

УДК 681.586.5

## ТРЕХОСЕВОЙ МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА\*

В. И. Бусурин<sup>1</sup>, А. Т. Фам<sup>1</sup>, М. А. Жеглов<sup>2</sup>, В. М. Медведев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт,

125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения»,

129226, Москва, просп. Мира, 125

E-mail: vbusurin@mail.ru

Разработана модель трёхосевого микрооптоэлектромеханического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей, построенная на основе оптического туннельного эффекта. Определена функция преобразования и оценено влияние дестабилизирующих факторов на характеристики трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей. Рассчитан его динамический диапазон на основе оптического туннельного эффекта.

*Ключевые слова:* трёхосевой МОЭМ-преобразователь, туннельный эффект, угловая скорость, минимальная детектируемая величина, шумы, динамический диапазон.

DOI: 10.15372/AUT20170604

**Введение.** Микроэлектромеханические гироскопы, в частности микрооптоэлектромеханические (МОЭМ) преобразователи угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), по сравнению с традиционным механическим гироскопом имеют более высокую чувствительность к малым перемещениям, меньшие массогабаритные показатели, низкий уровень энергопотребления, что обуславливает их широкое производство и применение во многих странах с развитой технологией приборостроения (США, Россия, Япония, Германия, Корея, Швеция и др.) [1–3].

В МОЭМ-преобразователе угловых скоростей на основе ОТЭ возбуждение рабочего режима происходит с помощью электрических сигналов и пьезоэлектрических свойств используемых материалов чувствительного элемента (ЧЭ). При этом первичные выходные электрические сигналы являются маломощными и подвержены дестабилизирующему влиянию различных факторов, что объясняет значительные погрешности. Для их уменьшения можно использовать схему двухканального считывания оптических сигналов, обеспечивающую квазилинейную функцию преобразования (нелинейность до 4 %, погрешности 3 %) [4, 5].

Цель данной работы — показать возможности одновременного измерения трёх составляющих угловой скорости подвижных объектов с помощью МОЭМ-преобразователя. Предлагается модель трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ, обеспечивающего квазилинейную функцию преобразования с применением схемы двухканального считывания оптических сигналов по каждой из осей измерения и канала частичного контроля работоспособности. Определены влияние дестабилизирующих факторов на основные характеристики и динамический диапазон трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловой скорости на основе ОТЭ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00447-а).

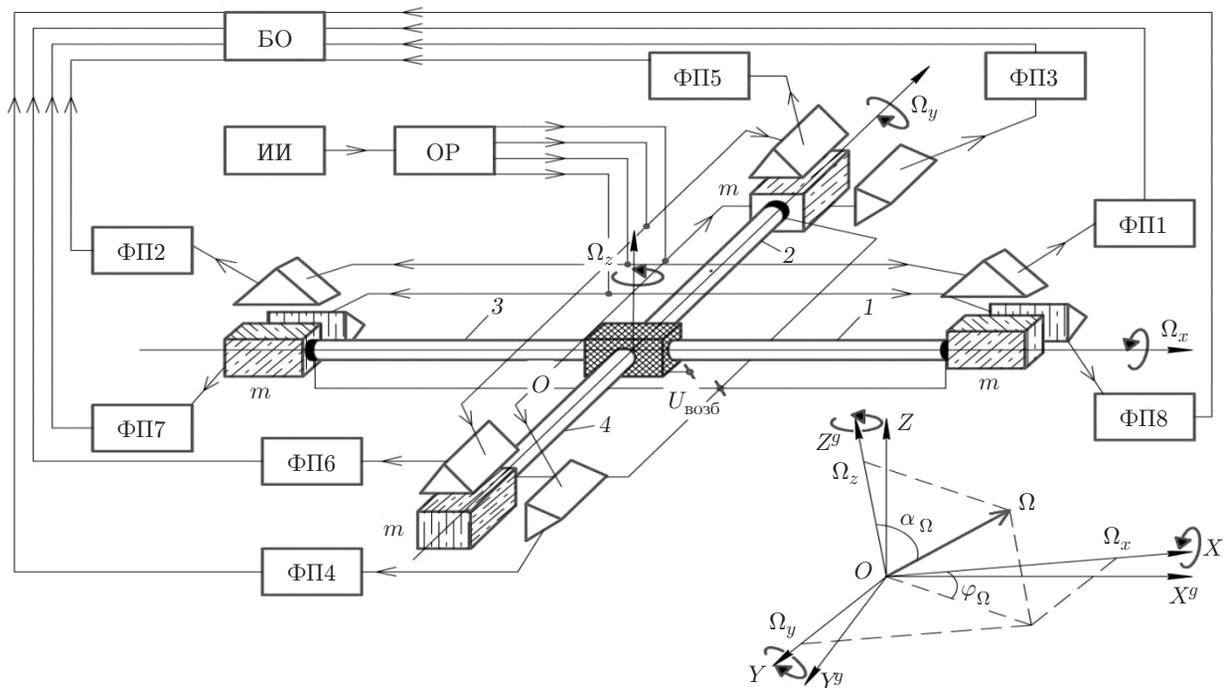


Рис. 1. Функциональная схема трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с двумя каналами считывания выходных оптических сигналов по каждой оси

**Математическая модель трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.** Исследуемый трёхосевой МОЭМ-преобразователь угловых скоростей (рис. 1) состоит из источника излучения (ИИ), оптического разветвителя (ОР), оптических узлов (ОУ) полного внутреннего отражения, ЧЭ в виде четырёхлучевого элемента из пьезокерамики ЦТС-19 с дополнительными массами  $m$ . Четыре луча (1–4) ЧЭ, закреплённые посередине, изготовлены в форме круглого сечения для обеспечения равномерной чувствительности по трём осям [6, 7]. При возбуждении напряжением  $U_{\text{возб}}$  вибраторный ЧЭ отклоняется за счёт сил Кориолиса, которые пропорциональны измеряемой угловой скорости  $\Omega$ . На концах каждого луча ЧЭ наблюдаются максимальные отклонения  $w(\Omega)$ , которые приводят к изменениям отражательных способностей  $R_{\text{ФП}}(\Omega)$  границы раздела сред ОУ — воздух — ЧЭ, регистрируемым с помощью восьми фотоприёмников (ФП1–ФП8). На выходе блока обработки (БО) формируются значения выходных напряжений  $U_{\text{вых}}(\Omega)$ , соответствующие измеряемым угловым скоростям по трём осям системы  $OXYZ$ . Изменение направления вращения приводит к смене фазы выходного сигнала на  $\pi$  [8].

Предполагается, что центры недеформируемых дополнительных масс располагаются в их геометрических центрах на расстоянии  $l/2$  от точки  $O$ , жёстко соединённой с корпусом МОЭМ-преобразователя угловых скоростей.

Для определения текущего отклонения ЧЭ введём обозначения:  $OX^gY^gZ^g$  — неподвижная система координат, связанная с Землёй с начальным отсчётом  $O$  (центр масс МОЭМ-преобразователя),  $OXYZ$  — система координат, связанная с корпусом МОЭМ-преобразователя угловых скоростей. При этом проекции величины измеряемой угловой скорости по трём осям связанной системы координат  $OXYZ$  представлены в виде

$$\Omega_x = |\Omega| \sin \alpha_\Omega \cdot \cos \varphi_\Omega; \quad \Omega_y = |\Omega| \sin \alpha_\Omega \cdot \sin \varphi_\Omega; \quad \Omega_z = |\Omega| \cos \alpha_\Omega, \quad (1)$$

где  $\alpha_\Omega = \arctg \left( \sqrt{(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)/\Omega_z^2} \right)$ ,  $\varphi_\Omega = \arctg(\Omega_y/\Omega_x)$ ,  $|\Omega| = \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}$  — зенитный,

азимутальный углы ( $0 \leq \alpha_\Omega \leq 180^\circ$ ,  $0 \leq \varphi_\Omega \leq 360^\circ$ ) и модуль вектора угловой скорости  $\Omega$  соответственно.

При наличии измеряемой угловой скорости  $\Omega = [\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]^T$  (Т — транспонирование матрицы) отклонения конца лучей 1–4  $\mathbf{w}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$  чувствительного элемента МОЭМ-преобразователя за счёт эффекта Кориолиса относительно  $OXYZ$  могут быть записаны в виде [9]

$$\mathbf{w}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = \iint \frac{\mathbf{M}_K^{ik} \{ \mathbf{F}_K^{ik}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) \}}{E J_{\text{и}}} d\zeta^2 + C_{ik}\zeta + D_{ik} \Big|_{\zeta=l/2, i=1, \dots, 4, k=1, \dots, 3}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{M}_K^{ik} \{ \mathbf{F}_K^{ik}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) \}$  — моменты сил Кориолиса  $\mathbf{F}_K^{ik}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ , действующие на  $i$ -луче ЧЭ по  $k$ -оси связанной системы координат (1 —  $OX$ , 2 —  $OY$ , 3 —  $OZ$ );  $E$ ,  $J_{\text{и}}$  — модуль упругости и осевой момент инерции ЧЭ;  $C_{ik}$ ,  $D_{ik}$  — постоянные интегрирования, зависящие от граничных условий (для нашего варианта  $C_{ik} = 0$ ,  $D_{ik} = 0$ ).

При малых отклонениях концов четырёхлучевого ЧЭ  $\mathbf{F}_K^{11}(\Omega_x) = \mathbf{F}_K^{22}(\Omega_y) = \mathbf{F}_K^{33}(\Omega_z) = \mathbf{F}_K^{42}(\Omega_y) = 0$ ,  $\mathbf{F}_K^{12}(\Omega_z) = -\mathbf{F}_K^{32}(\Omega_z)$ ,  $\mathbf{F}_K^{13}(\Omega_y) = -\mathbf{F}_K^{33}(\Omega_y)$ ,  $\mathbf{F}_K^{41}(\Omega_z) = -\mathbf{F}_K^{21}(\Omega_z)$ ,  $\mathbf{F}_K^{43}(\Omega_x) = -\mathbf{F}_K^{23}(\Omega_x)$ . При интегрировании уравнения (2) получено с учётом [9] следующее выражение:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) &= \left[ w_1(\Omega_y) \ w_2(\Omega_y) \ w_3(\Omega_z) \ w_4(\Omega_z) \ w_5(\Omega_x) \ w_6(\Omega_x) \ w_7(\Omega_z) \ w_8(\Omega_z) \right]^T = \\ &= \frac{\pi \omega \rho d_{\text{обр}} U_{\text{возб}} m l^3}{E r^2} \left( \frac{l}{80} + \frac{m}{2\pi \rho r^2} \right) \left[ \Omega_y - \Omega_y \ \Omega_z - \Omega_z \ \Omega_x - \Omega_x \ \Omega_z - \Omega_z \right]^T, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $l/2, r$  — длина и радиус поперечного сечения луча ЧЭ;  $\rho$ ,  $d_{\text{обр}}$  — плотность и пьезомодуль материала ЦТС-19 соответственно;  $U_{\text{возб}} = U_{\text{возб}m} \sin(\omega t)$  — напряжение возбуждения, приложенное к ЧЭ МОЭМ-преобразователя угловых скоростей.

Для оценки изгибных колебаний и максимальных отклонений концов четырёхлучевого ЧЭ трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей приведено моделирование принципа его работы (рис. 2).

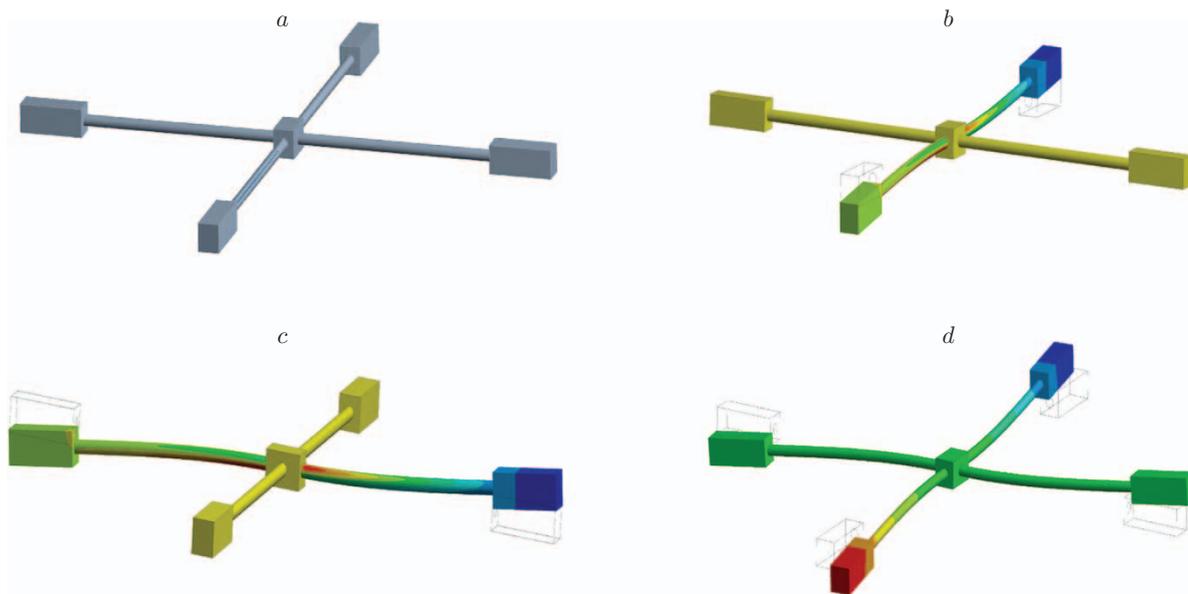


Рис. 2. Моделирование отклонений ЧЭ трёхосевого МОЭМ-преобразователя под действием угловой скорости  $\Omega$ :  $a - \Omega = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $b - \Omega = [\Omega_x \ 0 \ 0]^T$ ,  $c - \Omega = [0 \ \Omega_y \ 0]^T$ ,  $d - \Omega = [\Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z]^T$

Величины рабочих зазоров  $\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = [d_1(\Omega_y) \ d_2(\Omega_y) \ d_3(\Omega_z) \ \dots \ d_8(\Omega_z)]^T$  между ОУ и ЧЭ определяются начальным зазором  $d_0$ , сформированным при изготовлении, и отклонением концов лучей ЧЭ  $\mathbf{w}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ :

$$\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = d_0 \mathbf{I} - \mathbf{w}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z), \quad (4)$$

где  $\mathbf{I} = [1 \ \dots \ 1]^T$  — единичный вектор размером  $8 \times 1$ .

Выходные оптические мощности трёхосевого МОЭМ-преобразователя на основе ОТЭ  $\mathbf{P}_{\text{ФП}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = [P_{\text{ФП1}}(\Omega_y) \ P_{\text{ФП2}}(\Omega_y) \ P_{\text{ФП3}}(\Omega_z) \ \dots \ P_{\text{ФП8}}(\Omega_z)]^T$ , достигающие фотоприёмников (ФП1–ФП8), несут информацию об измеряемой угловой скорости  $\boldsymbol{\Omega} = [\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]^T$  и определяются в основном зависимостью отражательных способностей  $\mathbf{R}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)] = [R_1[d_1(\Omega_y)] \ R_2[d_2(\Omega_y)] \ R_3[d_3(\Omega_z)] \ \dots \ R_8[d_4(\Omega_z)]]^T$  границы раздела сред ОУ — воздух — ЧЭ от величин зазоров  $\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$  между основаниями призм и ЧЭ.

Для неполяризованной оптической волны отражательная способность в структуре с одним отражением от модулируемой границы определяется с учётом [10, 11] как

$$\mathbf{R}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)] = \frac{1}{2} [\mathbf{R}_{\perp}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)] + \mathbf{R}_{\parallel}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)]], \quad (5)$$

где  $\mathbf{R}_{\perp}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)]$ ,  $\mathbf{R}_{\parallel}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)]$  — отражательные способности границы раздела сред ОУ — воздух — ЧЭ для перпендикулярно и параллельно поляризованных волн соответственно.

По изменениям отражательных способностей при применении одного источника излучения  $P_{\text{ИИ}}$  с учётом коэффициента оптических потерь  $k_{\text{п}}$  зависимость максимальных оптических мощностей ФП  $\mathbf{P}_{\text{ФП}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$  от угловой скорости задаётся как

$$\mathbf{P}_{\text{ФП}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = \frac{P_{\text{ИИ}} k_{\text{п}}}{8} \mathbf{R}[\mathbf{d}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)]. \quad (6)$$

При использовании преобразователей ток—напряжение на основе операционных усилителей входные сигналы  $\mathbf{U}_{\text{БО}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = [U_{\text{БО1}}(\Omega_y) \ \dots \ U_{\text{БО8}}(\Omega_z)]^T$  в блоке обработки могут быть записаны в виде

$$\mathbf{U}_{\text{БО}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = S_{\text{ФП}} R_{I-U} \mathbf{P}_{\text{ФП}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z), \quad (7)$$

где  $R_{I-U}$  — сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя преобразователей ток—напряжение;  $S_{\text{ФП}}$  — чувствительность ФП (фотодиодов).

При организации дифференциальной схемы на основе двухканального считывания выходных сигналов функция преобразования трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ представлена в виде

$$U_{\text{ВЫХ}}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = \begin{bmatrix} U_{\text{ВЫХ}}^x(\Omega_x) \\ U_{\text{ВЫХ}}^y(\Omega_y) \\ U_{\text{ВЫХ}}^z(\Omega_z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\text{БО}}^x \frac{U_{\text{БО5}}(\Omega_x) - U_{\text{БО6}}(\Omega_x)}{U_{\text{БО5}}(\Omega_x) + U_{\text{БО6}}(\Omega_x)} \\ k_{\text{БО}}^y \frac{U_{\text{БО1}}(\Omega_y) - U_{\text{БО2}}(\Omega_y)}{U_{\text{БО1}}(\Omega_y) + U_{\text{БО2}}(\Omega_y)} \\ k_{\text{БО}}^z \frac{U_{\text{БО3}}(\Omega_z) - U_{\text{БО4}}(\Omega_z)}{U_{\text{БО3}}(\Omega_z) + U_{\text{БО4}}(\Omega_z)} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

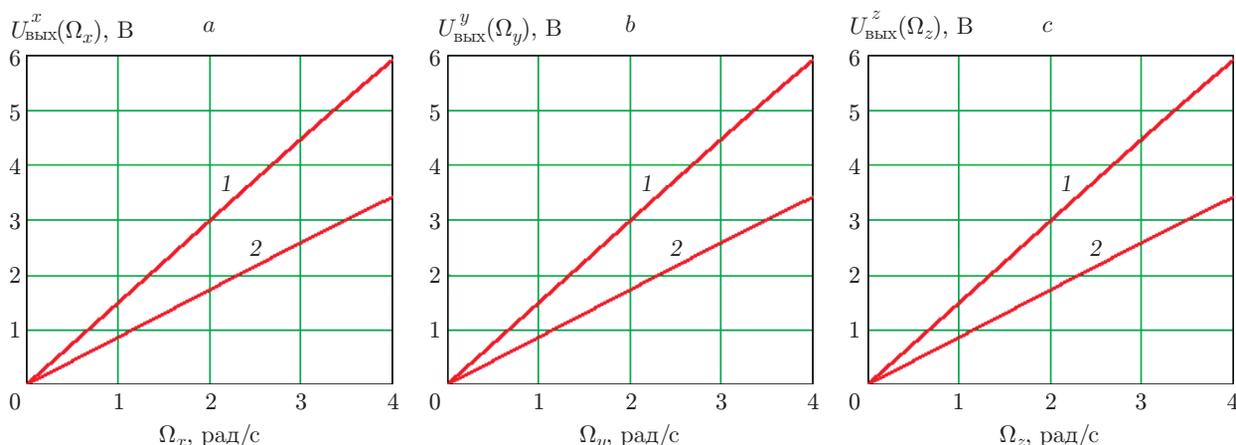


Рис. 3. Зависимости выходных напряжений трёхосевого МОЭМ-преобразователя от угловой скорости  $\Omega$ : *a* — по оси  $OX$ , *b* — по оси  $OY$ , *c* — по оси  $OZ$  (кривые 1 — при наличии одной составляющей угловой скорости, 2 — при наличии трёх равномерных составляющих:  $\Omega_x = \Omega_y = \Omega_z$ )

где  $k_{\text{БО}}^x, k_{\text{БО}}^y, k_{\text{БО}}^z$  — коэффициенты преобразования БО при обработке измеряемых сигналов по осям  $OX, OY, OZ$  соответственно.

Под воздействием больших величин угловой скорости и повышении напряжения возбуждения отклонения конца лучей ЧЭ могут выйти за пределы рабочего зазора ОТЭ и также может произойти механический контакт между ЧЭ и ОУ, нарушающий работоспособность МОЭМ-преобразователя. Выходные сигналы ФП7 и ФП8 используются для частичного контроля работоспособности вдоль оси  $OZ$ .

Определены зависимости выходных напряжений по трём осям МОЭМ-преобразователя от угловой скорости  $\Omega$  при следующих параметрах: осевой угол падения  $\theta = 49^\circ$ , длина волны излучения  $\lambda = 1,1$  мкм, начальный зазор  $d_0 = 0,41$  мкм, мощность источника излучения  $P_{\text{ИИ}} = 8$  мВт, коэффициент оптических потерь  $k_{\text{П}} = 0,5$ , показатель преломления призмы  $n_1 = 1,461$ , показатель преломления ЧЭ  $n_3 = 1,461$ , показатель преломления разделительной среды  $n_2 \approx 1$ , геометрические параметры для четырёхлучевого ЧЭ ( $l = 5$  мм,  $r = 30$  мкм,  $m = 5$  мкг) (рис. 3).

При одновременном измерении угловых скоростей по трём осям чувствительность МОЭМ-преобразователя немного уменьшается в сравнении с одноосевым измерением. Проблема обеспечения квазилинейной функции преобразования МОЭМ-преобразователя решается с помощью использования дифференциальной схемы при двухканальном считывании оптических сигналов по каждой оси и уменьшения начального зазора  $d_0$  до величины, соответствующей середине области максимальной чувствительности [7, 8].

**Анализ влияния дестабилизирующих факторов на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.** В МОЭМ-преобразователе угловых скоростей на основе ОТЭ рассеяние энергии колебательных движений ЧЭ происходит за счёт эффекта газового демпфирования (ГД). Этот эффект появляется из-за двух режимов взаимодействия газовой среды и вибрационного ЧЭ: протекание газа вдоль вибрационного ЧЭ и сжатие воздуха (сдавливание) между движущимися элементами МОЭМ-преобразователя. Силы ГД, имеющие направления против движения лучей ЧЭ, могут быть записаны в виде [12]

$$\mathbf{F}_{\text{ГД}}^i(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = -k_{\text{ГД}} \nu_i(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z), \quad (9)$$

где  $\nu_i(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = 2\mathbf{w}_i^l(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)/l$  — угловая скорость  $i$ -луча ЧЭ;  $k_{\text{ГД}} = \mu r l^4 / [4(l^2 + 16r^2)]$ ,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости среды.

Воздействие сил  $\mathbf{F}_a$  и  $\mathbf{F}_g$ , обусловленных линейным ускорением  $a$  и ускорением силы тяжести  $g$ , приводит к изменению суммарных перемещений ЧЭ и вызывает дополнительные погрешности. Таким образом, вектор суммарных сил, действующих на лучи 1–4 ЧЭ МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, будет иметь вид [13]

$$\mathbf{F}_{\Sigma}^{ik}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = \mathbf{F}_{\text{К}}^{ik}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) + \mathbf{F}_{\text{ГД}}^i(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_a. \quad (10)$$

Следовательно, отклонения конца лучей 1–4 ЧЭ МОЭМ-преобразователя  $\mathbf{w}^*(\Omega)$  с учётом ускорения силы тяжести, линейного ускорения и трения газовой среды относительно связанной системы координат  $OXYZ$  могут быть записаны как

$$\mathbf{w}^*(\Omega) = \mathbf{w}_j(\Omega) \pm \Psi_j(k_{\text{ГД}}, g, \alpha, \beta, a_x, a_y, a_z) \Big|_{j=1, \dots, 8}, \quad (11)$$

где  $\Psi(k_{\text{ГД}}, g, \alpha, \beta, a_x, a_y, a_z)$  — матрица дополнительных перемещений концов ЧЭ, вызываемых дестабилизирующими факторами;  $a_x, a_y, a_z$  — проекции линейного ускорения  $a$  на системе  $OXYZ$ ;  $\alpha, \beta$  — углы поворота связанной системы  $OXYZ$  относительно неподвижной  $OX^gY^gZ^g$ .

Из выражения (11) следует, что в общем случае информационные отклонения ЧЭ МОЭМ-преобразователя угловых скоростей также зависят от газового демпфирования, ускорения силы тяжести, линейного ускорения и текущего положения ориентации относительно  $OX^gY^gZ^g$ , вызывающих дополнительные погрешности и уменьшающих достоверность выходных сигналов. Результаты моделирования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей при измерении оси  $OX$  с учётом дестабилизирующих факторов показаны на рис. 4. Для осей  $OY, OZ$  моделирование осуществлялось аналогично.

Из полученных результатов следует, что линейное ускорение  $a$  и ускорение силы тяжести  $g$  оказывают существенное влияние на характеристики трёхосевого МОЭМ-преобра-

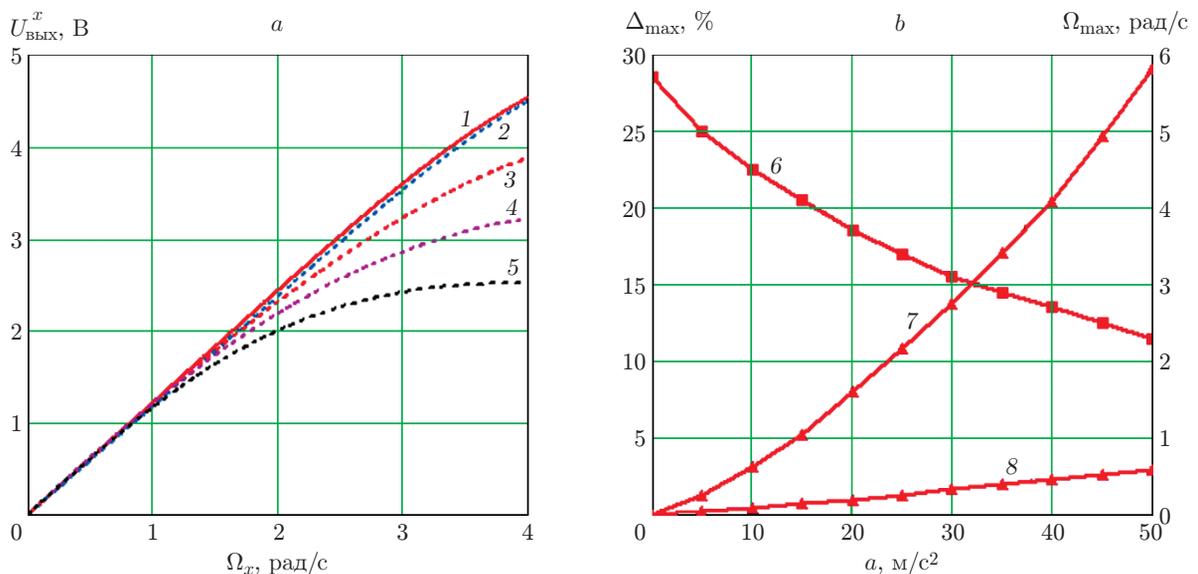


Рис. 4. Анализ влияния дестабилизирующих факторов на выходной сигнал преобразователя:  $a$  — зависимости выходного напряжения от угловой скорости (кривые 1, 2 — без учёта и с учётом трения газовой среды, 3 — с учётом  $g$ , 4 — с учётом  $a = 30 \text{ м/с}^2$ , 5 — с учётом всех дестабилизирующих факторов);  $b$  — зависимости максимального диапазона измерения (кривая 6) и максимальных погрешностей от линейного ускорения (7 — для отдельного канала считывания, 8 — для дифференциальной схемы)

зователя угловых скоростей. Максимальный диапазон измерения достигает 5,82 рад/с без учёта влияния дестабилизирующих факторов. При наличии линейного ускорения  $a = 50 \text{ м/с}^2$  максимальные погрешности составляют более 20 % для отдельного канала считывания оптических сигналов и 2,9 % для дифференциальной схемы на основе двухканального считывания. Диапазон измерения угловых скоростей при этом уменьшается до 2,34 рад/с. В критическом случае, когда на ЧЭ действует большая величина линейного ускорения  $a$  (более  $60 \text{ м/с}^2$ ) с направлением, совпадающим с ускорением силы тяжести  $g$ , возможно нарушение работоспособности устройства. Показано, что дифференциальная структура МОЭМ-преобразователя угловых скоростей существенно уменьшает влияние дестабилизирующих факторов.

**Динамический диапазон МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.** Как и в других оптоэлектронных системах, в МОЭМ-преобразователе угловых скоростей на основе ОТЭ главные ограничения разрешения, точности и динамического диапазона регистрируемого сигнала теоретически определяются шумами (дробовой, тепловой шум и темновой ток), которые в основном зависят от типа и качества используемых ФП и структуры ОУ—воздух—ЧЭ. Главным источником шумов в оптоэлектронных датчиках являются флуктуации интенсивности оптического сигнала от ИИ до ФП и флуктуации интенсивности, обусловленные воздействием на систему внешней среды [14, 15]. Для анализа шумов рассмотрено преобразование оптического сигнала, пропорционального измеряемой угловой скорости, в электрический (рис. 5).

Когда можно пренебречь искажением выходных сигналов при обработке в БО, средний квадрат эквивалентного шумового тока  $i_{\text{ш}}^2$  теоретически определяется как [16]

$$i_{\text{ш}}^2 = 2e^2 \frac{\eta P_{\text{п}}}{h\nu} \Delta f + 2e^2 \frac{\eta P_{\text{ф}}}{h\nu} \Delta f + 2ei_{\text{т}} \Delta f + \frac{4k_{\text{Б}}T}{R_{\text{н}}} \Delta f, \quad (12)$$

где  $\eta$  — квантовая эффективность (количество электронно-дырочных пар, производимых в результате поглощения одного фотона);  $e$  — заряд электрона;  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — интенсивность света;  $\Delta f$  — частотная полоса пропускания измерения;  $T$  — температура;  $k_{\text{Б}}$  — постоянная Больцмана;  $P_{\text{ф}}$  — фоновая мощность излучения;  $i_{\text{т}}$  — темновой ток ФП.

Минимальная величина угловой скорости  $\Omega_{\text{мин}}$ , детектируемая МОЭМ-преобразователем угловых скоростей на основе ОТЭ, при условии, что минимальный сигнал, регистрируемый ФП, ограничивается шумами, теоретически составляет

$$\Omega_{\text{мин}} = \frac{16}{P_{\text{ИИ}} k_{\text{п}} S_{\text{ФП}} \partial R / \partial \Omega} \sqrt{e^2 \frac{\eta P_{\text{п}}}{2h\nu} \Delta f + e^2 \frac{\eta P_{\text{ф}}}{2h\nu} \Delta f + \frac{ei_{\text{т}}}{2} \Delta f + \frac{k_{\text{Б}}T}{R_{\text{н}}} \Delta f}. \quad (13)$$

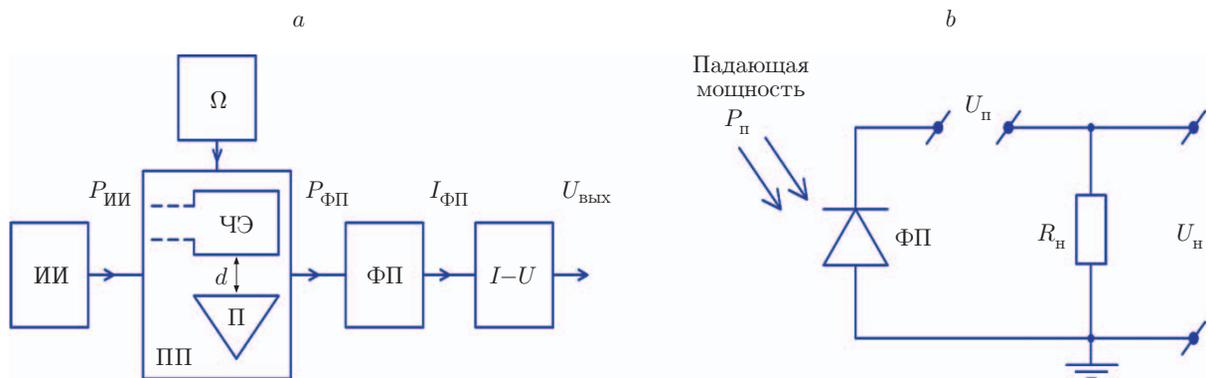


Рис. 5. Преобразование оптического сигнала одного канала, пропорционального угловой скорости, в электрический: *a* — обобщённая структура, *b* — детектирование сигнала ФП

Принимая следующие конструктивные параметры МОЭМ-преобразователя угловых скоростей:  $\theta = 49^\circ$ ,  $\lambda = 1,1$  мкм,  $d_0 = 0,41$  мкм,  $P_{\text{ИИ}} = 8$  мВт,  $k_{\text{П}} = 0,5$ ,  $S_{\text{ФП}} = 0,3$  А/Вт,  $R_{\text{н}} = 20$  кОм, получаем минимальную детектируемую угловую скорость  $9,3 \cdot 10^{-7}$  рад/с.

Динамический диапазон МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ определяется отношением диапазона изменения фототока при вариациях зазора от  $d_{\text{min}}$  до  $d_{\text{max}}$  к эквивалентному шумовому току  $i_{\text{ш}}$  и представлен в виде

$$D = 20 \lg \left( \frac{P_{\text{ИИ}} k_{\text{П}} S_{\text{ФП}} (\mathbf{R}[d_{\text{max}}(\Omega)] - \mathbf{R}[d_{\text{min}}(\Omega)])}{4 \sqrt{e^2 \frac{\eta P_{\text{П}}}{2h\nu} \Delta f + e^2 \frac{\eta P_{\text{Ф}}}{2h\nu} \Delta f + \frac{ei_{\text{т}}}{2} \Delta f + \frac{k_{\text{Б}} T}{R_{\text{н}}} \Delta f}} \right). \quad (14)$$

Для МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ, фототок которого при единичной отражательной способности равен  $10 \cdot 10^{-6}$  А, а диапазон изменения отражательной способности на рабочем участке — 0,84, динамический диапазон по каждой оси измерения в частотном диапазоне 20 кГц составит 67,3 дБ.

Данная схема МОЭМ-преобразователя обеспечивает рабочий диапазон значений зазора около сотен нанометров, что на порядок меньше, чем у ёмкостных микроэлектромеханических гироскопов, и приводит к уменьшению требуемых амплитуд возбуждаемых колебаний в пьезоэлементе. Также за счёт применения оптического считывания результатов измерений рассматриваемые МОЭМ-преобразователи угловых скоростей имеют меньшую величину минимально детектируемой угловой скорости и больший динамический диапазон измерения.

Рассматриваемое решение приводит к совмещению микроэлектромеханического исполнения гироскопов с технологией оптоэлектронных и волоконно-оптических узлов: ИИ, ОР, ОУ, ФП и др. Это усложняет конструкцию МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, но обеспечивает гальваническую развязку цепи возбуждения ЧЭ и схемы съёма информации, позволяет применять такие приборы в условиях сильных электромагнитных помех и больших ударных перегрузок, приводящих к возможности пробоя межэлектродных зазоров.

**Заключение.** Предложена функциональная схема и разработана модель трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. При использовании схемы двухканального считывания выходных оптических сигналов по каждой из осей измерения и канала частичного контроля работоспособности получено полное представление функции преобразования трёхосевого МОЭМ-преобразователя, обеспечивающей квазилинейность выходных характеристик в диапазоне измерения  $\pm 4$  рад/с.

Исследовано влияние дестабилизирующих факторов на характеристики трёхосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей. Показано, что линейное ускорение  $a$  и ускорение силы тяжести  $g$  оказывают существенное влияние на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, которое можно компенсировать при использовании дифференциальной схемы на основе двухканального считывания выходных сигналов. Определена минимальная детектируемая угловая скорость и динамический диапазон МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волоконно-оптическая техника:** современное состояние и новые перспективы /Под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова. М.: Техносфера, 2010. 608 с.
2. **Косцов Э. Г.** Состояние и перспективы микро- и нанозлектромеханики // Автометрия. 2009. 45, № 3. С. 3–52.

3. **Датчики:** справочное пособие /Под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
4. **Chi C. Y., Chen T. L.** Compensation of imperfections for vibratory gyroscope systems using state observers // *Sensors & Transducers Journ.* 2009. **6**, Special Is. P. 128–145.
5. **Hocker G. B.** Fiber-optic sensing of pressure and temperature // *Appl. Opt.* 1979. **18**, N 9. P. 1445–1448.
6. **Fraden J.** Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. N. Y.: Springer-Verlag, 2010. 579 p.
7. **Бусурин В. И., Фам А. Т.** Микрооптоэлектромеханический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта // *Автометрия.* 2016. **52**, № 2. С. 124–130.
8. **Пат. 2607731 РФ.** Микро-опто-электромеханический трёхосевой датчик угловой скорости и линейного ускорения /В. И. Бусурин, А. Т. Фам, В. В. Коробков, М. А. Жеглов. Опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
9. **Бидерман В. Л.** Прикладная теория механических колебаний. М.: Высш. шк., 1972. 416 с.
10. **Бусурин В. И., Горшков Б. Г., Коробков В. В.** Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. М.: Изд-во МАИ, 2012. 168 с.
11. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1983. 721 с.
12. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
13. **Dunzhu X., Cheng Y., Lun K.** The development of micro-machined gyroscope structure and circuitry technology // *Sensors.* 2014. **14**, N 1. P. 1394–1473.
14. **Новоселов А. Р.** Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприёмников на основе линеек фоточувствительных элементов // *Автометрия.* 2010. **46**, № 6. С. 106–115.
15. **William H. H.** Measurement of low level photodiode noise currents // *Appl. Opt.* 1974. **13**, N 10. P. 2209–2210.
16. **Удд Э.** Волоконно-оптические датчики. М.: Техносфера, 2008. 520 с.

*Поступила в редакцию 24 марта 2017 г.*

---