

УДК 681.586.5

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И ЕГО КОМПЕНСАЦИЯ

© В. И. Бусурин¹, Йин Наинг Вин¹, М. А. Жеглов²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе

²АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения»,
129226, Москва, просп. Мира, 125
E-mail: vbusurin@mail.ru

Представлен анализ влияния линейного ускорения на характеристики вибрационного кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости с учётом жёсткости опор кольцевого резонатора. Предложен метод компенсации влияния линейного ускорения на характеристики преобразователя угловой скорости.

Ключевые слова: преобразователь, угловая скорость, оптический туннельный эффект, кольцевой резонатор, линейное ускорение, компенсация.

DOI: 10.15372/AUT20190314

Введение. Преобразователь угловых скоростей на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) является основным компонентом в современных малогабаритных системах управления различными подвижными объектами [1]. Качество управления значительно зависит от точности измерения угловых скоростей. В существующих МЭМС-преобразователях угловых скоростей для компенсации влияния ускорения часто используются внешние датчики ускорения [2, 3]. При этом увеличиваются размер, вес, энергопотребление и стоимость преобразователей угловых скоростей.

Цель представленной работы — исследование влияния линейного ускорения на характеристики вибрационного преобразователя угловых скоростей, созданного на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), и определение возможности компенсации, обеспечивающей измерение угловых скоростей с повышенной точностью во всём диапазоне без введения дополнительных средств измерения.

Структурная схема вибрационного кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ (рис. 1) состоит из источников излучения (ИИ), кольцевого резонатора (КР), модуляторов на основе ОТЭ (МОТЭ), фотоприёмников (ФП), электронного блока обработки (ЭБ). При вращении преобразователя относительно оси OZ возникают силы Кориолиса и линейные перемещения особых точек кольцевого резонатора, пропорциональные величинам угловых скоростей. Величины этих линейных перемещений определяются в точках 45, 135, 225 и 315°. Для получения информации об измеряемых угловых скоростях используется две пары оптических модулей на основе ОТЭ, расположенных в указанных точках.

Определение влияния линейного ускорения на смещение кольцевого резонатора преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. В преобразователе угловой скорости кольцевой резонатор с электростатическим возбуждением может поддерживаться четырьмя опорными связями. Под действием линейного ускорения координаты

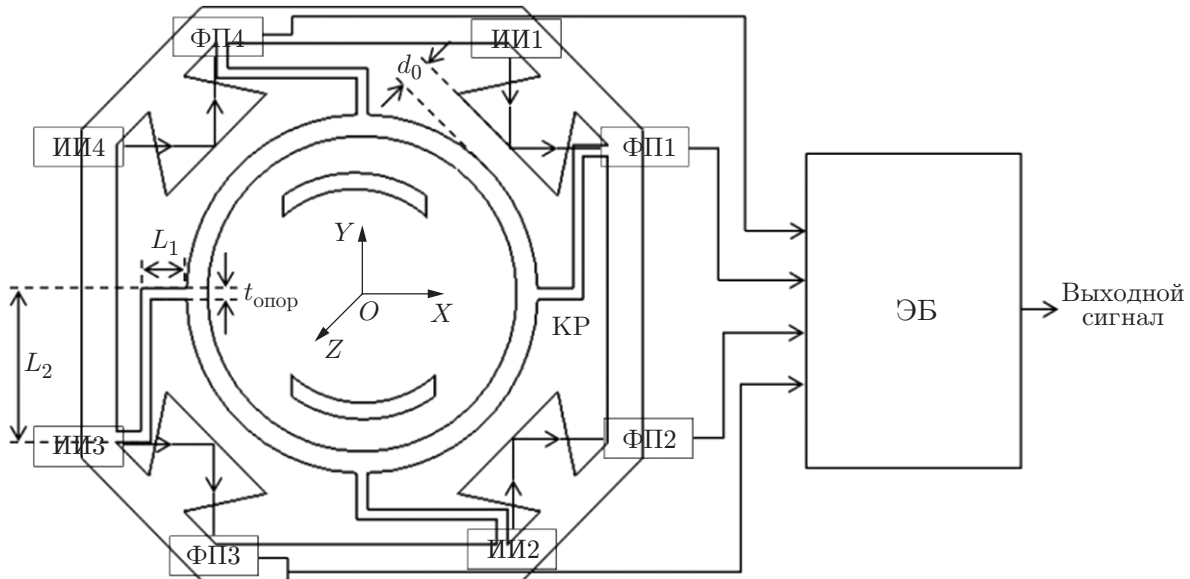


Рис. 1. Функциональная схема вибрационного кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей

кольцевого резонатора перемещаются за счёт деформации опор. При воздействии ускорения происходит смещение КР без изменения его формы, что приводит к дополнительному несимметричному изменению отражательной способности противоположащих МОТЭ. Величина смещения кольцевого резонатора под действием линейного ускорения может быть определена как

$$\Delta w_a(a) = \frac{m_{\text{КР}} a}{K},$$

где $m_{\text{КР}}$ — масса кольцевого резонатора; a — линейное ускорение; K — сумма жёсткостей опор ($K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$).

Деформации опор вызваны различными силами и не должны превышать величин, при которых возникают механический контакт и повреждение МОТЭ. При смещении КР под действием ускорения также происходит изменение чувствительности преобразователя угловой скорости, что требует дополнительной компенсации.

Деформации опор могут сильно различаться по своей геометрии и составу [4]. При воздействии линейного ускорения вдоль осей OX и OY сумма жёсткостей опор одинаковая и амплитуда смещения кольцевого резонатора от линейного ускорения на этих осях может быть определена по формуле

$$\Delta w_a(a_{X,Y}) = \frac{m_{\text{КР}} a_{X,Y}}{K_{X,Y}}, \quad (1)$$

где

$$K_{X,Y} = \frac{E h_{\text{опор}} t_{\text{опор}}^3}{2L_1^2(3L_2 + 8L_1)} + \frac{E h_{\text{опор}} t_{\text{опор}}^3}{2L_2^2(L_2 + 3L_1)};$$

E — модуль Юнга; L_1, L_2 — длины опоры; $h_{\text{опор}}, t_{\text{опор}}$ — ширина и толщина опоры.

Второе движение КР, формирующее информацию об угловой скорости, также зависит от амплитуды вибраций A и модуля упругости материала. Амплитуда второго движения

от угловых скоростей в плоскости резонатора может быть определена как [5, 6]

$$\Delta w_{\Omega}(\Omega_Z) = \frac{2n\Omega_Z A}{(n^2 + 1)\gamma f_1}, \quad (2)$$

где A — амплитуда первого движения кольцевого резонатора; γ — демпфирование; Ω_Z — угловая скорость относительно оси OZ ; f_1 — частота колебаний, зависящая от конструктивных параметров КР ($f_1 = ((n(n^2 - 1)/(\pi D^2 \sqrt{n^2 + 1}))) \sqrt{((Eh^2)/(3\rho))}$) [7, 8]; h — толщина КР, ρ — плотность материала, D — диаметр кольца.

В случае воздействия линейного ускорения величина зазора между кольцевым резонатором и призмой определяется следующим соотношением [9, 10]:

$$d_i(\Omega, a) = d_0 \pm \Delta w_{\Omega}(\Omega_Z) \pm \Delta w_a(a). \quad (3)$$

В преобразователе оптическое излучение проходит через модуль оптического туннельного эффекта, взаимодействует с КР и достигает фотоприёмника. Мощность оптического излучения $P_{\Phi\Pi}(\Omega, a) = f\{R_i[d_i(\Omega, a)], P_{\text{ИИ}}\}$ на ФП зависит от линейного ускорения и измеряемой угловой скорости, которые влияют на отражательную способность и зазор МОТЭ [11, 12]. Отражательная способность связана с величиной зазора $d_i(\Omega_Z, a)$. При сокращении зазора $d_i(\Omega_Z, a)$ уменьшается выходной сигнал фотоприёмника.

Выходные напряжения узлов считывания при использовании преобразователя ток — напряжение на основе операционного усилителя с сопротивлением в цепи обратной связи $R_{\text{ОС}}$ с учётом тока ФП запишем в виде

$$U_{I-U_i}(\Omega_Z, a_{X'}) = R_{\text{ОС}} S_{\text{ФП}} P_{\text{ИИ}} k_{\text{потерь}} R_i[d_0 \pm w_a(a_{X'}) \pm w_{\Omega}(\Omega_Z)]$$

или для каждого узла:

$$\begin{aligned} U_{I-U_1}(\Omega_Z, a_{X'}) &= K_U R_1[d_0 + w_a(a_{X'}) - w_{\Omega}(\Omega_Z)]; \\ U_{I-U_2}(\Omega_Z, a_{Y'}) &= K_U R_2[d_0 - w_a(a_{Y'}) + w_{\Omega}(\Omega_Z)]; \\ U_{I-U_3}(\Omega_Z, a_{X'}) &= K_U R_3[d_0 - w_a(a_{X'}) - w_{\Omega}(\Omega_Z)]; \\ U_{I-U_4}(\Omega_Z, a_{Y'}) &= K_U R_4[d_0 + w_a(a_{Y'}) + w_{\Omega}(\Omega_Z)], \end{aligned} \quad (4)$$

где K_U — коэффициент преобразователя тока в напряжение, $K_U = S_{\text{ФП}} k_{\text{потерь}} R_{I-U} P_{\text{ИИ}}$; $S_{\text{ФП}}$ — чувствительность ФП; $P_{\text{ИИ}}$ — оптическая мощность источника излучения; R_{I-U} — сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя преобразователя тока в напряжение; $k_{\text{потерь}}$ — коэффициент оптических потерь; $R_i[d_0 \pm w_a(a_{X'}) \pm w_{\Omega}(\Omega_Z)]$ — отражательная способность границы раздела сред.

Функция преобразования амплитуды выходного напряжения $U_{\text{вых}m} = f(\Omega_Z, a_{X'})$ преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ определяется по сигналам четырёх квазилинейных каналов и может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}m}(\Omega_Z, a_{X'}) &= \{[U_{I-U_2m}(\Omega_Z, a_{X'}) + U_{I-U_4m}(\Omega_Z, a_{X'})] - \\ &- [U_{I-U_1m}(\Omega_Z, a_{X'}) + U_{I-U_3m}(\Omega_Z, a_{X'})]\}/2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $U_{I-U_im}(\Omega_Z, a_{X'})$ — амплитуда выходного напряжения для каждого узла считывания, зависящая от угловой скорости и линейного ускорения.

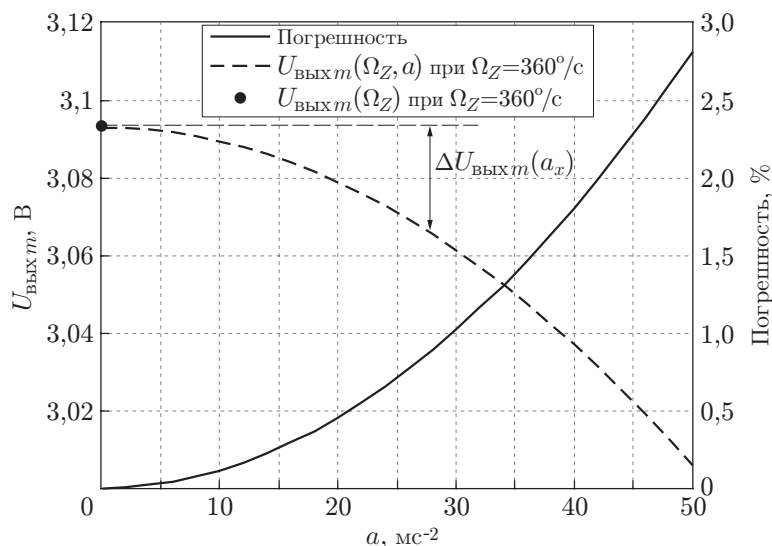


Рис. 2. Зависимости выходного напряжения и погрешности масштабного коэффициента вибрационного преобразователя угловой скорости от линейного ускорения

При воздействии линейного ускорения расчёт амплитуды выходного напряжения преобразователя угловой скорости выполнен для $h_{\text{опор}} = 105$ мкм, $t_{\text{опор}} = 100$ мкм, $\lambda = 1300$ нм, $\theta = 42^\circ$, $d_0 = 300$ нм и $P_{\text{ИИ}} = 20$ мкВт. Результаты показывают, что погрешность масштабного коэффициента от влияния ускорения по осям OX и OY составляет около 3 % при $a = 5g$ (рис. 2).

Линейное ускорение сильно влияет на выходной сигнал преобразователя угловой скорости, поэтому для получения более достоверной величины угловой скорости необходимо иметь информацию о линейном ускорении и использовать её для компенсации его влияния.

Кольцевой резонатор располагается в упругом подвесе, и все возмущающие факторы влияют на пространственное положение КР. Поэтому при воздействии линейного ускорения изменяется положение центра кольцевого резонатора. Это приводит к пространственному смещению областей оптического взаимодействия на кольцевом резонаторе относительно призм считывания. Такое смещение КР вдоль осей OX' и OY' оказывает большое влияние на положение рабочей точки на выходной характеристике.

При воздействии линейного ускорения на преобразователь все точки кольцевого резонатора смещаются в одном направлении, что приводит к несимметричному изменению зазоров $d_i(\Omega_Z, a_{X'})$ и изменению чувствительности мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}i}$ к действию угловой скорости (рис. 3, а).

При воздействии линейного ускорения вдоль оси OX' величины начальных зазоров увеличиваются для узла съёма информации МОТЭ1 и уменьшаются для узла съёма информации МОТЭ3, а при воздействии линейного ускорения вдоль оси OY' величины начальных зазоров сокращаются для узла съёма информации МОТЭ2 и возрастают для узла съёма информации МОТЭ4, что приводит к разнонаправленному изменению мощностей $P_{\text{ФП}1}$, $P_{\text{ФП}3}$ (рис. 3, б) и $P_{\text{ФП}2}$, $P_{\text{ФП}4}$. Изменение чувствительности $S_i(d) = \Delta P_{\text{ФП}i}(d_i(\Omega, a)) / \Delta d_i(\Omega, a)$ при вариациях зазора можно скомпенсировать при использовании метода дифференциальной обработки и коррекции коэффициента усиления.

Компенсация влияния линейного ускорения на кольцевой резонатор преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с помощью метода коррекции коэффициента усиления. При организации каналов считывания угловых скоростей рас-

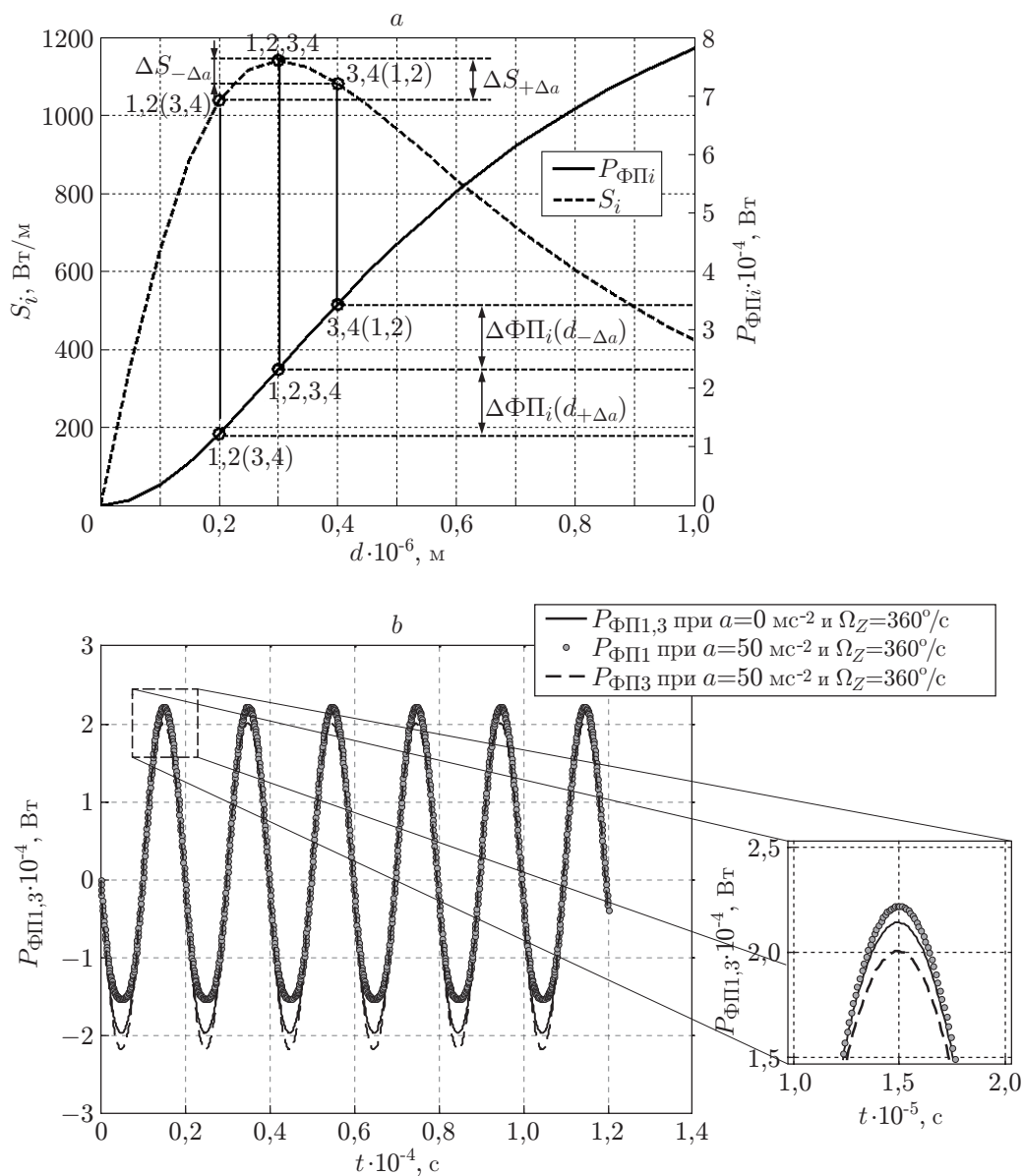


Рис. 3. Характеристики МОТЭ: зависимости мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}i_{\text{макс}}}$ и чувствительности S_i от вариаций начального зазора d (a); изменения мощностей $P_{\text{ФП}1}$ и $P_{\text{ФП}3}$ во времени при действии линейного ускорения $a_{X'}$ (b)

смаатриваемый кольцевой преобразователь работает в совместном режиме модуляции четырёх оптических сигналов, что может обеспечить учёт влияния линейного ускорения и получение квазилинейной функции преобразования. Структурная схема компенсации влияния линейного ускорения на кольцевой резонатор преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с помощью метода коррекции коэффициента усиления приведена на рис. 4. Под действием измеряемого линейного ускорения ($a_{X'}$) происходят изменения чувствительности МОТЭ1, МОТЭ2, МОТЭ3 и МОТЭ4, приводящие к уменьшению амплитуд выходных напряжений U_{I-U_1} , U_{I-U_2} , U_{I-U_3} и U_{I-U_4} , компенсируемых коррекцией коэффициента усиления. Значение коэффициента усиления зависит от линейного ускорения, определяемого выходными сигналами двух каналов (U_{I-U_1} и U_{I-U_3}).

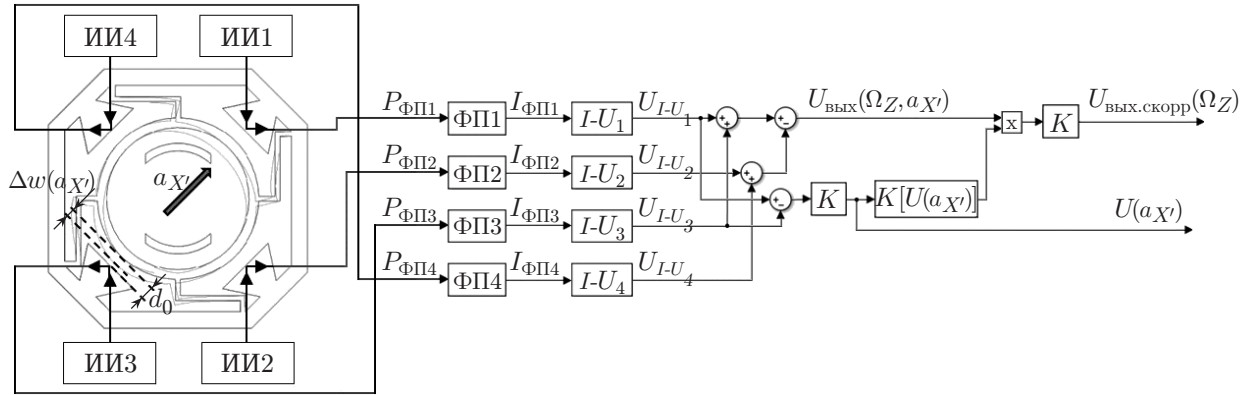


Рис. 4. Структурная схема компенсации влияния линейного ускорения на кольцевой резонатор вибрационного кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с помощью метода коррекции коэффициента усиления $K[U(a_{X'})]$

При отсутствии линейного ускорения общая функция преобразования — зависимость амплитуды выходного напряжения от угловой скорости $U_{\text{вых}m} = f(\Omega_Z)$ для кольцевого преобразователя на основе ОТЭ — представляется как

$$U_{\text{вых}m}(\Omega_Z) = K_{\Omega}\Omega_Z, \quad (6)$$

где

$$K_{\Omega} = K_U \left[\left(\frac{\Delta R_1[d_0 - w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\Delta\Omega_Z} + \frac{\Delta R_3[d_0 - w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\Delta\Omega_Z} \right) - \left(\frac{\Delta R_2[d_0 + w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\Delta\Omega_Z} + \frac{\Delta R_4[d_0 + w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\Delta\Omega_Z} \right) \right].$$

При воздействии линейного ускорения выражение для амплитуды выходного напряжения $U_{\text{вых}m} = f(\Omega_Z, a_{X'})$ запишем в виде

$$U_{\text{вых}m}(\Omega_Z, a_{X'}) = K_a a_{X'} + K_{\Omega,a}\Omega_Z, \quad (7)$$

где

$$K_a = K_U \left[\left(\frac{\partial R_1[d_0 + w_a(a_{X'}) - w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial a_{X'}} + \frac{\partial R_3[d_0 - w_a(a_{X'}) - w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial a_{X'}} \right) - \left(\frac{\partial R_2[d_0 + w_a(a_{X'}) + w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial a_{X'}} + \frac{\partial R_4[d_0 - w_a(a_{X'}) + w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial a_{X'}} \right) \right];$$

$$K_{\Omega,a} = K_U \left[\left(\frac{\partial R_1[d_0 + w_a(a_{X'}) - w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} + \frac{\partial R_3[d_0 - w_a(a_{X'}) - w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} \right) - \left(\frac{\partial R_2[d_0 + w_a(a_{X'}) + w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} + \frac{\partial R_4[d_0 - w_a(a_{X'}) + w_{\Omega}(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} \right) \right].$$

Воздействующее линейное ускорение формирует выходное напряжение $U(a_{X'})$, которое определяется сигналами двух квазилинейных каналов ($U_{I-U_1}(\Omega_Z, a_{X'}) - U_{I-U_3}(\Omega_Z, a_{X'})$) и может быть представлено в виде

$$U(a_{X'}) = [U_{I-U_1}(\Omega_Z, a_{X'}) - U_{I-U_3}(\Omega_Z, a_{X'})]/2. \quad (8)$$

Выражение для выходного напряжения $U(a_{X'})$, зависящего от линейного ускорения, будет иметь вид

$$U(a_{X'}) = K_1 a_{X'} + K_2 \Omega_Z, \quad (9)$$

где

$$K_1 = K_U \left(\frac{\partial R_1 [d_0 + w_a(a_{X'}) - w_\Omega(\Omega_Z)]}{\partial a_{X'}} - \frac{\partial R_3 [d_0 - w_a(a_{X'}) - w_\Omega(\Omega_Z)]}{\partial a_{X'}} \right);$$

$$K_2 = K_U \left(\frac{\partial R_1 [d_0 + w_a(a_{X'}) - w_\Omega(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} - \frac{\partial R_3 [d_0 - w_a(a_{X'}) - w_\Omega(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} \right).$$

При воздействии линейного ускорения скорректированные значения выходных напряжений с помощью метода коррекции коэффициента усиления определяются как

$$U_{\text{вых.корр}}(\Omega_Z, a_{X'}) = K[U(a_{X'})](K_a a_{X'} + K_{\Omega,a} \Omega_Z). \quad (10)$$

Коэффициент усиления, зависящий от линейного ускорения, запишем в виде

$$K[U(a_{X'})] = \frac{U_{\text{вых}m}(\Omega_Z)}{U_{\text{вых}m}(\Omega_Z, a_{X'})}. \quad (11)$$

При использовании уравнений (6), (7) и (9) коэффициент усиления, зависящий от выходного напряжения $U(a_{X'})$, определяемого линейным ускорением, задаётся выражением

$$K[U(a_{X'})] = \frac{K_\Omega \Omega_Z}{K_{\Omega,a} \Omega_Z + K_a (U(a_{X'}) - K_2 \Omega_Z) / K_1}. \quad (12)$$

Для различных диапазонов измерения угловых скоростей найдены зависимости изменения коэффициента усиления от выходного напряжения $U(a_{X'})$, формируемого линейным ускорением в диапазоне 0–5g, обеспечивающие уменьшение дополнительной погрешности от линейного ускорения до 0,16 %:

$$K[U(a_{X'})] = \begin{cases} 0,073\,069 (U(a_{X'}))^2 - 0,005\,8987 U(a_{X'}) + 1, & 0^\circ/\text{с} < \Omega_Z < 30^\circ/\text{с}, \\ 0,086\,279 (U(a_{X'}))^2 - 0,003\,0764 U(a_{X'}) + 1, & 30^\circ/\text{с} < \Omega_Z < 150^\circ/\text{с}, \\ 0,116\,754 (U(a_{X'}))^2 - 0,003\,6254 U(a_{X'}) + 1, & 150^\circ/\text{с} < \Omega_Z < 220^\circ/\text{с}, \\ 0,189\,843 (U(a_{X'}))^2 - 0,004\,9842 U(a_{X'}) + 1, & 220^\circ/\text{с} < \Omega_Z < 300^\circ/\text{с}, \\ 0,317\,835 (U(a_{X'}))^2 - 0,006\,8232 U(a_{X'}) + 1, & 300^\circ/\text{с} < \Omega_Z < 360^\circ/\text{с}. \end{cases} \quad (13)$$

Для обеспечения малой дополнительной погрешности масштабного коэффициента от линейного ускорения необходимо предусмотреть возможность «переключения» расчёта коэффициента усиления, выбирая для него выражение (13) в соответствии с диапазоном угловых скоростей.

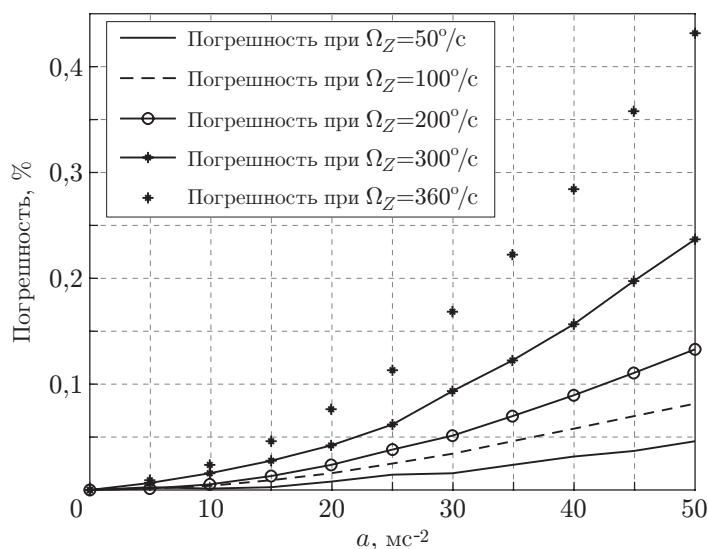


Рис. 5. Погрешности скорректированного выходного напряжения с помощью метода коррекции масштабного коэффициента

В случае применения одной аппроксимации для расчёта коэффициента усиления дополнительная погрешность масштабного коэффициента может достигать 0,9 %. При этом для получения скорректированного выходного напряжения предпочтительно использовать зависимость коэффициента усиления (13) при $\Omega_Z \in (150-220)^\circ/\text{с}$, обеспечивающую уменьшение погрешности, от линейного ускорения ($a = 0-5g$) по оси OX' до 0,45 % во всём диапазоне угловых скоростей ($0-360^\circ$) (рис. 5).

Таким образом, для получения более достоверного значения сигнала об угловой скорости при влиянии линейного ускорения на преобразователь угловых скоростей на основе ОТЭ можно использовать компенсацию с помощью метода коррекции коэффициента усиления.

Заключение. В представленной работе исследовано влияние линейного ускорения на характеристики вибрационного преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ и на смещение кольцевого резонатора с учётом жёсткости опор. Предложен метод компенсации изменения чувствительности функции преобразования МОТЭ из-за смещения кольцевого резонатора под действием линейного ускорения за счёт коррекции коэффициента усиления по дифференциальному сигналу противоположащих пар МОТЭ. Результаты моделирования компенсации влияния линейного ускорения показали, что при использовании метода коррекции коэффициента усиления погрешность от влияния ускорения (до $5g$) по осям OX и OY может быть уменьшена до 0,5 %. Применение такого метода компенсации обеспечивает расширение возможностей использования преобразователя угловых скоростей в системах управления подвижными объектами.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00108).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин В. И., Фам А. Т., Жеглов М. А., Медведев В. М. Трёхосевой микроопто-электромеханический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта // Автометрия. 2017. **53**, № 6. С. 33–41.

2. **Бусурин В. И., Коробков В. В., Йин Наинг Вин.** Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2016. **17**, № 5. С. 340–346.
3. **Миловзоров Д. Г., Ясовеев В. Х.** Математические модели преобразователей параметров наклона на основе двухосевых акселерометров // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 12–18.
4. **Косцов Э. Г.** Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики // Автометрия. 2009. **45**, № 3. С. 3–52.
5. **Nash W. A., Potter M. C.** Strength of Materials. Schaum's Outline Ser. N. Y., 2011. 200 p.
6. **Gallacher B. J., Burdess J. S., Harris A. J.** Principles of a three-axis vibrating gyroscope // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. 2001. **37**, N 4. P. 1333–1343.
7. **Gangamwar Y., Deo V., Chate S. et al.** Determination of curved beam deflection by using Castigliano's theorem // Intern. Journ. Research Emerg. Sci. Technol. 2016. **3**, Is. 5. P. 19–24.
8. **Fraden J.** Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. N. Y.: Springer-Verlag, 2010. 579 p.
9. **Бусурин В. И., Фам А. Т.** Микрооптоэлектромеханический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 124–130.
10. **Бусурин В. И., Коробков В. В., Йин Наинг Вин.** Исследование влияния параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Докл. ТУСУР. 2017. **20**, № 4. С. 43–49.
11. **Khalil H. K.** Nonlinear Systems. N. J.: Prentice Hall, 2002. 748 p.
12. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1983. 721 с.

Поступила в редакцию 13.02.2019

После доработки 01.03.2019

Принята к публикации 18.03.2019
