

Л. А. СЕВЕРОВ, В. К. ПОНОМАРЕВ, А. И. ПАНФЕРОВ, Н. А. ОВЧИННИКОВА

СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С КОЛЬЦЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Рассматриваются особенности динамики и управления колебаниями кольцевого резонатора в микромеханическом гироскопе, использующем инертные свойства упругих волн. Исследуется вариант, в котором возбуждение колебаний резонатора реализуется по схеме автогенератора с дополнительным контуром стабилизации амплитуды упругих колебаний. Для достижения требуемых динамических характеристик гироскопа предлагается использовать в измерительном канале обратную связь по скорости радиальных перемещений кольца резонатора в зоне съема показаний. Представлена методика, позволяющая получить в форме дифференциальных уравнений модель огибающих физических колебаний, которая является удобным средством исследования характеристик гироскопов прямого измерения и компенсационного типа.

Введение

В большинстве производимых в мире микромеханических датчиков (ММД) угловой скорости используются свойства инерции вибрирующих масс в поступательном или вращательном движении (гироскопы LL, RR, LR и RL типов) [1–4]. Гораздо реже реализуется схема, в которой используются инертные свойства возбуждаемой в кольцевом резонаторе стоячей волны. В настоящее время такие микромеханические гироскопы (ММГ R-типа) производит фирма Silicon Sensing (Великобритания) [5]. В России схему ММГ с кольцевым резонатором переменного сечения использует в своих разработках Лаборатория микросистем Национального исследовательского университета МИЭТ [6, 7]. Разработчики считают, что гироскопы R-типа имеют лучшие характеристики по шумам и устойчивости к вибрациям в своем классе приборов. При позиционном возбуждении резонатора, когда профиль возбуждающих резонатор радиальных сил жестко привязан к корпусу прибора и соответствует основной эллиптической форме колебаний, волновые гироскопы работают в режиме датчика угловой скорости [8–11]. В ММГ, использующих свойства инерции вибрирующих масс, существуют два вида колебаний: первичные и вторичные. Первичные колебания порождаются системой возбуждения, вторичные возникают вследствие действия сил Кориолиса при вращении основания. В общем случае собственные частоты первичных и вторичных колебаний вибрирующих масс различны. Их разность

Северов Леонид Анатольевич. Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Пономарев Валерий Константинович. Кандидат технических наук, доцент СПбГУАП.

Панферов Александр Иванович. Кандидат технических наук, доцент СПбГУАП.

Овчинникова Наталья Анатольевна. Кандидат технических наук, доцент СПбГУАП.

является параметром, существенно влияющим на важнейшие технические характеристики прибора, такие как масштабный коэффициент преобразования и рабочая полоса частот. Поэтому приходится принимать специальные меры для стабилизации разности частот или их совмещения. В волновых гироскопах такой проблемы нет, поскольку первичные и вторичные колебания имеют одну частоту. В этом проявляются преимущества волновых гироскопов перед другими типами ММГ. С другой стороны, динамика изгибных колебаний кольцевого резонатора при вращении основания описывается неоднородным дифференциальным уравнением в частных производных. При этом неоднородность уравнений определяется непрерывным действием сил возбуждающих колебания и дополнительных сил управления (если прибор работает в компенсационном режиме). Особенностью волновых гироскопов является то, что измеряемая угловая скорость входит в волновое уравнение в виде изменяющихся коэффициентов. Общего решения такого уравнения не существует. Для оценки характеристик волновых гироскопов ищут наиболее удобные формы приближенного решения волнового уравнения, позволяющие исследовать динамику главной моды колебаний и получить исходные модели для формирования систем возбуждения и управления колебаниями.

В литературе, посвященной волновым гироскопам, в основном рассматриваются приборы навигационного класса точности, а главное внимание при этом уделяется вопросам выявления причин возникновения ошибок и способам их компенсации. К датчикам угловых скоростей помимо требований по точности предъявляются и достаточно строгие требования к рабочей полосе частот и времени готовности прибора. Основная цель работы, результаты которой представлены в статье, – анализ технических характеристик микромеханического волнового гироскопа как единой микромеханической системы, содержащей механическую часть (резонатор) и электронные модули. С этих позиций рассмотрены вопросы возбуждения и управления колебаниями резонатора для достижения требуемых характеристик по чувствительности, линейности и рабочей полосе частот пропускания прибора.

Функциональная схема датчика угловой скорости

На рис. 1 приведена обобщенная функциональная схема ММД угловой скорости, в котором в качестве чувствительного элемента используется резонатор в форме кольца. Резонатор по периферии окружен восемью электродами, которые используются в попарном включении и работают в качестве емкостных датчиков радиальных перемещений кольца (электроды 1, 5, 2, 6), либо в качестве электростатических датчиков силы (силовые электроды 3, 7, 4, 8).

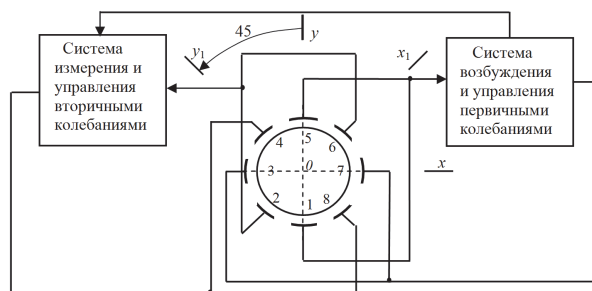


Рис. 1. Функциональная схема датчика угловой скорости

Электроды 1, 3, 5 и 7 используются в системе возбуждения первичных упругих колебаний кольца, а электроды 2, 4, 6 и 8 – для измерения и управления вторичными колебаниями.

Схемотехника системы возбуждения и управления первичными колебаниями и системы измерения и управления вторичными колебаниями зависят от выбранных способов генерации первичных колебаний и способов формирования выходных сигналов прибора. При этом может быть реализован как режим прямого преобразования, так и компенсационный режим измерения.

Физические основы появления вторичных колебаний резонатора при вращении корпуса прибора описаны в работе [10].

Уравнения динамики кольцевого резонатора

В рамках линейной теории упругости динамика кольцевого резонатора описывается уравнением в частных производных [6, 7]

$$\ddot{w}^{II} - \dot{w} + 4\Omega\dot{w}^I + 2\dot{\Omega}w^I + \xi_1(\dot{w}^{VI} + 2\dot{w}^{IV} + \dot{w}^{II}) + \chi^2(w^{VI} + 2w^{IV} + w^{II}) = f(t, \varphi) = p_B(t, \varphi) + p_K(t, \varphi), \quad (1)$$

где w – радиальные перемещения точек средней линии резонатора; $\dot{w} = \frac{dw}{dt}$;

$w^I = \frac{\partial w}{\partial \varphi}$; Ω и $\dot{\Omega}$ – измеряемая угловая скорость и скорость ее измерения;

χ^2 и ξ_1 – коэффициенты приведенных упругих и диссипативных сил кольца резонатора; p_B и p_K – приведенные силы возбуждающего и управляющего воздействий.

Если поперечное сечение кольца имеет форму квадрата, то параметры χ^2 и ξ_1 вычисляются по формулам:

$$\chi^2 = \frac{Eh^2}{12\rho R^4}, \quad \xi_1 = \frac{\xi h^2}{12\rho R^4}, \quad (2)$$

где E , ρ , ξ – модуль упругости, плотность и коэффициент вязкости материала кольца; R и h – радиус средней линии и толщина кольца.

Общее решение уравнения (1) представляется бесконечным рядом гармоник (мод колебаний), каждая из которых сохраняет свойства инертности в пространстве. Наибольший вес в радиальные перемещения точек кольца вносит вторая мода колебаний. Уравнения для второй (основной) моды колебаний, следуя методу Бубнова–Галеркина, будут иметь вид [7]

$$w(t, \varphi) = C(t)\cos 2\varphi + S(t)\sin 2\varphi, \quad (3)$$

где $C(t)$ и $S(t)$ – искомые функции времени, а φ – угловое положение точки резонатора в системе координат $Ox\varphi$.

В такой же форме зададим внешние воздействия

$$f(t, \varphi) = f_1(t)\cos 2\varphi + f_2(t)\sin 2\varphi. \quad (4)$$

Здесь $f_1(t)$ и $f_2(t)$ – в общем случае произвольные функции времени.

После вычисления частных производных выражения (3) и подстановки их в уравнение (1) с учетом выражения (4) при $\Omega = \text{const}$ будем иметь

$$5\ddot{C}(t)\cos 2\varphi + 5\ddot{S}(t)\sin 2\varphi + 8\Omega\dot{C}(t)\sin 2\varphi - 8\Omega\dot{S}(t)\cos 2\varphi + 36\xi_1\dot{C}(t)\cos 2\varphi + \\ + 36\xi_1\dot{S}(t)\sin 2\varphi + 36\chi^2 C(t)\cos 2\varphi + 36\chi^2 S(t)\sin 2\varphi = -f_1(t)\cos 2\varphi - f_2(t)\sin 2\varphi.$$

Разделяя формы колебаний, получаем два уравнения:

$$\ddot{C}(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{S}(t) + \frac{36}{5}\xi_1\dot{C}(t) + \frac{36}{5}\chi^2 C(t) = -0.2f_1(t); \\ \ddot{S}(t) + \frac{8}{5}\Omega\dot{C}(t) + \frac{36}{5}\xi_1\dot{S}(t) + \frac{36}{5}\chi^2 S(t) = -0.2f_2(t). \quad (5)$$

Первое уравнение описывает упругие колебания резонатора по осям Ox и Oy , второе – по осям Ox_1 и Oy_1 . Первые из этих осей в приборе назовем осями возбуждения первичных колебаний, а вторые – измерительными осями (осями вторичных колебаний).

При отсутствии угловой скорости уравнения (5) интегрируются независимо друг от друга. При наличии измеряемой угловой скорости уравнения оказываются связанными друг с другом возникающими силами Кориолиса.

Выражения (5) можно записать в стандартной форме:

$$\ddot{C}(t) - 1.6\Omega\dot{S}(t) + 2\zeta v\dot{C}(t) + v^2 C(t) = -0.2f_1(t); \quad (6)$$

$$\ddot{S}(t) + 1.6\Omega\dot{C}(t) + 2\zeta v\dot{S}(t) + v^2 S(t) = -0.2f_2(t), \quad (7)$$

где $v = \frac{6}{\sqrt{5}}\chi$ – собственная частота второй моды колебаний резонатора;

$\zeta = 0.6\sqrt{5}\frac{\xi_1}{\chi}$ – коэффициент колебательности.

С практической точки зрения важным является случай, когда силы $f_1(t)$ и $f_2(t)$ имеют гармонический характер. Тогда уравнения (6) и (7) будут описывать колебания такого же типа.

Уравнения (6) и (7) можно принять в качестве математической модели резонатора при анализе и проектировании ММГ как единой электромеханической системы.

Гироскоп с кольцевым резонатором является прибором модуляционного типа, в котором информационным параметром является модулирующая функция (огигающая) колебаний. Для получения уравнений, описывающих динамику огигающих вынужденных колебаний при условии равенства частоты гармонической силы возбуждения и частоты собственных колебаний резонатора, позиционные электростатические силы возбуждения и управления колебаниями зададим в форме:

$$p_B(t, \varphi) = f_{01} \cos vt \cos 2\varphi + f_{02} \sin vt \cos 2\varphi; \\ p_K(t, \varphi) = f_{K1} \cos vt \sin 2\varphi + f_{K2} \sin vt \sin 2\varphi, \quad (8)$$

где f_{01} , f_{02} , f_{K1} и f_{K2} – огигающие гармонических сил возбуждения и управления колебаниями.

Функции $C(t)$ и $S(t)$ будут иметь вид:

$$C(t) = m(t) \sin vt + a(t) \cos vt; \\ S(t) = n(t) \sin vt + b(t) \cos vt, \quad (9)$$

где $m(t)$ и $n(t)$ – синфазные; $a(t)$ и $b(t)$ – квадратурные компоненты огигающих колебаний.

Подставляя (8) и (9) в уравнение (1) и разделяя формы колебаний, получаем следующую систему уравнений для исследования динамики огибающих четырех форм колебаний ($\Omega = \text{const}$) [11–15]:

$$\begin{aligned}\ddot{a} &= \left(v^2 - \frac{36}{5} \chi^2 \right) a - 7.2 \xi_1 \dot{a} + 1.6 \Omega \dot{b} - 7.2 \xi_1 v m - 2 v \dot{m} + 1.6 \Omega v n + 0.2 f_{01}; \\ \ddot{b} &= -1.6 \Omega \dot{a} + \left(v^2 - \frac{36}{5} \chi^2 \right) b - 7.2 \xi_1 \dot{b} - 1.6 \Omega v m - 7.2 \xi_1 v n - 2 v \dot{n} + 0.2 f_{K1}; \\ \ddot{m} &= 7.2 \xi_1 v a + 2 v \dot{a} - 1.6 \Omega v b + \left(v^2 - \frac{36}{5} \chi^2 \right) m - 7.2 \xi_1 \dot{m} + 1.6 \Omega \dot{n} + 0.2 f_{02}; \\ \ddot{n} &= 1.6 \Omega v a + 7.2 \xi_1 v b + 2 v \dot{b} - 1.6 \Omega \dot{m} + \left(v^2 - \frac{36}{5} \chi^2 \right) n - 7.2 \xi_1 \dot{n} + 0.2 f_{K2}.\end{aligned}\quad (10)$$

Для установившегося режима при $f_{02} = 0$, $f_{01} = f_0$ и отсутствии сил управления колебаниями будем иметь:

$$\begin{aligned}\left(5v^2 - 36\chi^2 \right) a - 36 \xi_1 v m + 8 \Omega v n &= f_0; \\ \left(5v^2 - 36\chi^2 \right) b - 8 \Omega v m - 36 \xi_1 v n &= 0; \\ 36 \xi_1 v a - 8 \Omega v b + \left(5v^2 - 36\chi^2 \right) m &= 0; \\ 8 \Omega v a + 36 \xi_1 v b + \left(5v^2 - 36\chi^2 \right) n &= 0.\end{aligned}\quad (11)$$

Если учесть, что $5v^2 - 36\chi^2 = 0$, то $a = b = 0$;

$$m = - \frac{f_0 36 \xi_1}{v[(36 \xi_1)^2 + (8 \Omega)^2]}; \quad (12)$$

$$n = \frac{f_0 8 \Omega}{v[(36 \xi_1)^2 + (8 \Omega)^2]}. \quad (13)$$

Параметры m и n – это значения огибающих колебаний резонатора по осям первичных и вторичных колебаний в установившемся режиме. При этом абсолютные значения m и n будут представлять установившиеся амплитуды колебаний.

Полученные формульные зависимости показывают, что угловая скорость основания вызывает изменение огибающих и, следовательно, амплитуд как первичных, так и вторичных колебаний резонатора. Причем характер этих зависимостей нелинейный.

Возбуждение колебаний резонатора

Волновые колебания резонатора возбуждаются путем приложения к нему периодической силы с помощью электростатических датчиков силы (электроды 3 и 7, см. рис. 1), расположенных по оси Oy . Амплитуда возбуждаемых колебаний будет максимальной, если частота периодической силы возбуждения будет совпадать с собственной частотой колебаний кольца резонатора. Возможны два способа возбуждения, удовлетворяющих этому условию:

– возбуждение колебаний в автогенераторном режиме;

– возбуждение с помощью задающего или опорного генератора, частота которого специальной системой автоматически настраивается на собственную частоту резонанса кольца резонатора.

Второй способ реализован, например, в гироскопе корпорации Silicon Sensing [1].

Для реализации первого, более технически простого способа, в системе возбуждения организуется положительная обратная связь по скорости радиального перемещения кольца по оси θ_y резонатора [14, 15]. Значение амплитуды установившихся колебаний будет при этом ограничено максимальным значением возбуждающей силы. Максимальное использование энергетических характеристик электростатических датчиков силы будет достигаться в варианте этого способа, при котором датчики работают в релейном режиме.

Если учесть, что электростатические датчики силы, независимо от знака подаваемых на электроды напряжений, порождают только силы притяжения, то возбуждающую силу следует сформировать по закону

$$f_1(t) = \begin{cases} f_0 \operatorname{sign} \dot{C}(t) & \text{при } \dot{C}(t) > 0 \\ 0 & \text{при } \dot{C}(t) \leq 0 \end{cases}, \quad (14)$$

где f_0 – максимальное значение удельной силы возбуждения.

Эта функция может быть представлена в форме

$$f_1(t) = \frac{1}{2} f_0 \operatorname{sign} \dot{C}(t) + \frac{1}{2} f_0. \quad (15)$$

Первая (периодическая) составляющая является главной, вторая определяет постоянную силу, сжимающую кольцо. При рассмотрении вопросов возбуждения колебаний вторая составляющая во внимание не принимается, поскольку радиальные перемещения кольца, вызываемые этой силой, пренебрежимо малы по отношению к амплитуде возбуждаемых колебаний.

При $\Omega = 0$ процесс возбуждения будет описывать только первое уравнение из системы (6), (7)

$$\ddot{C}(t) + 2\zeta v \dot{C}(t) + v^2 C(t) = -0.1 f_0 \operatorname{sign} \dot{C}(t). \quad (16)$$

Для получения первого приближения решения уравнения (16), имея в виду физическую картину работы контура возбуждения, будем полагать, что электростатические датчики силы прикладывают к резонатору гармонические воздействия с частотой, равной собственной частоте колебаний кольца. При этих допущениях уравнение (16) примет вид

$$\ddot{C}(t) + 2\zeta v \dot{C}(t) + v^2 C(t) = -0.1 f_0 \sin vt.$$

Учитывая малость параметра ζ , решение этого уравнения может быть найдено в форме

$$C(t) = \frac{-0.1 f_0}{\zeta v^2} (e^{-at} - 1) \cos vt, \quad a = v\zeta = 3.6 \xi_1.$$

Амплитуда установившихся колебаний будет равна $A_c = \frac{0.1 f_0}{\zeta v^2}$.

Аналогичный результат можно получить и в случае использования уравнений (10) для огибающих колебаний резонатора.

Поскольку при реализации автогенераторного способа возбуждения колебаний возмущающая сила представляет собой не гармонический сигнал, а бинарный

ную последовательность (меандр), полученный результат следует скорректировать поправкой на форму сигнала возбуждения

$$A_c = \frac{0.1K_\phi f_0}{\zeta v^2},$$

где $K_\phi = 4/\pi$ – коэффициент первой гармоники при разложении меандра в ряд Фурье.

На рис. 2 представлен график развития физических колебаний резонатора, построенный в ходе математического моделирования его динамики по уравнению (16), на рис. 3 – график огибающей колебаний, полученный в результате численного решения системы уравнений (10). Оба графика соответствуют случаю неподвижного основания ($\Omega = 0$).

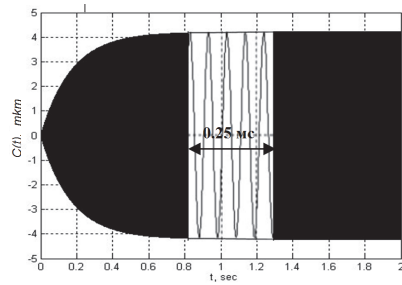


Рис. 2. Развитие физических колебаний резонатора при $\Omega=0$

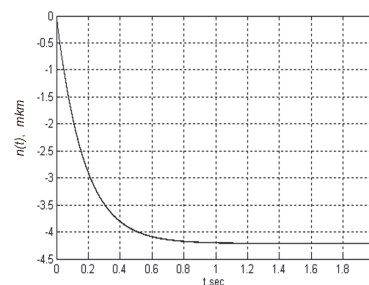


Рис. 3. График огибающей колебаний при $\Omega=0$

Моделирование проводилось для ММГ с резонатором, имеющим добротность $Q = 10000$, геометрические параметры: $h = 150 \cdot 10^{-6}$ м, $R = 3 \cdot 10^{-3}$ м и характеристики материала: $\rho = 2.3 \cdot 10^3$ кг/м³, $E = 1.87 \cdot 10^{11}$ Н/м². В центральной части графика (см. рис. 2) выделен фрагмент колебаний в увеличенном масштабе по времени.

В случае вращения основания амплитуда колебаний резонатора (12), уменьшается. Графики (рис. 4, 5) показывают характер развития колебаний и их огибающей при наличии измеряемой угловой скорости. При моделировании вход для угловой скорости основания был открыт через 1 с в целях разделения процессов возбуждения и измерения. Из результатов исследований следует, что помимо зависимости амплитуды возбуждаемых колебаний от угловой скорости основания отмечается достаточно большое время разгона, что безусловно влияет на время функциональной готовности прибора.

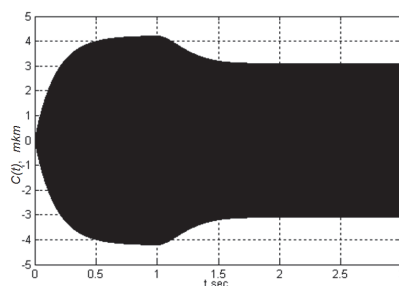


Рис. 4. Развитие физических колебаний резонатора при $\Omega=250^\circ/\text{с}$

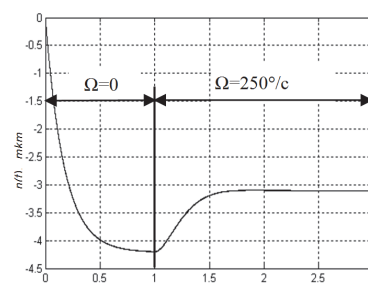


Рис. 5. График огибающей колебаний при $\Omega=250^\circ/\text{с}$

Формирование измерительного канала в датчике угловой скорости прямого измерения

Как и в других ММГ, для получения сигнала о скорости вращения основания в гироскопе с кольцевым резонатором необходимо применить операцию синхронного детектирования с опорным сигналом в контуре возбуждения колебаний. При формировании выходного сигнала в гироскопе рассматриваемого типа необходимо учитывать существенную нелинейность характеристики преобразования, что следует из формульной зависимости (13).

Используя соотношения (12) и (13), можно для установившегося режима получить $n = -m \frac{8}{36\xi_1} \Omega$.

Таким образом, если независимо от значения угловой скорости вращения основания Ω амплитуда первичных колебаний резонатора поддерживается постоянной и равной номинальному значению m_0 [7], то амплитуда вторичных колебаний будет связана с измеряемой величиной линейной зависимостью

$$n = -m_0 \frac{8}{36\xi_1} \Omega = -k_{II} \Omega,$$

где $k_{II} = m_0 \frac{8}{36\xi_1}$ – масштабный коэффициент преобразования резонатора.

Помимо линеаризации характеристики преобразования поддержание амплитуды первичных колебаний на заданном уровне позволяет существенно сократить время функциональной готовности и значительно уменьшить влияние на метрологические характеристики прибора возмущающих факторов.

На рис. 6 приведена функциональная схема одного из вариантов построения системы возбуждения и управления первичными колебаниями, в котором реализуется режим автогенераторного возбуждения [12]. Возбуждение обеспечивается цепью, в которую входит преобразователь «емкость-напряжение» (ПЕН), дифференцирующее звено, компаратор (КП) и ключевой усилитель (КУ). Входным параметром для этой цепи является емкость E датчиков радиальных перемещений кольца.

С помощью компаратора из гармонического сигнала U_w формируются однополярные прямоугольные импульсы U_n , управляющие работой ключевого усилителя, который в свою очередь подключает силовые электроды к регулируемому источнику питания СН. В контуре поддержания заданной амплитуды первичных колебаний используются амплитудный детектор (АД), фильтр низких частот (ФНЧ), суммирующий элемент, формирующий сигнал ошибки стабилизации, корректирующее звено (К), суммирующий элемент, восстанавливающий сигнал амплитуды колебаний, буферный усилитель (БУ) и регулируемый стабилизатор напряжения (СН). Напряжение U_p , являющееся выходным сигналом буферного усилителя, подается на управляющий вход стабилизатора напряжения, напряжение U_{m0} соответствует уровню стабилизируемой амплитуды первичных колебаний.

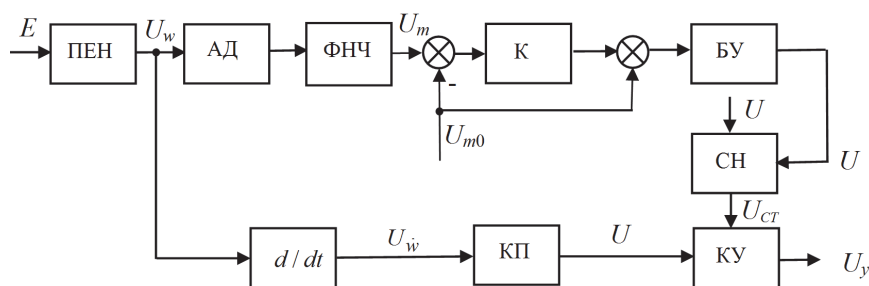


Рис. 6. Функциональная схема системы возбуждения и управления первичными колебаниями

Выбором структуры корректирующего контура обеспечиваются требуемые статические и динамические характеристики системы стабилизации заданной амплитуды колебаний.

Работоспособность схемы подтверждена в ходе математического моделирования. На рис. 7 приведены графики переходных процессов в контуре автовозбуждения колебаний резонатора при работе контура стабилизации амплитуды. На рис. 7, а – картина развития физических колебаний; на рис. 7, б выделенная амплитудным детектором и ФНЧ огибающая (амплитуду) колебаний.

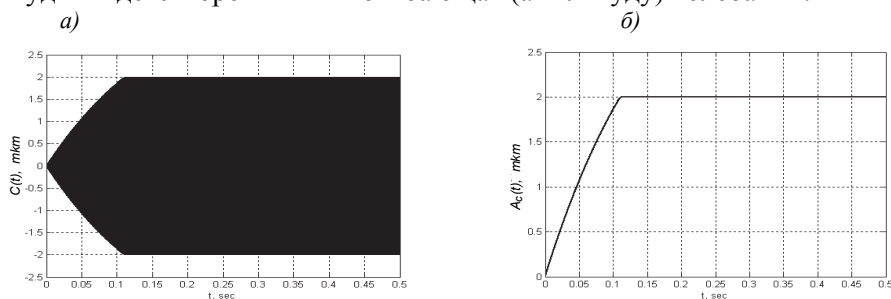


Рис. 7. Переходные процессы в контуре возбуждения при стабилизации амплитуды колебаний резонатора

Как видно, время функциональной готовности прибора существенно сокращается. Дополнительные исследования показали также существенное улучшение линейности характеристики преобразования гироскопа. На рис. 8 представлены характеристики преобразования гироскопа при отсутствии контура поддержания амплитуды возбуждаемых колебаний на заданном уровне (график S) и при его наличии (график S1).

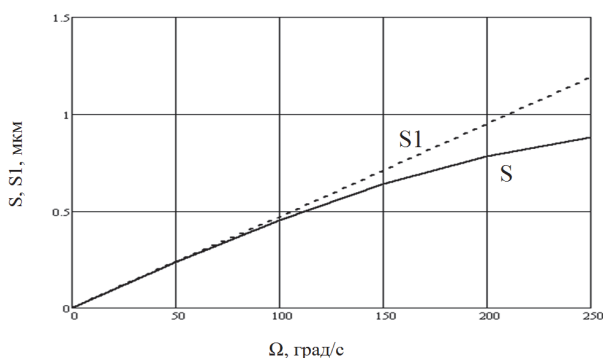


Рис. 8. Характеристики преобразования гироскопа

Линейную характеристику преобразования можно получить и с помощью операции нормировки путем деления выделенной амплитуды вторичных колебаний на амплитуду первичных колебаний

$$n_1 = \frac{n}{|m|} = \frac{8}{36\xi_1} \Omega = k_{n1} \Omega. \quad (17)$$

Если в приборе реализуется режим стабилизации амплитуды возбуждающих колебаний, то динамические характеристики измерительного канала будет описывать уравнение

$$\ddot{S}(t) + 2\zeta v \dot{S}(t) + v^2 S(t) = 1.6 A_c v \Omega(t) \sin vt, \quad (18)$$

где A_c – амплитуда первичных колебаний.

Решением этого уравнения при $\Omega(t) = \Omega = \text{const}$ будет

$$S(t) = \frac{0.8 A_c}{\zeta v} (e^{-at} - 1) \Omega \cos vt. \quad (19)$$

Как видно, огибающая колебаний изменяется по экспоненциальному закону, что дает возможность описать ее динамику апериодическим звеном

$$W_{AS}^{\Omega}(p) = \frac{\kappa_n}{(T_u p + 1)}, \quad (20)$$

где $\kappa_n = \frac{0.8 A_c}{\zeta v}$; $T_u = \frac{1}{\zeta v}$; $\zeta = \frac{1}{2Q}$, Q – добротность резонатора.

Передаточная функция (20) и соответствующая ей частотная характеристика будут определять динамические характеристики датчика угловой скорости прямого измерения и его рабочую полосу частот.

В варианте прибора с нормировкой выходного сигнала динамические характеристики могут быть установлены только в процессе модельного эксперимента, так как процедура нормировки является операцией нелинейной. В итоге динамические характеристики гироскопа будут зависеть от величины измеряемой угловой скорости. В наибольшей степени это проявляется при измерении больших угловых скоростей. Как показывают результаты аналитических исследований и моделирования, датчик угловой скорости прямого измерения имеет очень узкую рабочую полосу частот, и, значит, область его применения ограничена малоподвижными объектами.

Компенсационный режим измерения

Реализация компенсационного режима измерения позволяет существенно улучшить характеристику линейности преобразования и расширить рабочую полосу частот гироскопа.

Один из вариантов реализации компенсационного режима измерения обеспечивается формированием в контуре измерения вторичных колебаний жесткой отрицательной обратной связи по перемещению резонатора [12, 13]. В этом случае в уравнениях (10) для огибающих гармонических сил возбуждения и управления будем иметь:

$$\begin{aligned} f_{01} &= f_0 \text{sign}(\dot{a} + vm); \\ f_{K1} &= -f_K Kn; \\ f_{02} &= 0; \\ f_{K2} &= f_K Kb. \end{aligned} \quad (21)$$

В уравнениях (21)

$$f_0 = \frac{2\varepsilon_0 U_n^2 \sin 2\beta_0}{\pi d_0^2 \rho h} [\text{м/с}^2], \quad f_K = \frac{4\varepsilon_0 U_K \sin 2\beta_0}{\pi d_0^2 \rho h} [\text{м/с}^2 \text{В}],$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м]; $2\beta_0$ – угол охвата электродов; d_0 – зазор между электродами и резонатором; U_n – номинальное напряжение на электродах возбуждения; U_K – постоянная составляющая напряжения на электродах компенсации; K [В/м] – коэффициент усиления в контуре компенсации.

Воздействие f_{01} обеспечивает при малых начальных условиях формирование устойчивого автогенераторного цикла возбуждения резонатора на частоте ν . Воздействия f_{K1} и f_{K2} обеспечивают работу канала компенсационного измерения. Поскольку усилия, создаваемые силовыми электродами, имеют квадратичную зависимость от прикладываемого напряжения, для обеспечения линейности характеристики генераторов силы напряжение управления формируется в виде суммы постоянного напряжения U_K и усиленного напряжения, снимаемого с емкостных датчиков радиальных перемещений 2 и 6. Суммарное воздействие при этом содержит постоянную составляющую, гармоническую составляющую с частотой ν , которая линейно зависит от радиальных перемещений резонатора по направлению оси Ox_1 , а также гармоническую составляющую, имеющую удвоенную частоту. Вызываемые малые постоянные деформации резонатора и колебания с удвоенной частотой не оказывают заметного воздействия на основную моду колебаний. Для обеспечения работоспособности компенсационного канала измерения сигнал управления, подаваемый на силовые электроды 4 и 8, должен быть повернут по фазе на угол, равный $\pi/2$ по отношению к сигналу емкостных датчиков 2 и 6. Как следует из уравнений (10), в установившемся режиме огибающие колебаний резонатора определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} 7,2\xi_1 \nu m - 1,6\Omega \nu n &= -0,2f_0; \\ 1,6\Omega \nu m + (7,2\xi_1 \nu + 0,2f_K K n) &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\xi_1 = \frac{5\nu}{36Q}$, Q – добротность резонатора.

Из уравнения (22) находим:

$$\begin{aligned} n &= \frac{0,32f_0 \nu \Omega}{7,2\xi_1 \nu (7,2\xi_1 \nu + 0,2f_K K) + (1,6\Omega \nu)^2}; \\ m &= -\frac{0,2f_0 (7,2\xi_1 \nu + 0,2f_K K)}{7,2\xi_1 \nu (7,2\xi_1 \nu + 0,2f_K K) + (1,6\Omega \nu)^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Мерой выходного сигнала в приборе компенсационного типа служит напряжение $U_B = Kn$, подаваемое на силовые электроды контура компенсации. При больших значениях коэффициента K , как это следует из первого уравнения (23), выходной сигнал U_B стремится к значению

$$U_B = K_{II} \Omega, \quad (24)$$

в котором коэффициент преобразования $K_{II} = 0,8 \frac{U_n^2 Q}{U_K \nu} [\text{В} \cdot \text{с}]$.

Выбор значения коэффициента усиления в контуре обратной связи ограничен условиями

$$K_{\max} > K > K_{\min}. \quad (25)$$

Верхний предел при этом будет определять порог чувствительности прибора, то есть ту минимальную измеряемую угловую скорость $\Omega_{\min}$, при которой радиальные перемещения резонатора вызовут изменение емкости датчика радиальных перемещений, соизмеримое с разрешающей способностью преобразователя «емкость-напряжение».

$$C_{\min} = \frac{2\varepsilon_0 R \beta_0 L}{d_0^2} n_{\min}, \text{ где } L - \text{высота электрода.} \quad (26)$$

В современных конструкциях ММГ преобразователи «емкость-напряжение» имеют разрешающую чувствительность на уровне $C_{\min} = 10 \cdot 10^{-18} \text{ Ф}$.

Из первого уравнения (23) находим

$$K_{\max} = 0,8 \frac{U_n^2}{U_K} \cdot \frac{Q}{n_{\min}} \cdot \frac{\Omega_{\min}}{v} - 5 \frac{v^2}{f_K Q}. \quad (27)$$

Значение $K_{\min}$ ограничено допуском на нелинейность характеристики преобразования K_n . Используя выражение (23), получаем

$$K_{\min} = \frac{5}{f_K} \left(\frac{2,56}{K_n} \Omega_{\max}^2 Q - \frac{v^2}{Q} \right). \quad (28)$$

Приведенные выше формулы для расчета компенсационного режима подтверждаются результатами моделирования (рис. 9, 10), которое проводилось при близких к существующим конструктивным параметрам гироскопа $\beta_0 = 10^\circ$, $d_0 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $U_n = 5 \text{ В}$, $U_K = 2,5 \text{ В}$, $Q = 10000$ и ранее принятым.

На рис. 9 – графики переходных процессов по огибающим выходных напряжений прибора компенсационного типа при $\Omega_{\max} = 300^\circ/\text{с}$ и различных значениях коэффициента усиления K в контуре обратной связи. Переходные процессы носят апериодический характер, а установившееся выходное напряжение соответствует значению, определяемому формулой (24). При этом $K_{II} = 12 \text{ мВ}/^\circ/\text{с}$. Оценочное значение рабочей полосы частот прибора при $K = 1 \cdot 10^8$ равно 19 Гц, при $K = 3 \cdot 10^8$ – 53 Гц, при $K = 1 \cdot 10^9$ – 159 Гц.

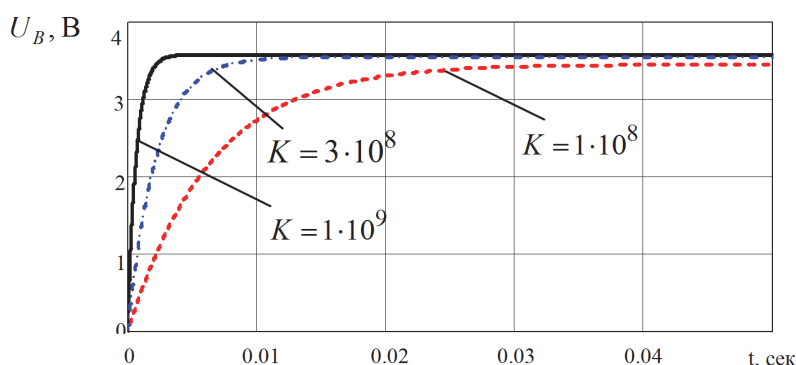


Рис. 9. Графики переходных процессов по огибающим выходных напряжений прибора компенсационного типа

На рис. 10 – график установившихся значений огибающих выходного напряжения при $K=1 \cdot 10^7$ В/м (кривая 1).

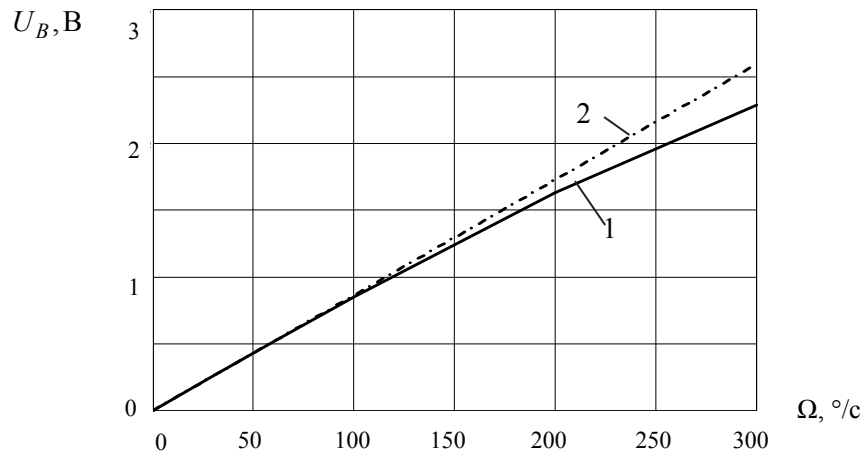


Рис. 10. График установившихся значений огибающей выходного напряжения

Кривая 2 на этом рисунке соответствует идеализированной характеристике преобразования. При максимальной измеряемой угловой скорости нелинейность измерения достигает 11%, но уже при $K=1 \cdot 10^8$ В/м нелинейность не превышает 0,5%. Отметим также, что в данном примере при больших K установившееся значение огибающей колебаний резонатора в зоне возбуждения $m \cong -0,2 \frac{f_0 Q}{v^2} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м.

Приведенный анализ показывает, что реализация компенсационного режима измерений позволяет получить датчики угловой скорости с хорошими для практики значениями масштабного коэффициента преобразования, полосы частот пропускания и линейности измерений.

Заключение

Представленные исследования показали, что датчик угловой скорости с кольцевым резонатором и позиционным возбуждением при отсутствии системы управления колебаниями обладает неудовлетворительными техническими характеристиками по линейности преобразования, рабочей полосе частот, времени готовности. Улучшение характеристик по этим показателям достигается при реализации компенсационного режима измерения. Показано, что действенной мерой улучшения линейности преобразования и уменьшения времени готовности является организация контура стабилизации амплитуды колебаний резонатора в зоне возбуждения. При этом на контур управления колебаниями в зоне съема показаний (контур компенсации) возлагается задача обеспечения требуемой рабочей полосы частот пропускания датчика.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (проект № 13-08-01016).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ayazi F., Najafi K. High Aspect-ratio Dry-Release Poly-Silicon MEMS Technology For Inertial-Grade Microgyroscopes Position Location and Navigation Symposium, San Diego, California. 2000. P 304-308.
2. Zarabadi S. A Resonating Comb/Ring Angular Rate Sensor, Delphi Delco Electronics Systems, Sensors and Actuators. 1999 (SP-1443).
3. Hopkin I. Performance and Design of Silicon Micromachined Gyro. // Symposium Gyro Technology, Germany. Сб.тр. симпозиума. Штутгарт. 1997. P. 1.0-1.10.
4. Fell C.P., Hopkin I., Townsend K., Sturland I. A Second Generation Silicon Ring Gyroscope // Symposium Gyro Technology, Germany. 1999.
5. www.siliconsensing.com.
6. Тимошенков С. П. Разработка математического описания кольцевого резонатора микрогироскопа/ С.А. Анчутин, Е.С. Кочурина, В.Е. Плеханов, С.П.Тимошенков// Нано-и микросистемная техника. – 2014 - №5 - С.18-25.
7. Патент RU 2413926.Чувствительный элемент кольцевого микромеханического гироскопа/ С.П. Тимошенков, С.А. Анчутин, В.В. Калугин – МИЭТ, ООО «ЛМС» - опубликован 10.03 2011.
8. Журавлев В.Ф., Д.М. Климов Волновой твердотельный гироскоп М.: Наука. 1985. 126 с.
9. Матвеев В.Л., Липатников В.И., Алексин А.В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа М.: МГТУ. 1998. 168 с.
10. Северов Л.А. Механика гироскопических систем. М, МАИ, 1996, 212с.
11. Severov L.A., Ponomarev V.K., Panferov A.I., Ovchinnikova N.A. (2010) Angular Velocity Sensors Based on Ring Resonator Proceedings of 2010 International Symposium on Inertial Technology and Navigation ISITN. Nanjing, China October, p. 58-66.
12. Panferov A.I., Ponomarev V.K., Severov L.A. (2011) Angular rate sensors based on the MEMS ring resonators. Proceedings 5-th International Scientific Conference on Physics and control. PhysCon., <http://lib.physcon.ru/doc?id=e21f6b87508a>.
13. Panferov A.I., Ponomarev V.K. (2012) Algorithms for Embedded Controllers in Microgyros. Proceedings of IFAC-EGNCA . Paper ID 474.
14. Severov L.A., Ponomarev V.K., Panferov A.I., Ovchinnikova N.A. (2011) Configuration and Characteristics of the Angular velocity Sensor Based on the wave Solid-state gyroscope with the Ring Resonator. 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg. State Research.Center of the Russian Federation CONCERN CSRI ELECTROPRIBOR, JSC.. pp 134-141.
15. Северов Л.А., Золотарев С.К., Овчинникова Н.А., Панферов А.И., Пономарев В.К. Информационные характеристики микромеханических гироскопов на основе кремниевой технологии микроэлектромеханических систем, 2011, 8, стр. 12-22.

Abstract. The features of dynamics and oscillation control of the ring resonator in a micromechanical gyroscope are considered. Inert properties of elastic vibrations are used in this gyro. The case when the resonator oscillations are excited according to the scheme of a self-excited oscillator with additional contour to stabilize amplitude of elastic vibrations is under study. In order to reach the required dynamic characteristics of the gyro, it is suggested that the feedback by the speed of the resonator ring radial travels in the zone, where readings are taken, be used in the measuring channel. The procedure for getting a model of envelopes of physical oscillations in the form of differential equations is presented. This model is a convenient instrument to study characteristics of direct-measurement and compensatory type gyros.

Key words: ring resonator, micromechanical gyroscope, self-excited oscillator, radial travels

Материал поступил 20.12.2013