

УДК 681.586.5

# КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ

**В.И. Бусурин**

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4  
E-mail: [ybusurin@mai.ru](mailto:ybusurin@mai.ru)

**А.В. Казарьян**

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4  
E-mail: [kazaryan1@yandex.ru](mailto:kazaryan1@yandex.ru)

**Йин Наинг Вин**

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4  
E-mail: [integratedchip.88@gmail.com](mailto:integratedchip.88@gmail.com)

**Ключевые слова:** преобразователь угловой скорости, линейное ускорение, угловая скорость, оптический туннельный эффект, кольцевой резонатор, компенсация, переключатель, дифференциальная обработка.

**Аннотация:** В работе исследованы изменения выходного напряжения оптоэлектронного преобразователя угловой скорости, обеспечивающего измерение угловой скорости в диапазоне  $\pm 360$  °/с, которые зависят от линейного ускорения. Проведена компенсация влияния линейного ускорения на выходной сигнал преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ).

## 1. Введение

В настоящее время вибрационные преобразователи угловых скоростей на основе кольцевых резонаторов и микроэлектромеханических систем (МЭМС) широко используются в современных системах управления подвижных объектов [1, 2]. При этом качество управления существенно зависит от точности измерения угловых скоростей. В существующих МЭМС преобразователях угловых скоростей для компенсации влияния

ускорения часто используются внешние датчики ускорения [3]. При этом увеличиваются размер, вес, энергопотребление и стоимость преобразователей угловых скоростей.

В работе представлены исследования влияния линейного ускорения на характеристики преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Определены возможности компенсации влияния линейного ускорения, обеспечивающие измерение угловых скоростей с повышенной точностью во всем диапазоне измерений.

## 2. Определение влияния линейного ускорения на смещение кольцевого резонатора преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с учетом жесткости поддержек

В преобразователе угловой скорости кольцевой резонатор с электростатическим возбуждением может поддерживаться восемью полукольцевыми опорными связями [2]. Под действием линейного ускорения положение кольцевого резонатора изменяется за счет отклонения поддержек. При воздействии ускорения происходит смещение кольцевого резонатора (КР) без изменения его формы, что приводит к дополнительному несимметричному изменению отражательной способностей противоположащих модуль на основе оптического туннельного эффекта (МОТЭ). Величина смещения кольцевого резонатора под действием линейного ускорения может быть определена как:

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

где  $m_{\text{КР}}$  – масса кольцевого резонатора;  $a$  – линейное ускорение;  $K_T$  – сумма жесткостей поддержек ( $K_T = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + K_8$ ).

Деформации опор могут сильно различаться по своей геометрии и составу [4-6]. При воздействии линейного ускорения вдоль осей  $OX$  и  $OY$  сумма жесткостей опор одинаковая на оси  $OX'$  и  $OY'$  может быть определена по формуле:

$$K_{T_{X,Y}} = 0.915 \cdot \frac{E \cdot h_{\text{поддер}} \cdot t_{\text{поддер}}^3}{\pi \cdot R_{\text{поддер}}^3},$$

где  $E$  – модуль Юнга полукольцевой поддержки;  $R_1$  – радиус поддержки;  $h_{\text{поддер}}$ ,  $t_{\text{поддер}}$  – ширина и толщина полукольцевой поддержки.

Амплитуда второго движения КР, формирующая информацию об угловой скорости, «в плоскости» может быть определена как [7, 8]:

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

где  $A$  – амплитуда первого движения кольцевого резонатора;  $\gamma$  – демпфирование;  $\Omega_Z$  – угловая скорость;  $f_1$  – частота колебаний, зависящая от конструктивных параметров КР ( $f_1 = ((n \cdot (n^2 - 1)) / (\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{(n^2 + 1)})) \cdot \sqrt{((E \cdot h^2) / (3 \cdot \rho))}$ );  $E$  – модуль упругости (Юнга),  $h$  – толщина КР,  $\rho$  – плотность материала,  $D$  – диаметр кольца.

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

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

В преобразователе оптическое излучение проходит через МОТЭ, взаимодействуя с КР, и достигает фотоприемника. Мощность оптического излучения  $P_{\text{ФП}}(\Omega, a) = f\{R_i[d_i(\Omega, a)], P_{\text{ИИ}}\}$  на фотоприемнике зависит от линейного ускорения и измеряемой угловой скорости, которые влияют на отражательные способности и зазоры МОТЭ [10, 11]. Отражательная способность связана с величиной зазора  $d_i(\Omega_Z, a)$ . При уменьшении зазора  $d_i(\Omega_Z, a)$  уменьшается выходной сигнал фотоприемника.

Выходные напряжения узлов считывания при использовании преобразователя «ток-напряжение» на основе операционного усилителя с сопротивлением в цепи обратной связи  $R_{oc}$  с учетом тока фотоприемника запишем в виде:

$$U_{1-U_i}(\Omega_Z, a_{X'}) = R_{oc} \cdot S_{ФП} \cdot P_{ИИ} \cdot k_{потерь} \cdot R_i [d_0 \pm w_a(a_{X'}) \pm w_\Omega(\Omega_Z)]$$

Или для каждого узла:

$$U_{1-U_1}(\Omega_Z, a_{X'}) = K_U \cdot R_1 [d_0 + w_a(a_{X'}) - w_\Omega(\Omega_Z)],$$

$$U_{1-U_2}(\Omega_Z, a_{Y'}) = K_U \cdot R_2 [d_0 - w_a(a_{Y'}) + w_\Omega(\Omega_Z)],$$

$$U_{1-U_3}(\Omega_Z, a_{X'}) = K_U \cdot R_3 [d_0 - w_a(a_{X'}) - w_\Omega(\Omega_Z)],$$

$$U_{1-U_4}(\Omega_Z, a_{Y'}) = K_U \cdot R_4 [d_0 + w_a(a_{Y'}) + w_\Omega(\Omega_Z)],$$

где  $K_U$  – коэффициент преобразования преобразователя «ток-напряжение»,  $K_U = S_{ФП} \cdot k_{потерь} \cdot R_{1-U} \cdot P_{ИИ}$ ,  $S_{ФП}$  – чувствительность ФП;  $P_{ИИ}$  – оптическая мощность источника излучения;  $R_{1-U}$  – сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя преобразователя «ток-напряжение»;  $k_{потерь}$  – коэффициент оптических потерь;  $R_i [d_0 \pm \Delta w_a(a_{X'}) \pm \Delta w_\Omega(\Omega_Z)]$  – отражательная способность границы раздела сред.

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

$$U_{Выхm}(\Omega_Z, a_{X'}) = \frac{[U_{1-U_2m}(\Omega_Z, a_{X'}) + U_{1-U_4m}(\Omega_Z, a_{X'})] - [U_{1-U_1m}(\Omega_Z, a_{X'}) + U_{1-U_3m}(\Omega_Z, a_{X'})]}{2},$$

где  $U_{1-U_{im}}(\Omega_Z, a_{X'})$  – амплитуда выходного напряжения для  $i$ -го узла считывания, зависящая от угловой скорости и линейного ускорения.

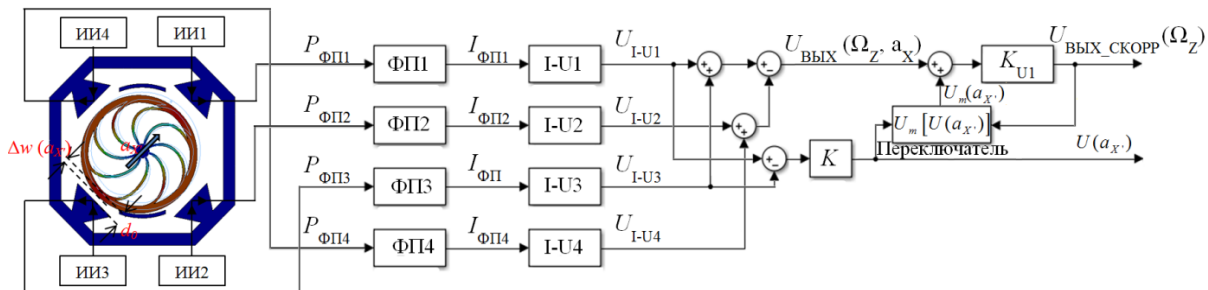
Кольцевой резонатор располагается в упругом подвесе, и все возмущающие факторы влияют на пространственное положение КР. Поэтому при воздействии линейного ускорения изменяется положение центра кольцевого резонатора. Это приводит к пространственному смещению областей оптического взаимодействия на кольцевом резонаторе относительно призм считывания.

При воздействии линейного ускорения расчет амплитуды выходного напряжения преобразователя угловой скорости выполнен для  $h_{опор} = 105$  мкм,  $t_{опор} = 100$  мкм,  $\lambda = 1600$  нм,  $\theta = 42^\circ$ ,  $d_0 = 300$  нм и  $P_{ИИ} = 2$  мВт. Результаты показывают, что погрешность от влияния ускорения по осям  $OX'$  и  $OY'$  составляет около 5% при  $a = 5g$ .

### 3. Компенсация влияния линейного ускорения на кольцевой резонатор преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ по методу дифференциальной обработки и переключения

Микро-оптоэлектронный кольцевой преобразователь угловой скорости использует оптический способ съема информации, использующий четыре пары считывающих МОТЭ с переменным зазором между призмой и КР. При организации каналов считывания угловых скоростей, рассматриваемый кольцевой преобразователь работает в совместном режиме модуляции четырех оптических сигналов, что может обеспечить учет влияния линейного ускорения и получение квазилинейной функции преобразования. Структурная схема компенсации влияния линейного ускорения на кольцевой резонатор преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ по методу дифференциальной обработки и переключения диапазонов приведена на рис. 1. Под действием измеряемого линейного ускорения ( $a_{X'}$ ) происходят изменения чувствительности МОТЭ1, МОТЭ2, МОТЭ3 и МОТЭ4, приводящие к уменьшению амплитуд выходных напряжений  $U_{1-U_1}$ ,  $U_{1-U_2}$ ,  $U_{1-U_3}$  и  $U_{1-U_4}$ . Уменьшение амплитуд выходных напряжений компенсируется методом дифференциальной обработки и управления выбором выражения для определе-

ния корректирующего сигнала с помощью переключателя. Значение выходного напряжения переключателя зависит от линейного ускорения, определяемого по выходным сигналам каналов  $U_{I-U1}$  и  $U_{I-U3}$  (для оси  $OX'$ ) и каналов  $U_{I-U2}$  и  $U_{I-U4}$  (для оси  $OY'$ ).



**Рис. 1.** Структурная схема компенсации влияния линейного ускорения на кольцевой резонатор преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ по методу дифференциальной обработки и переключения.

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

$$(1) \quad U_{ВЫХm}(\Omega_Z) = K_{\Omega} \cdot \Omega_Z,$$

где  $K_{\Omega}$  – коэффициент преобразования преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ.

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

$$(2) \quad U_{ВЫХm}(\Omega_Z, a_{X'}) = K_a \cdot a_{X'} + K_{\Omega \cdot a} \cdot \Omega_Z,$$

где  $K_a$ ,  $K_{\Omega \cdot a}$  – коэффициенты преобразования линейного ускорения и угловой скорости соответственно.

Воздействующее линейное ускорение формирует, например, для оси  $OX'$ , выходное напряжение  $U(a_{X'})$ , которое определяется сигналами двух каналов ( $U_{I-U1}(\Omega_Z, a_{X'})$  –  $U_{I-U3}(\Omega_Z, a_{X'})$ ) и может быть представлено в виде:

$$U(a_{X'}) = \frac{[U_{I-U1}(\Omega_Z, a_{X'}) - U_{I-U3}(\Omega_Z, a_{X'})]}{2}.$$

Выражение для выходного напряжения  $U(a_{X'})$ , зависящего от линейного ускорения, запишем в виде:

$$(3) \quad U(a_{X'}) = K_1 \cdot a_{X'} + K_2 \cdot \Omega_Z,$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты канала формирования сигнала линейного ускорения.

При воздействии линейного ускорения скорректированные значения выходных напряжений по методу дифференциальной обработки переключателя определяются как:

$$U_{ВЫХ\_СКОРР}(\Omega_Z, a_{X'}) = (K_a \cdot a_{X'} + K_{\Omega} \cdot \Omega_Z) + U_m[U(a_{X'})].$$

Выходное напряжение переключателя, зависящее от линейного ускорения, запишем в виде:

$$U_m[U(a_{X'})] = U_{ВЫХ}(\Omega_Z) - [K_{\Omega} \cdot \Omega_Z + K_a \cdot a_{X'}].$$

С учетом уравнений (1)-(3) выходное напряжение переключателя, зависящее от выходного напряжения измеряемого линейного ускорения  $U(a_{X'})$ , запишем в виде:

$$U_m[U(a_{X'})] = U_{ВЫХ}(\Omega_Z) - \left[ K_{\Omega} \cdot \Omega_Z + K_a \cdot \left( \frac{U(a_{X'}) - K_2 \cdot \Omega_Z}{K_1} \right) \right].$$

Для формирования скорректированного значения выходного сигнала преобразователя угловых скоростей выходное напряжение переключателя  $U_m[U(a_{X'})]$  определяется по различным выражениям для диапазонов угловых скоростей. Количество диапазонов измерения зависит от требуемой точности преобразования. Так, для обеспечения до-

полнительной погрешности из-за влияния ускорения до  $5g$  по оси  $OX'$  не более 0,5% необходимо предусмотреть десять диапазонов, в каждом из которых выходное напряжение переключателя  $U_m[U(a_{X'})]$  определяется по своему выражению.

## 4. Заключение

Исследовано влияние линейного ускорения на кольцевой резонатор преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с учетом жесткости поддержек. Предложен метод компенсации изменения чувствительности функции преобразования МОТЭ из-за смещения кольцевого резонатора от линейного ускорения за счет дифференциальной обработки и управления формированием корректирующего сигнала с помощью переключателя. Количество диапазонов переключателя зависит от требуемой точности преобразователя угловой скорости, максимального значения линейного ускорения.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-08-00108-а).

## Список литературы

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., Vas T., Sparks D., Johnson J., Jiang Q., Chia M., Borzabadi E. A Resonating Comb/Ring Angular Rate Sensor Vacuum Packaged Via Wafer Bonding // Delphi Delco Electronics Systems. Sensors and Actuators. 1999 (SP-1443). 4 p..
3. Liu K., Zhang W., Chen W., et al., The development of micro-gyroscope technology // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2009 No. 19. . P. 1-29.
4. Gangamwar Y., Chate S., Bhandare M., Deo V., Deshpande H.N. Analytical, Experimental Determination of Deflection of Curved Beams and its Validation // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5, No. 6. P. 11010-11017.
5. Dahlberg T. Procedure to calculate deflections of curved beams // Int. J. Engng Ed. 2004. Vol. 20, No. 3. P. 503-513.
6. Gere J.M., Timoshenko S.P. Mechanics of Materials. Boston, MA: PWS Publishing Company, 1997. ISBN 0-534-93429-3.
7. Gallacher B.J., Burdess J.S., Harris A.J., Principles of a Three-Axis Vibrating Gyroscope // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2001. Vol. 37, No. 4. P. 1333-1343.
8. Бусурин В.И., В.В. Коробков, Йин Наинг Вин. Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2016. Т. 17. № 5. С. 340–346.
9. Бусурин В.И., Коробков В.В., Йин Наинг Вин. Исследование влияния параметров кольцевого резонатора на характеристики трех осевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 4. С. 43-49.
10. Khalil H.K. Nonlinear systems / 3rd Edition. Upper Saddle: River Prentice Hall, 2002. 748 p.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1983. 721 с.