

УДК 681.586.5

МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННельНОГО ЭФФЕКТА*

В. И. Бусурин, А. Т. Фам

*Московский авиационный институт,
125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: vbusurin@mai.ru*

Представлена возможность построения микрооптоэлектромеханического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта. Разработана модель МОЭМ-преобразователя. Получены зависимости выходной оптической мощности и выходного напряжения от угловых скоростей. Определён эффективный диапазон измерения угловых скоростей при обеспечении квазилинейности функции преобразования. Рассмотрено влияние конструктивных параметров чувствительного элемента и температуры на характеристики преобразователя.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханический преобразователь, угловая скорость, пьезокерамика, оптическое туннелирование, отражательная способность.

DOI: 10.15372/AUT20160215

Введение. Одно из перспективных направлений разработок новых датчиков и преобразователей угловых скоростей — создание микроэлектромеханических систем (МЭМС), в том числе микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) преобразователей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Такие устройства лишены недостатков традиционных механических гироскопов, поскольку имеют более высокую чувствительность к малым перемещениям, меньшие массогабаритные показатели и низкий уровень энергопотребления. Перечисленные достоинства являются приоритетными, в частности, в авиационной промышленности, так как эффективность и конкурентоспособность летательных аппаратов во многом определяются совершенством приборов, на базе которых строятся системы управления и навигации [1, 2]. Конструкторско-технологические работы по созданию и реализации таких устройств ведутся многими научными центрами в США, Японии, России, Южной Корее, Франции, Германии, Швеции и других странах [3–5].

В последние годы широко распространяются МЭМС-датчики угловых скоростей, которые выполнены на основе ёмкостного метода измерения. В результате отклонения инерциальной массы изменяется ёмкостное сопротивление между пластинами конденсатора, преобразуемое в электрическое напряжение, пропорциональное угловой скорости. При этом минимальные зазоры между пластинами составляют порядка микрометра, а их максимальные значения — десятки микрометров, что требует повышенных напряжений возбуждения. Общими недостатками большинства ёмкостных МЭМС-датчиков являются возможность пробоя конденсаторов, возникающая при максимальных перемещениях чувствительного элемента (ЧЭ), что приводит к выходу таких приборов из строя, и нелинейность функции преобразования, сильно зависящая от глубины модуляции ёмкостного зазора [6].

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

Цель данной работы — устранение указанных недостатков за счёт обеспечения возможности оптического считывания результатов измерений в преобразователе угловой скорости при использовании ОТЭ. Предлагаемый одноосевой МОЭМ-преобразователь угловых скоростей на основе ОТЭ может быть построен в системе призма полного внутреннего отражения—воздух—ЧЭ, в которой ЧЭ выполнен из пьезокерамического материала и испытывает вибрационные колебания из-за возникающих сил Кориолиса под действием измеряемой угловой скорости. Исследованы различные варианты считывания выходных сигналов для обеспечения высокой чувствительности и уменьшения погрешностей.

Структура и функция преобразования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. Для обеспечения гальванической развязки цепи возбуждения ЧЭ и схемы съёма информации, уменьшения диапазона требуемых перемещений до сотен нанометров и снижения напряжения возбуждения $U_{\text{возб}}$ пьезоэлемента, исключения возможности электрического пробоя, а также получения квазилинейной функции преобразования предлагается использовать схему МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с высокочувствительной оптоэлектронной схемой съёма информации [7, 8], например, на основе ОТЭ. Такой МОЭМ-преобразователь содержит источник излучения (ИИ), призмы полного внутреннего отражения, ЧЭ в виде закреплённой посередине балки из пьезокерамического материала с дополнительными массами на её концах, фотоприёмники (ФП1, ФП2) и блок обработки (БО) (рис. 1). Призмы полного внутреннего отражения и ЧЭ с дополнительной массой могут быть изготовлены из кварца и пьезокерамического материала соответственно, что позволяет снизить погрешность, обусловленную изменением конструктивных параметров преобразователя при повышенных температурах, и обеспечить высокую чувствительность во всём диапазоне измерений.

Под действием измеряемых угловых скоростей происходят малые отклонения ЧЭ из-за эффекта Кориолиса, позволяющие определить угловую скорость Ω_z . Для увеличения чувствительности МОЭМ-преобразователя угловой скорости могут быть введены дополнительные массы m , расположенные, например, на двух концах ЧЭ. При этом следует учитывать, что если установить большую дополнительную массу, то эффективный диапазон измерения уменьшится, линейность преобразователя ухудшится и в критическом случае возможно нарушение работоспособности устройства. Амплитуда отклонений ЧЭ с дополнительной массой m относительно оси OY при воздействии угловой скорости Ω_z будет являться функцией различных параметров: $y_m = f(\Omega_z, E, \rho, d_{\text{обр}}, U_{\text{возб}}, l, h, b, m, x)$, где $E, \rho, d_{\text{обр}}$ — модуль упругости, плотность и пьезомодуль обратного эффекта пьезокерамики; l, h, b — длина, толщина и ширина ЧЭ; x — координата вдоль оси OX ЧЭ.

При фиксированных значениях конструктивных параметров экстремальные отклонения конца ЧЭ $y_m^*(\Omega_z)$ вдоль оси OY зависят от величины измеряемой угловой скорости Ω_z : $y_m^*(\Omega_z) = y_m(\Omega_z, x)|_{x=l/2}$.

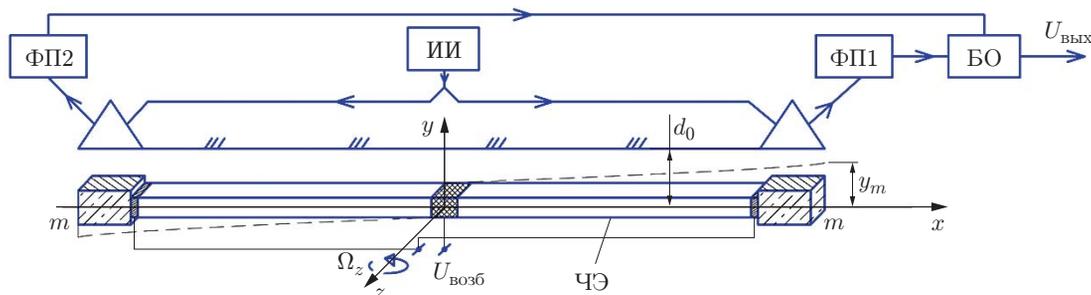


Рис. 1. Структура МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с двумя каналами считывания выходных оптических сигналов

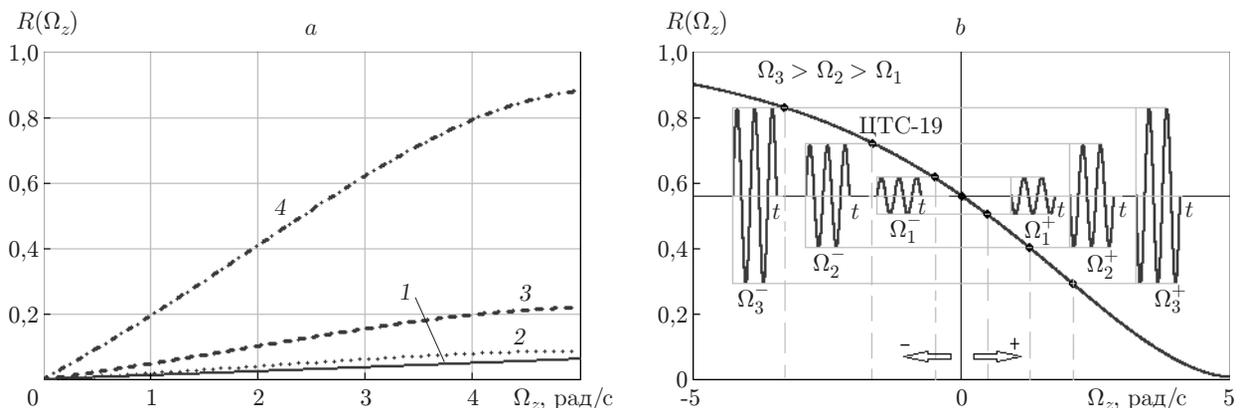


Рис. 2. Зависимости от угловой скорости: *a* — максимальных перепадов отражательной способности для различных пьезоматериалов (кривая 1 — кварц, 2 — титанат бария, 3 — ниобат лития, 4 — цирконат-титанат свинца (ЦТС-19)); *b* — изменений отражательной способности преобразователя с одним каналом считывания

При этом экстремальные величины зазора $d_{\pm}(\Omega_z)$ между призмой полного внутреннего отражения и ЧЭ с учётом начального зазора d_0 , сформированного при изготовлении, определяются как $d_{\pm}(\Omega_z) = d_0 \pm y_m^*(\Omega_z)$.

Функция преобразования МОЭМ-преобразователей угловых скоростей представляет собой зависимость максимального перепада выходного напряжения БО ($\Delta U_{\text{ВЫХ.}m} = f(\Omega_z)$) от воздействия измеряемой угловой скорости на чувствительный элемент и задаётся главным образом зависимостью отражательной способности $R[d_{\pm}(\Omega_z)]$ границы раздела сред призма — воздух — ЧЭ от величины зазора $d_{\pm}(\Omega_z)$ между основанием призмы и ЧЭ.

Для неполяризованной оптической волны отражательная способность в структуре с одним отражением от модулируемой границы находится с учётом [9]:

$$R[d_{\pm}(\Omega_z)] = \frac{1}{2}[R_{\perp}[d_{\pm}(\Omega_z)] + R_{\parallel}[d_{\pm}(\Omega_z)]],$$

где $R_{\perp}[d_{\pm}(\Omega_z)]$, $R_{\parallel}[d_{\pm}(\Omega_z)]$ — отражательные способности границы раздела сред для перпендикулярно и параллельно поляризованных волн соответственно.

Определены зависимости отражательной способности $R = f(\Omega_z)$ преобразователя с одним каналом считывания от угловой скорости и максимальных перепадов отражательной способности для различных типов пьезокерамики при следующих выбранных параметрах: начальный зазор $d_0 = 0,41$ мкм; показатель преломления призмы $n_1 = 1,46$; длина волны оптического излучения $\lambda = 1,1$ мкм; показатель преломления тонкой плёнки, нанесённой на поверхность дополнительной массы, $n_3 = 1,46$; разделительная среда — воздух ($n_2 \approx 1$); угол падения оптического излучения на поверхность призмы $\theta = 49^\circ$. Геометрические размеры ЧЭ: длина $l = 5$ мм, толщина $b = 70$ мкм, ширина $h = 70$ мкм (рис. 2).

При организации двух каналов считывания оптических сигналов и уменьшении начального зазора до величины, соответствующей середине области максимальной чувствительности, зависимости максимальных значений дифференциальной отражательной способности от угловой скорости МОЭМ-преобразователя более линейны (рис. 3). Изменение направления вращения приводит к смене фазы выходного сигнала на 180° .

По поведению отражательной способности и с учётом использования одного источника излучения зависимость максимальной выходной оптической мощности $P_{\text{ФП_дифф.}m}$ от угловой скорости определяется как $P_{\text{ФП_дифф.}m}(\Omega_z) = P_{\text{ИИ}} k_{\text{П}} R_{\text{дифф}}[d_{\pm}(\Omega_z)]/2$, где $P_{\text{ИИ}}$ —

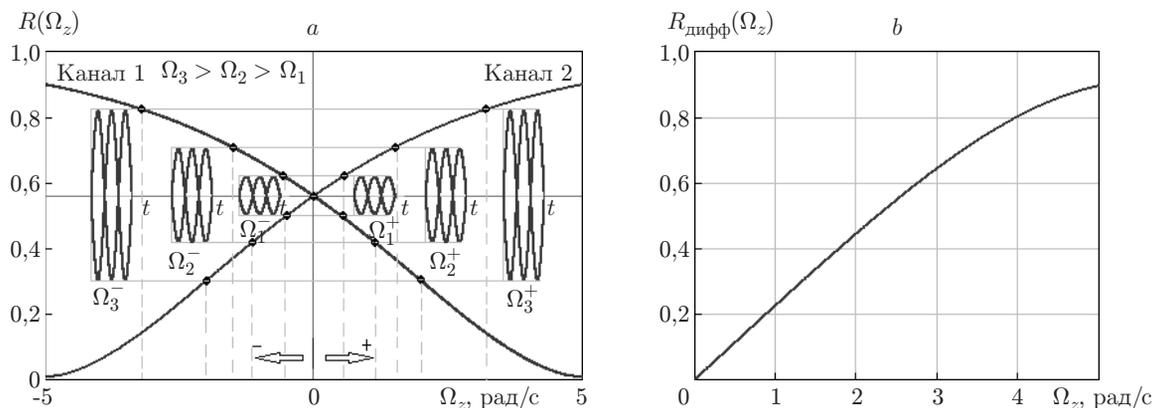


Рис. 3. Зависимости от угловой скорости для двух каналов считывания при расположении рабочей точки на середине диапазона измерения: отражательной способности (а) и максимальных значений дифференциальной отражательной способности (b)

мощность источника излучения; $k_{\text{п}}$ — коэффициент оптических потерь. Дифференциальное значение выходного напряжения БО $U_{\text{вых_дифф}}(\Omega_z)$ при применении преобразователей ток—напряжение на основе операционных усилителей представим в виде $U_{\text{вых_дифф}}(\Omega_z) = S_{\text{ФП}} P_{\text{ФП_дифф_м}}(\Omega_z) R_{I-U}$, где R_{I-U} — сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя преобразователей ток—напряжение; $S_{\text{ФП}}$ — чувствительность фотоприёмников (фотодиодов).

Определение эффективного диапазона измерения преобразователя угловых скоростей. Одним из главных параметров МОЭМ-преобразователя на основе ОТЭ является чувствительность к наноперемещениям, вызванным угловой скоростью, которая определяется производной отражательной способности по зазору: $S = \partial R / \partial d$. Отметим (рис. 4), что чувствительность МОЭМ-преобразователя не постоянна в диапазоне измерения и меняется также от конструктивных параметров, в частности начального зазора d_0 , угла падения излучения θ , длины оптической волны λ . Для заданной величины d_0 зазор $d(\Omega_z)$ экстремален при достижении максимума и минимума отклонений ЧЭ $y_m^*(\Omega_z)$, зависящих от значения измеряемой угловой скорости. Для указанных параметров ЧЭ максимальная величина измеряемой угловой скорости $\Omega_{z \text{ max}}$, при которой зазор $d(\Omega_{z \text{ max}})$ достигает минимально допустимых значений порядка 40 нм, составляет $\pm 4,65$ рад/с.

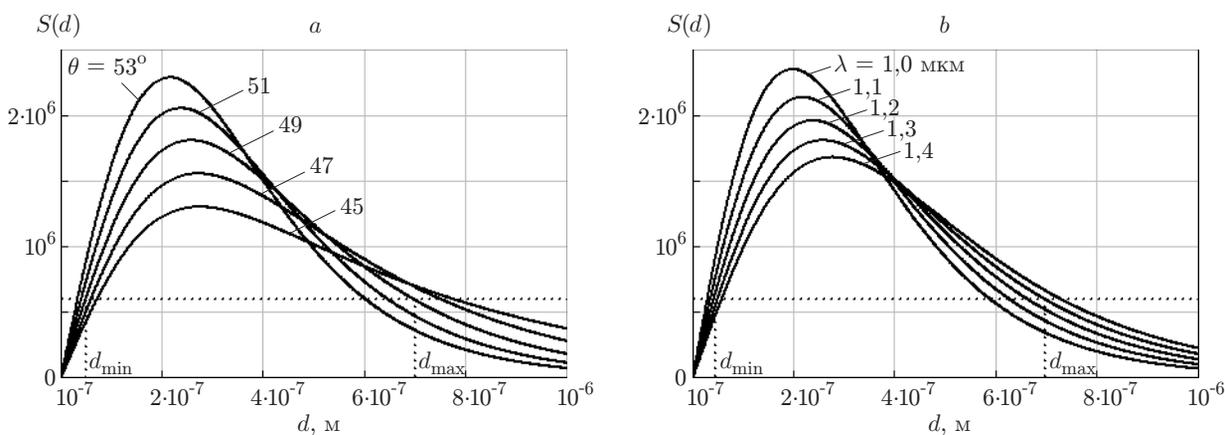


Рис. 4. Зависимости чувствительности МОЭМ-преобразователя от величины зазора: при вариациях угла падения излучения θ (а) и длины волны λ (b)

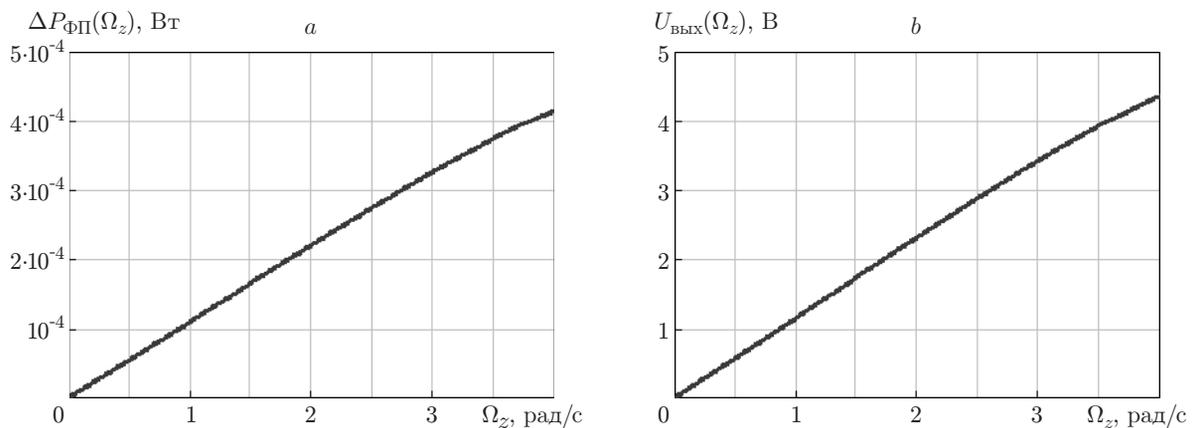


Рис. 5. Зависимости экстремальных значений разности от угловой скорости на выбранном диапазоне измерения при $P_{ИИ} = 2$ мВт и $k_{П} = 0,5$: выходных мощностей (а) и амплитуды выходного напряжения (б)

С уменьшением угла падения излучения θ и увеличением длины волны λ происходит расширение диапазона зазоров, в котором чувствительность отличается от максимальной не более заданного числа раз. Но следует также учитывать, что значение максимальной чувствительности при этом падает. Для обеспечения приемлемых чувствительности и диапазона малых перемещений при изменении угловых скоростей определены допустимые значения зазора 0,04–0,7 мкм при угле падения 49° и длине волны 1,1 мкм, где чувствительность снижается не более чем в 3 раза.

Отметим, что при уменьшении длины l и увеличении толщины h или ширины b чувствительного элемента понижаются экстремальные значения перепадов зазора $d(\Omega_z)$, что, в свою очередь, соответствует возможности измерения большей максимальной величины угловой скорости и уменьшению чувствительности. Моделирование показало, что для обеспечения чувствительности примерно 5 мВ/рад/с ЧЭ должен иметь длину около 10 мм при толщине и ширине 30 мкм.

Для выбранной пьезокерамики ЦТС-19 и диапазона измерения ± 4 рад/с определены зависимости экстремальных значений разности выходных оптических мощностей двух каналов $\Delta P_{ФП}(\Omega_z) = P_{ФП1}(\Omega_z) - P_{ФП2}(\Omega_z)$ и амплитуды выходного напряжения $U_{ВЫХ}(\Omega_z) = \Delta P_{ФП}(\Omega_z) S_{ФП} R_{I-U}$ МОЭМ-преобразователя от угловой скорости, которые обеспечивают квазилинейность характеристики с погрешностью нелинейности 1,5 % при вышеперечисленных конструктивных параметрах (рис. 5).

Исследуемый преобразователь угловых скоростей на основе ОТЭ с двумя каналами считывания имеет квазилинейную функцию преобразования в диапазоне измерений несколько радиан в секунду.

Анализ погрешностей МОЭМ-преобразователя угловых скоростей. В процессе измерения физических величин с помощью МОЭМ-преобразователей угловых скоростей возникает ряд погрешностей, причиной которых являются отклонения конструктивных параметров моделей от расчётных значений, влияющих на оптическое туннелирование. К ним, в частности, можно отнести отклонения начального зазора d_0 и угла падения излучения θ .

С уменьшением величины зазора d большая часть оптической энергии поглощается поверхностью ЧЭ, что ослабляет выходной сигнал фотоприёмника. Отклонение величины начального зазора в значительной мере обуславливает характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей. Моделирование показало, что при изменении величины начального зазора d_0 в пределах ± 16 нм относительная погрешность составляет около 1,6 % при максимальной угловой скорости ± 4 рад/с.

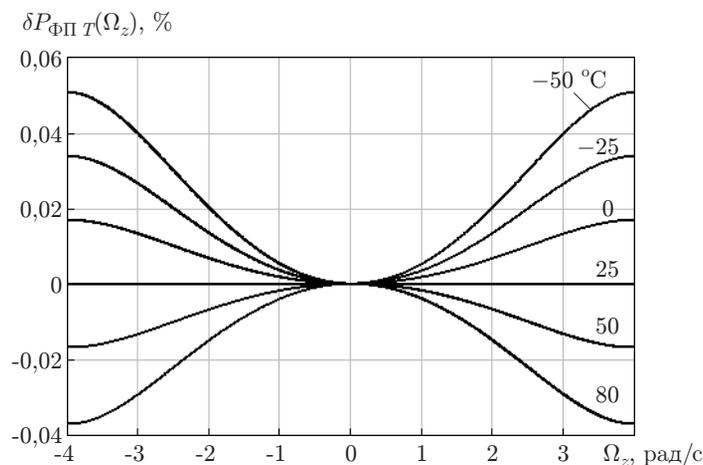


Рис. 6. Относительные дополнительные погрешности выходной оптической мощности $\delta P_{\text{ФПТ}}(\Omega_z)$ при вариации температуры T

Смещение осевого угла падения излучения $\Delta\theta$ на основание призмы возникает из-за неточностей при установке ИИ. Изменения углов падения $\Delta\theta$ на $\pm 0,4^\circ$ приводят к погрешности 1,9 %, что существенно влияет на характеристики МОЭМ-преобразователя.

Для компенсации вышеприведённых погрешностей требуется индивидуальное тестирование преобразователей и изготовление узлов с высокой точностью. Для обеспечения погрешности не более 1 % необходимо ограничить отклонение начального зазора не более чем на 10 нм и угла падения на $0,2^\circ$.

Для оценки дополнительной температурной погрешности исследуемого преобразователя угловых скоростей требуются данные об изменении параметров пьезокерамического материала, влияющих на функцию преобразования, под воздействием температуры T . Первостепенное влияние на температурную стабильность функции преобразования оказывает изменение модуля упругости материала: $E(T) = E_0(1 + \beta_E \Delta T)$, где E_0 — модуль упругости при $T_0 = 25^\circ\text{C}$; β_E — температурный коэффициент модуля упругости; $\Delta T = T - T_0$ — приращение температуры.

Следует учитывать также, что изменение температуры окружающей среды влияет на пьезомодуль ЧЭ: $d_{\text{обр}}(T) = d_{\text{обр}0}(1 + \beta_d \Delta T)$, где $d_{\text{обр}0}$ — пьезомодуль обратного пьезоэффекта при $T_0 = 25^\circ\text{C}$; β_d — температурный коэффициент пьезомодуля ($\beta_d \approx 1/3$ КТР (коэффициента теплового расширения ЦТС-19)) [10].

Величины дополнительной температурной погрешности в диапазоне $(-50 \dots + 80)^\circ\text{C}$ при максимальной угловой скорости $\Omega_z = \pm 4$ рад/с достаточно небольшие и составляют около 0,05 % при $T = -50^\circ\text{C}$ и 0,04 % при $T = +80^\circ\text{C}$ (рис. 6).

При изгибах вибрационного ЧЭ, возбуждаемого с помощью напряжения $U_{\text{возб}}$ частотой f , за счёт эффекта Кориолиса в пьезокерамике (ЦТС-19) возникают гистерезисные явления. Однако они имеют второстепенное значение, так как МОЭМ-преобразователь угловых скоростей работает в колебательном режиме. Гистерезис проявляется в обоих полупериодах, что позволяет компенсировать его влияние на выходной сигнал. Следует учесть также, что преобразователь с двумя каналами считывания оптических сигналов обеспечивает достаточную линейность характеристик и значительно уменьшает влияние гистерезиса по сравнению с одноканальной схемой.

Заключение. В результате исследования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с одним и двумя каналами считывания, построенного на основе ОТЭ, определён эффективный диапазон измерения ± 4 рад/с, соответствующий высокой чувствительности. При

использовании двухканального считывания информации об угловой скорости обеспечивается квазилинейность функции преобразования в расчётном диапазоне измерения, что позволяет эффективно применять это устройство в системах управления подвижными объектами.

Изучено влияние смещений начального зазора и угла падения излучения и найдены их предельные значения (10 нм и $0,2^\circ$ соответственно) для обеспечения относительной погрешности преобразователя не более 1 %. Установлено, что в диапазоне температур от -50 до $+80$ °С температурная погрешность МОЭМ-преобразователя угловых скоростей составляет менее 0,1 % при максимальной угловой скорости ± 4 рад/с. Оценено влияние гистерезисного явления на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей при использовании пьезокерамики ЦТС-19.

Определён рабочий диапазон значений зазора 40–700 нм, что на порядок меньше, чем у ёмкостных МЭМС-датчиков, это приводит к снижению требуемых амплитуд возбуждаемых колебаний в пьезоэлементе (до 5 раз). Исключена возможность возникновения электрического пробоя за счёт использования способа съёма информации на основе ОТЭ, обеспечивающего работоспособность преобразователя во всём диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фрайден Дж.** Современные датчики: Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. **Dunzhu X., Cheng Y., Lun K.** The development of micro-machined gyroscope structure and circuitry technology // *Sensors*. 2014. **14**, N 1. P. 1394–1473.
3. **Косцов Э. Г.** Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики // *Автометрия*. 2009. **45**, № 3. С. 3–52.
4. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
5. **Xia D. Z., Yu C., Wang Y. L.** A digitalized silicon micro-gyroscope based on embedded FPGA // *Sensors*. 2012. **12**, N 10. P. 13150–13166.
6. **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.
7. **Пат. на изобретение 2544885 РФ.** Микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости /В. И. Бусурин, М. А. Жеглов, В. В. Коробков. Опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8.
8. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Козлов А. И. и др.** Исследование технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов инфракрасных фотоприёмников на основе многослойных структур с квантовыми ямами // *Автометрия*. 2015. **51**, № 2. С. 110–118.
9. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики: Пер. с англ. М.: Наука, 1983. 721 с.
10. **Богущ М. В.** Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей /Под ред. проф. А. Е. Панича. М.: Техносфера, 2014. 315 с.

Поступила в редакцию 18 декабря 2014 г.