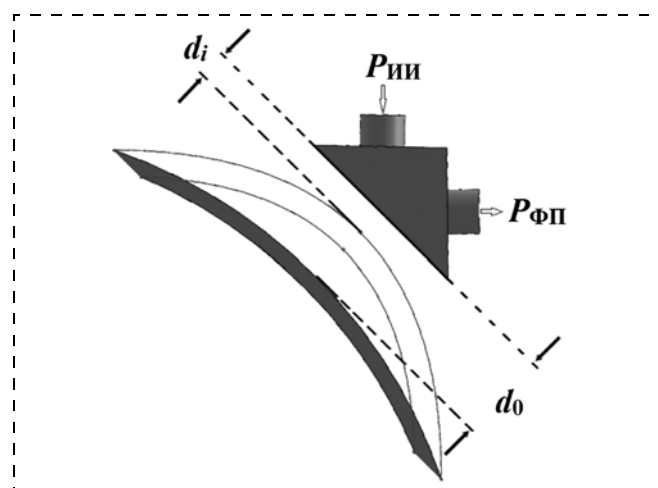


Рис. 9. Считывающий оптический узел на основе ОТЭ

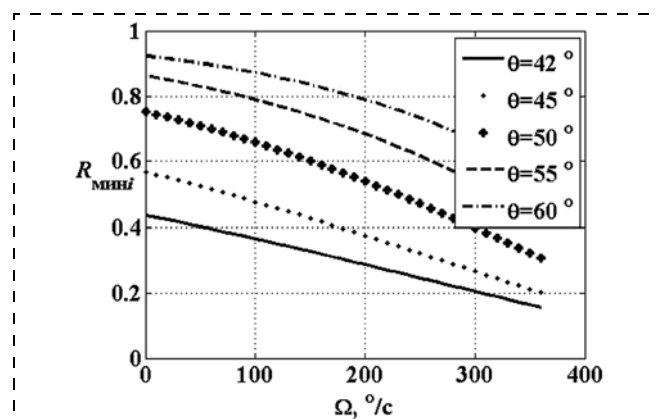


Рис. 10. Зависимость минимальных значений отражательной способности от угловой скорости при разных углах падения светового потока

где $P_{\Phi\Pi i}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\}$ — оптическая мощность на фотоприемнике; K_{Π} — суммарный коэффициент потерь; $P_{ИИ}$ — оптическая мощность источника излучения; $R_i[d_i(t, \Omega)]$ — отражательная способность модулируемой границы сред с переменным зазором d_i . На рис. 11 изображено изменение минимальных значений оптической мощности на фотоприемнике от угловой скорости при определенном угле падения.

Оптическая мощность $P_{\Phi\Pi i}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\}$ и ток фотоприемника $I_{\Phi\Pi i} = P_{\Phi\Pi i}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\}S_{\Phi\Pi i}$ изменяются в противофазе с амплитудой второго радиального движения (рис. 12). При этом оптическая

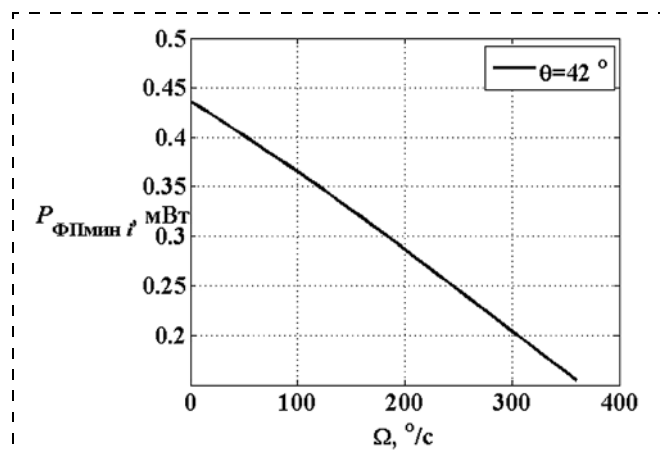


Рис. 11. Зависимость минимальных значений мощности фотоприемника от угловой скорости при выбирающем угле падения светового потока

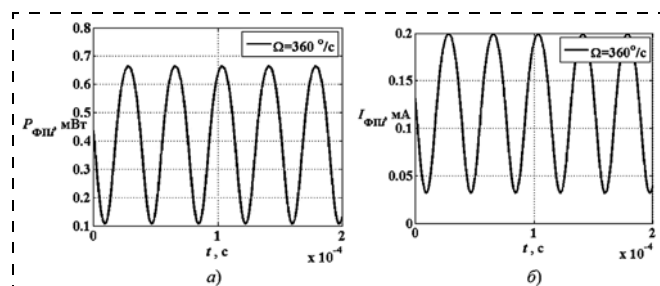


Рис. 12. Зависимость оптической мощности $P_{\Phi\Pi i}$ (а) и тока фотоприемника $I_{\Phi\Pi i}$ (б) от времени при постоянной угловой скорости

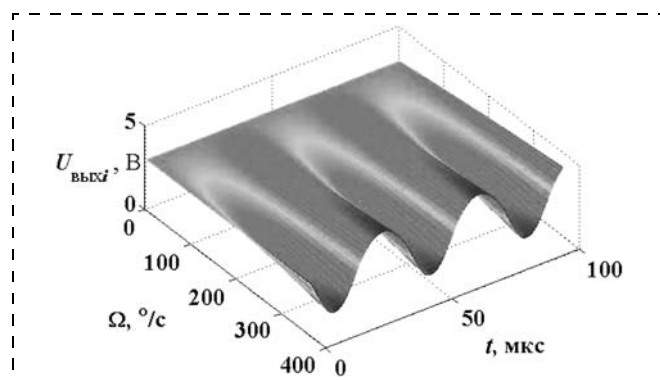


Рис. 13. Зависимость выходного напряжения i -го узла считывания преобразователя от угловой скорости и времени

мощность изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,7 мВт при постоянной угловой скорости 360 °/с.

Функция преобразования одного узла считывания кольцевого преобразователя угловой скорости определяется зависимостью выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}i} = f(P_{\Phi\Pi i}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\})$ от угловой скорости. Выходное напряжение при использовании преобразователя "ток—напряжение" на основе операционного усилителя с сопротивлением в цепи обратной связи $R_{\text{ос}}$ с учетом тока фотоприемника определяется как

$$U_{\text{ВЫХ}i} = R_{\text{ос}}(S_{\Phi\Pi}P_{\Phi\Pi i}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\} + I_{\text{T}}). \quad (7)$$

На рис. 13 изображена зависимость выходного напряжения i -го узла считывания преобразователя от угловой скорости и времени.

Выходные напряжения четных и нечетных узлов считывания изменяются в противофазе, что необходимо учитывать при формировании выходного сигнала преобразователя угловой скорости по амплитудам выходных напряжений узлов считывания и компенсации влияния линейных виброускорений.

Основные результаты

Для определения угловой скорости в бесплатформенных инерциальных навигационных системах предложено использовать кольцевой волновой преобразователь угловой скорости с узлами считывания на основе оптического туннелирования с квазилинейной функцией преобразования

Разработана функциональная схема преобразователя с четырьмя узлами считывания и исследовано влияние параметров кольцевого волнового резонатора на характеристики преобразователя угловой скорости. Определены диапазоны параметров кольцевого резонатора (диаметр КР 2...5 мм при толщине 120...180 мкм), обеспечивающие максимальную амплитуду второго радиального движения (сотни нанометров), достаточную для обеспечения измерения угловых скоростей в сотни градусов в секунду.

Исследовано влияние угла падения светового потока θ на линейность зависимости отражательной способности от угловой скорости. Определены зависимости оптической мощности фотоприемника, тока фотоприемника и выходного напряжения узлов считывания от угловой скорости.

Список литературы

1. Tirtichny A. Calculation of vibrating ring gyroscope characteristics // Proc. of International forum "Information and communication technologies and higher education — priorities of modern society development". May 26—30, 2009. P. 79—84.
2. Крекотень Ф. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры // Петербургский журнал электроники. 2011. № 1.
3. Eley R., Fox C. H. J. and William S. Mc. The dynamics of vibrating ring multi axis rate gyroscope // Journal of Mechanical Engineering Science. 2000. Vol. 214, no. 12. P. 1503—1513.
4. Irvine T. Ring vibration modes revision D. URL: <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/> January 26, 2015. 1—15 pp.
5. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Pergamon Press, Oxford, October 1986. 854 p.

Investigation of Characteristics of the Optoelectronic Ring Wave Angular Velocity Transducer

V. I. Busurin, D. Sc., Professor, vbusurin@mai.ru✉,
V. V. Korobkov, Ph. D., Associate Professor, vkor@bk.ru,
Yin Naing Win, Postgraduate Student, integratedchip.88@gmail.com,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: **Busurin Vladimir I.**, D. Sc., Professor,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation
e-mail: vbusurin@mai.ru

Received on January 27, 2015

Accepted on February 05, 2015

The article presents a research of the characteristics of the optoelectronic ring angular velocity transducer based on the optical tunneling effect. Nowadays MEMS gyroscopes are used in the aircraft control and navigation systems. A big number of MEMS angular velocity transducers, based on the properties of a vibrating element, are already available. There are several ways to evaluate sensitivity of these angular velocity transducers, including capacitive, electrostatic and piezoresistive means. The main disadvantage of these angular velocity transducers is nonlinear sensitivity. In this article those problems are solved by the research of the optoelectronic ring angular velocity transducer with the optical tunneling readout schematics, which ensures a measurement range of several hundred degrees per second. The response amplitude of a ring resonator depends on various factors, such as the diameter, type of material, radial thickness, and axial length. Reflectivity of the angular velocity transducer is changed by the initial gap, amplitude of the vibrating ring resonator and incident beam angle. The output signal is obtained by varying the amplitude of the secondary radial displacement by means of the optical tunneling. With application of a few hundred degrees per second of the angular velocity, the output sensitivity of the desired angular velocity transducer is more linear than with the use of the capacitive means. So, the desired optoelectronic ring angular velocity transducer can be used in the navigation, moving object control and trajectory tracking systems.

Keywords: ring wave resonator, optoelectronic transducer, angular velocity, optical tunneling, piezoactuator, transfer function, gap, radial displacement, sensitivity, linearity

For citation:

Busurin V. I., Korobkov V. V., Yin Naing Win. Investigation of Characteristics of the Optoelectronic Ring Wave Angular Velocity Transducer, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 340–346.

DOI: 10.17587/mau/16.340-346

References

1. **Tirtichny A.** Calculation of vibrating ring gyroscope characteristics, *Proc. of International forum "Information and communication*

technologies and higher education — priorities of modern society development", May 26–30, 2009, pp. 79–84.

2. **Crekoten F.** *Sovremennye MEMS-giroscopy i akselerometry* (Modern MEMS gyroscopes and accelerometers), St. Petersburg Journal of Electronics, 2011, no. 1 (in Russian).

3. **Eley R., Fox C. H. J., William S. Mc.** The dynamics of vibrating ring multi axis rate gyroscope, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2000, vol. 214, no. 12, pp. 1503–1513.

4. **Irvine T.** Ring vibration modes revision D, available at: <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/> January 26, 2015. 1–15 pp.

5. **Born M., Wolf E.** *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, October 1986, 854 p.

УДК 681.5.01

DOI: 10.17587/mau/17.346-353

В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, проф., pshichop@rambler.ru,

М. Ю. Медведев, д-р техн. наук, проф., medvmihal@sfedu.ru,

Южный федеральный университет, г. Таганрог

Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями¹

Рассматривается задача управления движением группы автономных подвижных объектов при их функционировании в средах со стационарными препятствиями, которая решается в рамках децентрализованной системы управления, с минимизацией обмена информацией между подвижными объектами в группе. Основной особенностью, отличающей разработанный метод от близкого ему метода потенциальных полей, является то, что подвижный объект движется в поле сил, зависящих не только от взаимного расположения объекта и препятствий, но и от дополнительных переменных. Основным отличием предлагаемого подхода от метода позиционно-траекторного управления с использованием неустойчивых режимов является способ введения неустойчивых состояний. В локальных системах управления каждого подвижного объекта используются значения собственных координат и скоростей, а также координат и скоростей только соседних объектов. Препятствия в локальных алгоритмах представляются в виде подвижных объектов, входящих в группу, что позволяет унифицировать системы управления для разнородных групп. Доказаны существование и устойчивость установившихся режимов движения. Проведенное численное моделирование подтверждает результаты синтеза и анализа.

Ключевые слова: позиционно-траекторное управление, групповое управление, подвижный объект, децентрализованное управление, репеллер

¹ Работа поддержана грантом Российского научного фонда 14-19-01533, выполняемым Южным федеральным университетом.