

УДК 681.586.5

## **Анализ влияния конструктивных параметров на характеристики микроопто-электромеханического преобразователя угловых скоростей**

**Бусурин В.И.\*, Фам Ань Туан\*\*, Ахламов П.С.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [vbusurin@mai.ru](mailto:vbusurin@mai.ru)*

*\*\*e-mail: [phamanhtuanlqd@gmail.com](mailto:phamanhtuanlqd@gmail.com)*

*\*\*\*e-mail: [pakhlamov@hotmail.com](mailto:pakhlamov@hotmail.com)*

### **Аннотация**

Предложена уточненная математическая модель микроопто-электромеханического преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта, обеспечивающая большую чувствительность при малой погрешности измерения, и определена функция преобразования по уточненной математической модели. Рассмотрено влияние конструктивных параметров воспринимающего пьезоэлемента на характеристики уточненной математической модели преобразователя угловых скоростей. Проведена оценка дополнительной температурной погрешности преобразователя во всем рабочем диапазоне измерения.

**Ключевые слова:** преобразователь, угловая скорость, оптическое туннелирование, отражательная способность, погрешность, температура.

## Введение

В настоящее время определение угловой скорости осуществляется с помощью традиционных механических преобразователей - гироскопов, использующих быстро вращающееся тело с несколькими степенями свободы. Известно, что они имеют ряд недостатков: значительную массу и большое энергопотребление [1]. Технологические успехи в области волоконно-оптической и микросистемной техники привели к бурному развитию микроэлектромеханических систем, позволяющих устранять вышеприведенные недостатки. Поэтому, исследование и разработка современных микроопто-электромеханических (МОЭМ)-преобразователей угловых скоростей, которые могут быть применены во многих областях, является актуальной проблемой.

В работе исследован МОЭМ-преобразователь на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), обеспечивающий измерение угловых скоростей с высокой чувствительностью и стабильностью во всем диапазоне измерений. Под действием измеряемых угловых скоростей происходят отклонения вибрационного воспринимающего пьезоэлемента (ВП) МОЭМ-преобразователя из-за эффекта Кориолиса, позволяющие измерять угловую скорость  $\Omega_z$ . Такое отклонение ВП МОЭМ-преобразователя с дополнительной массой может быть определено по следующей формуле [2]:

$$y_m(\Omega_z) = \frac{\pi \rho f d_{\text{обр}} U_{\text{упр}}}{E h_m^2} \left[ \left( \frac{24x^5}{5l} - 8x^4 + 4lx^3 \right) + \frac{3ml_0^2}{\rho h_m b_m} \right] \cos(2\pi ft) \Omega_z, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $E$  – модуль упругости,  $d_{\text{обр}}$  – пьезомодуль обратного пьезоэффекта материала ВП,  $l$  - длина,  $h_m$  – толщина,  $b_m$  - ширина ВП;  $l_0$  – расстояние между двумя электродами без приложения электрического поля;  $m$  – дополнительная масса;  $f$  – частота переменного напряжения  $U_{\text{упр}}$ , вызывающего продольную вибрацию ВП вдоль оси  $OX$ .

Угол поворота сечения ВП из-за изгиба запишется следующем образом:

$$\varphi(\Omega_z) = \frac{\pi \rho f d_{\text{обр}} U_{\text{упр}}}{E h_m^2} \left[ \left( \frac{24x^4}{l} - 32x^3 + 12lx^2 \right) + \frac{6ml l_0}{\rho h_m b_m} \right] \cos(2\pi ft) \Omega_z. \quad (2)$$

### **1. Уточненная модель МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта**

Угловую скорость с высокой чувствительностью возможно измерить с помощью МОЭМ-преобразователя, который может быть построен из источников излучения (ИИ), первичного преобразователя (ПП), фотоприемников (ФП) и блока обработки (БО) [2,3]. Для наилучшего съема информации можно создать модель МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с двумя каналами считывания выходных оптических сигналов.

Первичный преобразователь угловых скоростей представляется собой призму полного внутреннего отражения (с показателем преломления  $n_1$ ) и ВП в виде балки из пьезокерамического материала с дополнительной массой, на которой нанесен тонкий слой (с показателем преломления  $n_3$ ) из оптического материала (рис. 1).

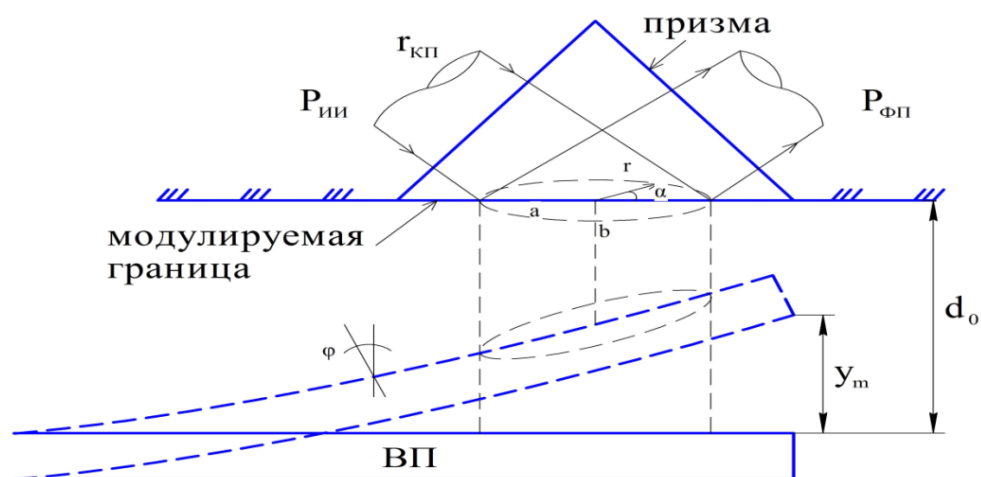


Рис 1. Первичный преобразователь угловых скоростей на основе ОТЭ

В преобразователе оптическая мощность излучения на фотоприемнике  $P_{\text{ФП}}$  определяется с учетом отражательной способности в контактной оптической области модулируемой границы призмы, зависящей от изменения зазора  $d$  под действием измеряемой угловой скорости. Предполагается, что зазор постоянен вдоль контактной оптической области, причем выходную оптическую мощность  $P_{\text{ФП}}$  можно определить по приближенной модели преобразователя, в которой расчет зазора  $d$  осуществляется приближенно по центральному лучу источника излучения как точки контакта на модулируемой границе призмы [3]. Такой способ позволяет упростить расчеты при моделировании МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, но полученные результаты имеют малую точность.

Поэтому предлагается применять способ расчета выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$  по уточненной математической модели, которая учитывает переменность зазора для различных точек контакта оптического излучения на модулируемой границе призмы [3]. Примем что, источник излучения создает круглое оптическое пятно с радиусом  $r_{\text{ОПТ}}$  в направлении, перпендикулярном

падающим лучам. При этом выходная оптическая мощность определяется как интегральная зависимость в пределах получаемой эллиптической области (полуоси эллипса  $b=r_{OPT}, a=r_{OPT}/\cos\theta$ ) с учетом переменности зазора  $d(r,\alpha,\Omega_z)$ .

При использовании уточненной модели преобразователя угловых скоростей, величина зазора  $d(r,\alpha,\Omega_z)$  зависит от начального зазора  $d_0$ , предусмотренного конструкцией, а также отклонения элемента  $y_m(\Omega_z)$  с учетом изменения зазора вдоль контактной оптической области :

$$d(r,\alpha,\Omega_z) = d_0 - y_m(\Omega_z) - r \cdot \frac{\sin(\varphi(\Omega_z))}{\cos\theta} . \quad (3)$$

Энергетическая освещенность  $E_{\mathcal{E}}$  модулируемой поверхности призмы определяется отношением оптической мощности источника излучения  $P_{ИИ}$ , к размеру оптического пятна при равномерном распределении оптической мощности по пятну:

$$E_{\mathcal{E}} = \frac{P_{ИИ}}{\pi \cdot r^2} \cdot \cos\theta . \quad (4)$$

Таким образом, оптическая мощность, достигающая фотоприемника определится как:

$$P_{\Phi\Pi} = E_{\mathcal{E}} \cdot k_{потерь} \cdot \int_{A_{\Pi}} R(d(r,\alpha,\Omega_z)) \cdot dA_{\Pi} , \quad (5)$$

где  $E_{\mathcal{E}}$  – освещенность, перпендикулярная к поверхности;

$k_{потерь}$  – коэффициент оптических потерь;

$R(d(r,\alpha,\Omega_z))$  – отражательная способность модулируемой границы сред, определяющаяся как отношение мощности отраженного излучения к мощности падающего [4].

Интегрируя эллиптическую область  $A_{\Pi}$ , выраженную в полярных координатах, уравнение (5) с учетом (4) можно записать в виде:

$$P_{\Phi\Pi} = \frac{P_{III}}{\pi \cdot r^2} \cdot \cos \theta \cdot k_{\text{потерь}} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{G(\alpha)} R(d(r, \alpha, \Omega_Z)) \cdot r \cdot d r d\alpha, \quad (6)$$

где  $r, \alpha$  – радиальная и угловая полярные координаты эллиптической области;

$G(\alpha)$  – граница эллиптической области, ( $G(\alpha) = \frac{a \cdot b}{\sqrt{b \cdot \cos^2 \alpha + a \cdot \sin^2 \alpha}}$ ).

## 2. Исследование уточненной модели МОЭМ-преобразователя угловых скоростей при изменении радиуса оптического пятна и начального зазора

Проведен выбор параметров МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, обеспечивающих возможность его функционирования. Определена выходная мощность оптического излучения  $\Delta P_{\Phi\Pi}$  по предложенной уточненной модели с учетом переменности зазора при следующих параметрах МОЭМ-преобразователя угловых скоростей: мощность источника  $P_{III}=1\text{мВт}$ , коэффициент оптических потерь  $k_{\text{потерь}}=0,5$ , длина ВП  $l=10\text{мм}$ , толщина ВП  $b_m=60\text{мкм}$ , ширина ВП  $h_m=1\text{мм}$ , начальный зазор  $d_0=0,41\text{мкм}$ , показатель преломления призмы  $n_1=1,46$ ; длина волны излучения  $\lambda=1,3 \text{ мкм}$ ; показатель преломления напыленного оптического слоя на поверхности ВП  $n_3=1,46$ ; разделительная среда – воздух ( $n_2 \approx 1$ ); угол падения  $\theta=49^\circ$ . При расчете по уточненной модели, изменение величины круглого оптического пятна радиусом  $r_{\text{ОПТ}}$  вызывает изменение мощности оптического излучения  $\Delta P_{\Phi\Pi\_уточ}$  (рис. 2). Отметим что, влияние не определяется при моделировании мощности оптического излучения  $\Delta P_{\Phi\Pi\_прибл}$  по приближенной модели.

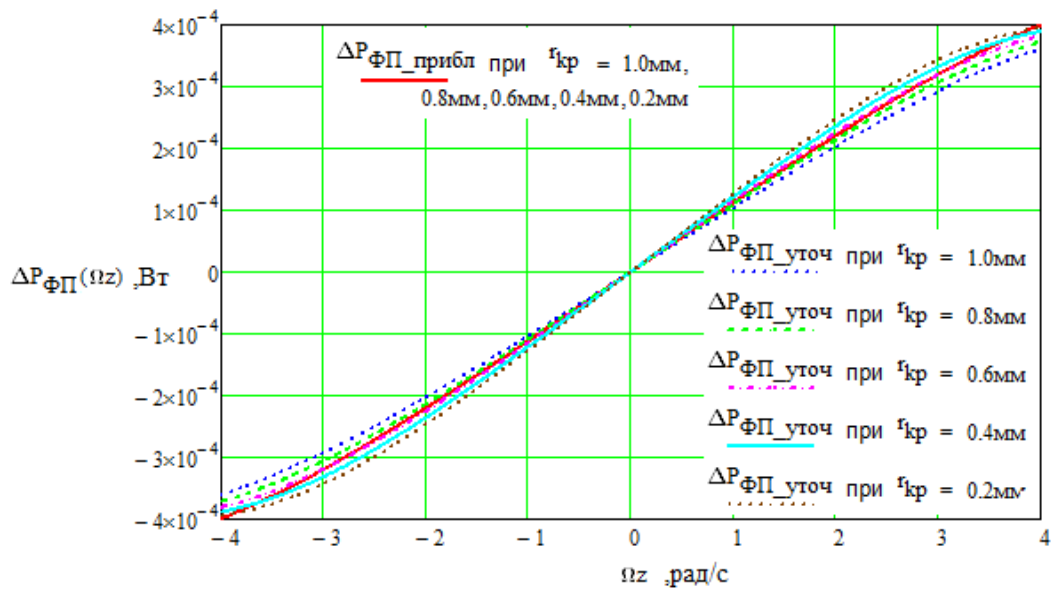


Рис 2. Зависимости мощности оптического излучения  $\Delta P_{\text{ФП\_прибл}}$  и  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  от угловой скорости при вариации  $r_{\text{ОПТ}} = \text{var}$

При увеличении радиуса круглого оптического пятна  $r_{\text{ОПТ}}$  увеличивается погрешность расчетов мощности оптического излучения, полученная при моделировании уточненной модели  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$ , по сравнению с результатами моделирования приближенной модели  $\Delta P_{\text{ФП\_прибл}}$ . Если увеличивается величина радиуса круглого оптического пятна  $r_{\text{ОПТ}}$  до максимального размера (до ширины ВП -  $b_m$ ), то величина погрешности расчетов по уточненной и приближенной моделям составляет около 13,7% при максимальной угловой скорости  $\pm 4$  рад/с (рис. 3). То есть величина радиуса круглого оптического пятна  $r_{\text{ОПТ}}$  сильно влияет на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.

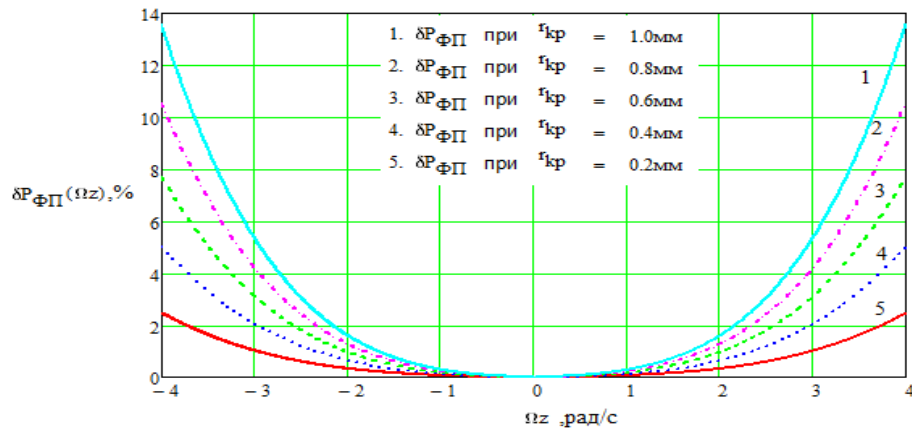


Рис 3. Зависимости относительной погрешности расчетов для мощности оптического излучения  $\Delta P_{\Phi\Pi\_уточ}$  по сравнению с  $\Delta P_{\Phi\Pi\_прибл}$  от угловой скорости при

$$r_{ОПТ} = var$$

Уменьшение зазора  $d(r, \alpha, \Omega z)$  приводит к уменьшению выходного сигнала фотоприемника, т.е. выходной оптической мощности  $\Delta P_{\Phi\Pi}$ . На рисунке 4 представлены результаты моделирования мощности оптического излучения с использованием приближенной  $\Delta P_{\Phi\Pi\_прибл}$  и уточненной  $\Delta P_{\Phi\Pi\_уточ}$  моделей от угловой скорости при вариации начального зазора с выбранными параметрами ( $P_{ИИ}=1\text{ мВт}$ ,  $k_{потерь}=0,5$  и  $r_{ОПТ}=0,5\text{ мм}$ ).

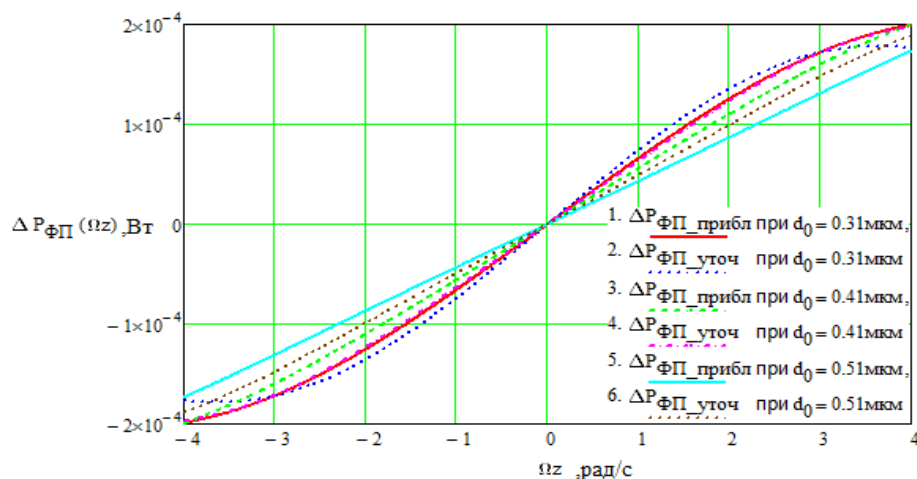


Рис 4. Зависимости мощности оптического излучения  $\Delta P_{\Phi\Pi\_прибл}$  и  $\Delta P_{\Phi\Pi\_уточ}$  от угловой скорости при  $d_0 = var$



Анализ показал, что при вариации начального зазора расчетные результаты оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  с учетом уточненной математической модели и оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_прибл}}$  с учетом приближенной модели сильно отличаются.

Относительная погрешность мощности оптического излучения  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  с учетом уточненной математической модели по сравнению с оптической мощностью  $\Delta P_{\text{ФП\_прибл}}$  при использовании приближенной модели увеличивается, если начальный зазор  $d_0$  уменьшается (рис. 5). Если провести моделирование с величинами начального зазора  $d_0=0,51\text{мкм}$ ,  $0,41\text{мкм}$  и  $0,31\text{мкм}$ , то результаты отличаются на 6%, 15% и 25% соответственно при максимальной угловой скорости  $\pm 4$  рад/с.

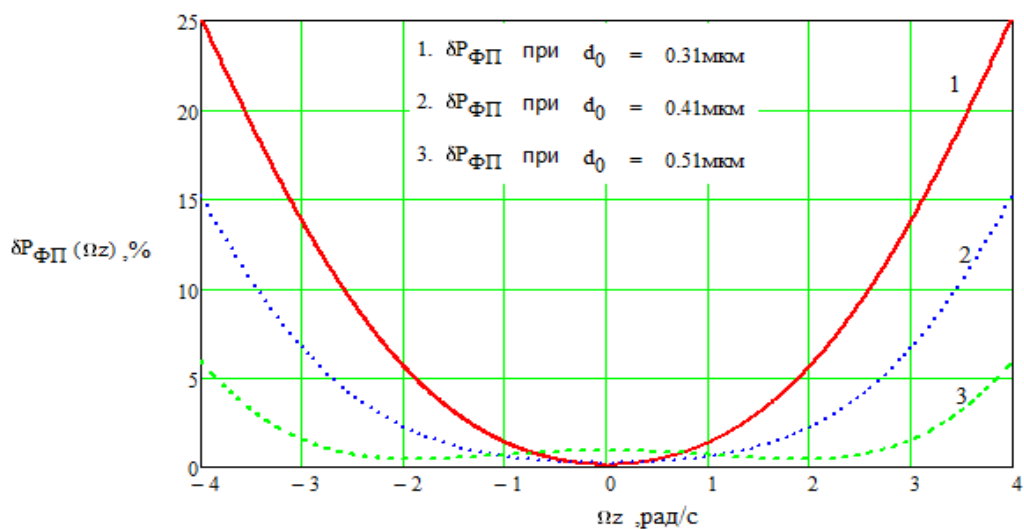


Рис 5. Зависимости относительной погрешности мощности оптического излучения

$$\Delta P_{\text{ФП\_уточ}} \text{ по сравнению с } \Delta P_{\text{ФП\_прибл}} \text{ при } d_0 = \text{var}$$

Результаты моделирования показывают, что погрешность выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП}}$  с использованием приближенной модели по сравнению с погрешностью, полученной с применением уточненной математической модели, значительная. Поэтому использование уточненной математической модели МОЭМ-

преобразователя с двумя каналами считывания позволяет получить более достоверную информацию об измеряемой угловой скорости во всем диапазоне измерения и ее можно использовать в последующих исследованиях.

### 3. Исследование влияние конструктивных параметров на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей

В качестве ВП в МОЭМ-преобразователе угловых скоростей используется двусторонняя вибрационная балка малых размеров с дополнительной массой, изготовленная из пьезокерамического материала. Изгиб этого элемента под действием измеряемой угловой скорости зависит от его конструктивных параметров: длины и толщины. При вариации толщины ВП получены зависимости выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  от измеряемой угловой скорости с учетом уточненной математической модели с выбранными параметрами:  $P_{\text{ИИ}}=1\text{мВт}$ ,  $k_{\text{потерь}}=0,5$ ,  $l=10\text{мм}$ ,  $d_0=0,41\text{мкм}$ , и  $r_{\text{ОПТ}}=0,5\text{мм}$  (рис. 6).

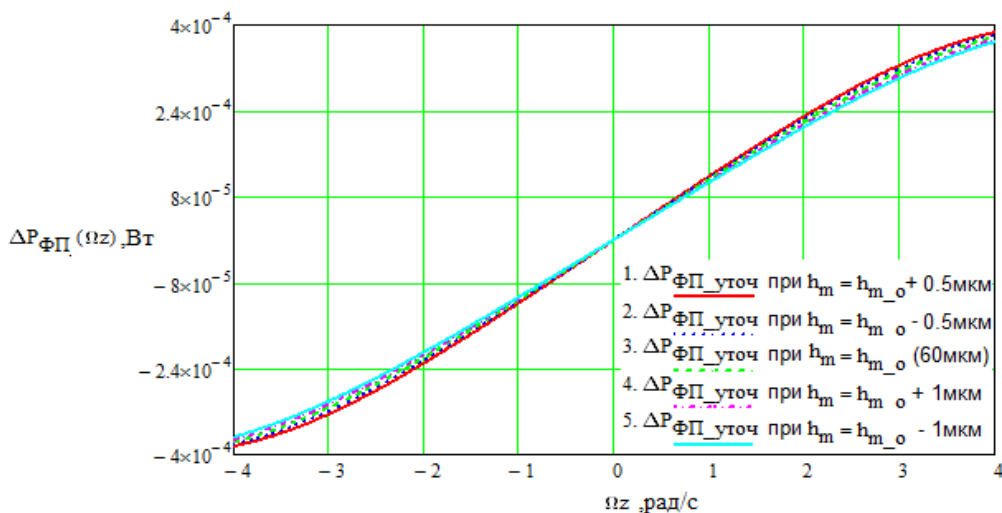


Рис 6. Зависимости выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  от измеряемой угловой скорости при изменении величины толщины ВП

Анализ результатов, представленных на рисунке 6, показывает, что при увеличении толщины ВП выходная оптическая мощность  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  также увеличивается. На рисунке 7 представлены зависимости относительной погрешности выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  от угловой скорости при изменении толщины пластины. Если величина толщины ВП отклоняется на  $\pm 0.5\text{мкм}$  и  $\pm 1\text{мкм}$ , то относительная погрешность МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ составляет 1.3% и 2.9% соответственно при максимальной угловой скорости  $\pm 4\text{ рад/с}$ .

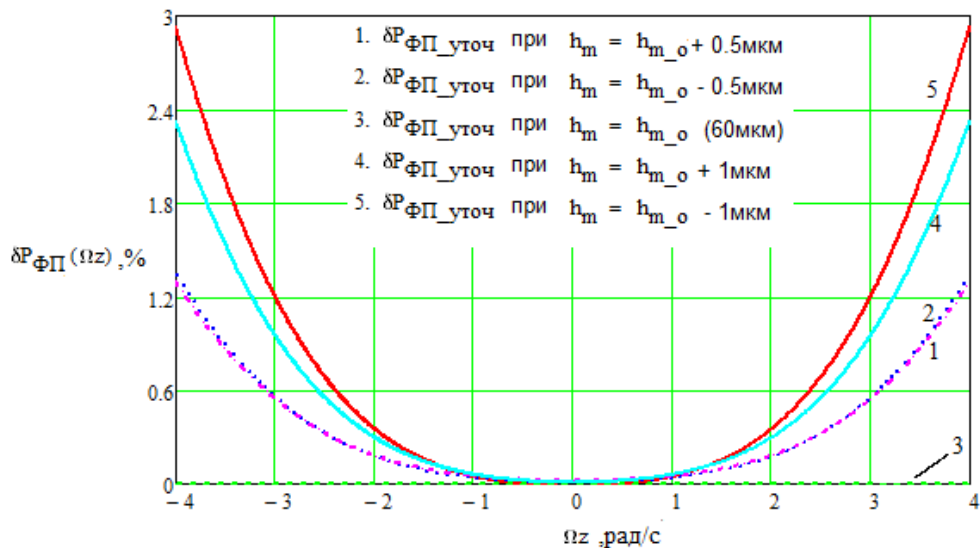


Рис 7. Зависимости относительной погрешности выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  от измеряемой угловой скорости при изменении величины толщины ВП

Изменение величины длины ВП также вызывает изменение выходной оптической мощности. На рисунке 8 приведены зависимости мощности оптического излучения  $\Delta P_{\text{ФП}}$  с учетом уточненной математической модели преобразователя от измеряемой угловой скорости при отклонении длины ВП. Отметим, что с увеличением величины длины ВП уменьшается выходная оптическая мощность  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$ .

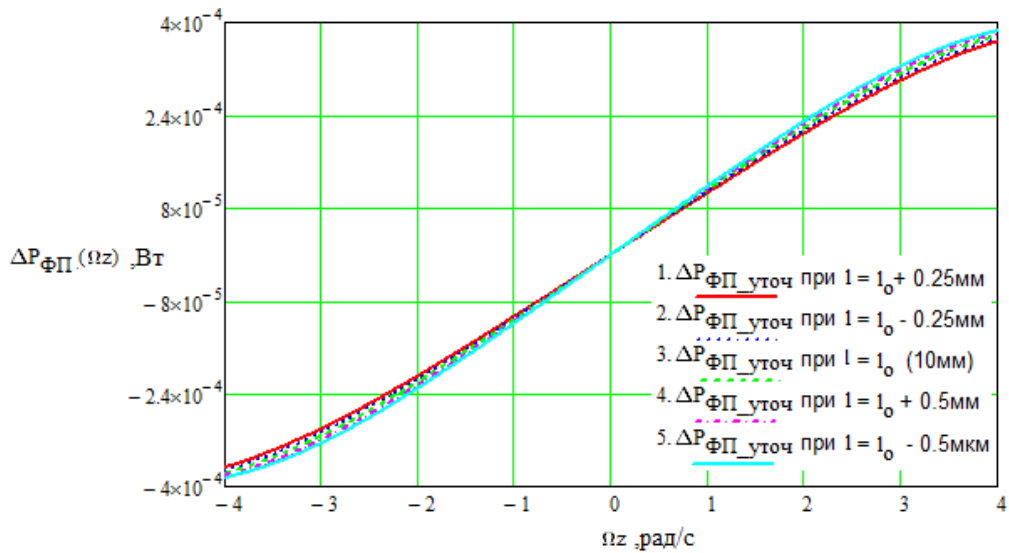


Рис 8. Зависимости выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП\_уточ}}$  от измеряемой угловой скорости при изменении величины длины ВП

Получены зависимости погрешности выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП}}$  с учетом уточненной математической модели МОЭМ-преобразователя от измеряемой угловой скорости при изменении длины ВП (рис. 9). Если величина длины ВП отклоняется на  $\pm 0.25\text{мм}$  и  $\pm 0.5\text{мм}$ , то относительная погрешность преобразователя составляет 1.2% и 2.95% соответственно при максимальной угловой скорости  $\pm 4$  рад/с.

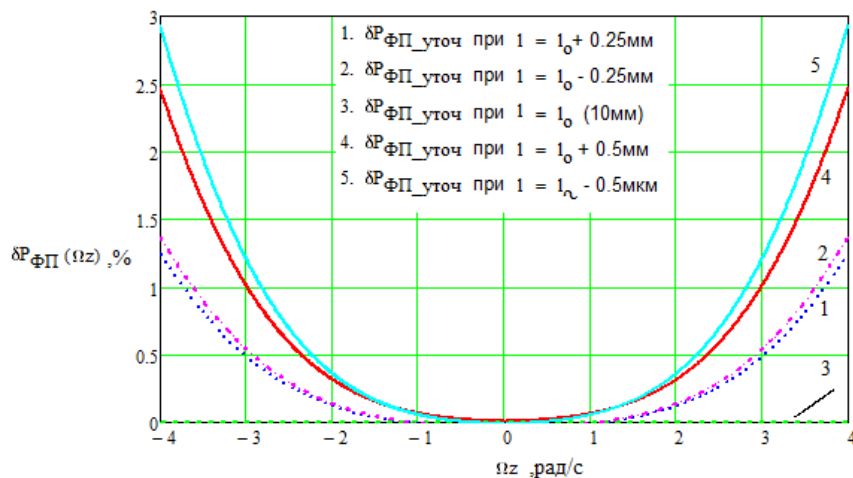


Рис 9. Зависимости относительной погрешности выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП}}$  от измеряемой угловой скорости при изменении величины длины ВП

Таким образом, для обеспечения допустимой погрешности (не более 1% во всем диапазоне измерения) необходимо использовать детали высокой точности при производстве и сборке преобразователя угловых скоростей, при этом допустимый диапазон отклонения для толщины ВП не более  $\pm 0.5$  мкм и для длины ВП не более  $\pm 0,25$  мм.

#### **4. Исследование температурного влияния на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей**

Погрешность измерения складывается из ряда погрешностей, в который входит и температурная погрешность. Для оценки температурной погрешности МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ, необходимо определить температурные изменения всех параметров, влияющие на функцию преобразования. Таким образом, температурная погрешность может быть вызвана линейным расширением узлов преобразователя и свойств элементов преобразователя [5].

Коэффициент температурного расширения кварцевого стекла, например марки С5-1, составляет  $5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , поэтому в рабочем температурном диапазоне от  $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  относительная погрешность вызываемая температурным воздействием составит 0,006%, что практически не оказывает влияния на характеристики преобразователя угловых скоростей [6].

Изменение температуры также оказывает влияние на ВП из пьезокерамического материала, а именно приводит к изменению параметров материала: модуль упругости материала  $E(T)$  и пьезомодуль обратного эффекта  $d_{\text{обр}}(T)$ , которые могут определены по выражениям [7]:

$$E(T) = E_0 ( 1 + \beta_E \cdot \Delta T ) , \quad (7)$$

$$d_{\text{обр}}(T) = d_{\text{обр}_0} ( 1 + \beta_d \cdot \Delta T ) , \quad (8)$$

где  $\Delta T = T - T_0$ ;  $E_0$ ,  $d_{\text{обр}_0}$  - модуль упругости, пьезомодуль обратного эффекта при комнатной температуре  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ;  $\beta_E$ ,  $\beta_d$  - температурный коэффициент модуля упругости материала, температурный коэффициент пьезомодуля материала;

При вариациях температуры в МОЭМ-преобразователе угловых скоростей происходит линейное расширение материала прокладки, которая располагается между ВП и призмой, обеспечивая требуемый начальный зазор  $d_0$ , т.е. изменение величины зазора  $d(r, \alpha, \Omega_Z)$ . В этом случае, действующий зазор вдоль оптической оси может быть определен по формуле:

$$d(r, \alpha, \Omega_Z) = d_0 + \frac{1}{2} \Delta d(T) - y_m(\Omega_Z) - r \cdot \frac{\sin(\varphi(\Omega_Z))}{\cos \theta} , \quad (9)$$

где  $\Delta d(T) = d_0 \cdot \text{ТКЛР}_{\text{П}} \cdot \Delta T$  - температурное линейное расширение прокладки,  $\text{ТКЛР}_{\text{П}}$  - температурный коэффициент линейного расширения материала прокладки.

Зависимости относительной погрешности выходной оптической мощности  $P_{\text{ФП\_уточ}}$  с учетом температурного влияния всех вышеуказанных параметров от измеряемой угловой скорости представлены на рис.10. Величины дополнительной температурной погрешности составляют на границах рабочего диапазона температуры 0,11% (при  $T = - 50^\circ\text{C}$ ) и 0,18% (при  $T = + 150^\circ\text{C}$ ) при максимальной угловой скорости  $\pm 4$  рад/с.

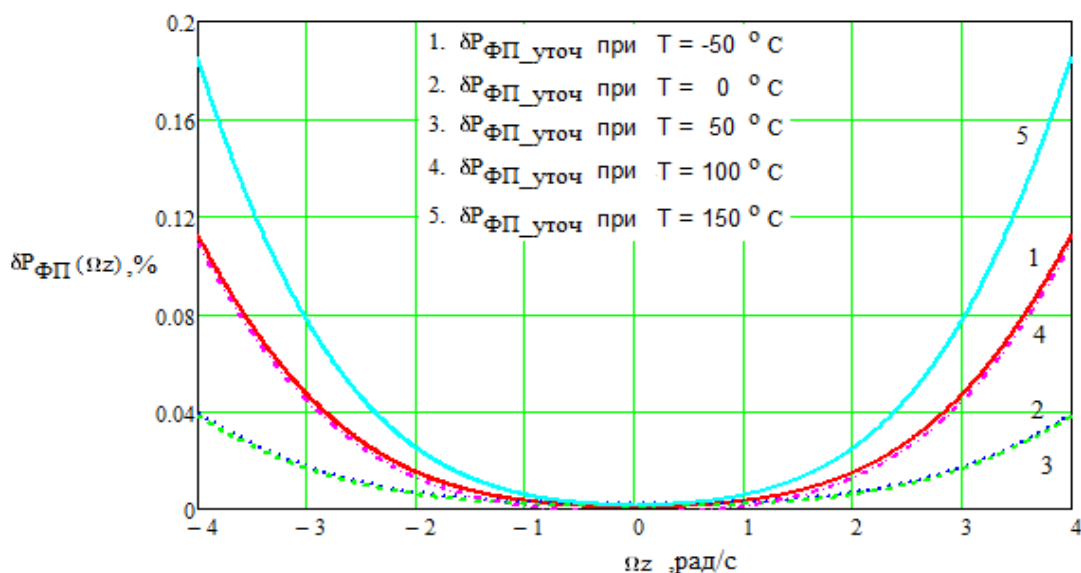


Рис 10. Зависимости дополнительной температурной погрешности выходной оптической мощности  $\Delta P_{\text{ФП}}$  от угловой скорости при вариации температуры  $T = \text{var}$

Таким образом, проведенный анализ этих зависимостей показывает, что в диапазоне измерения температура оказывает мало влияние на характеристики преобразователя за счет использования двух каналов считывания выходных сигналов. Зависимость от температуры в этом случае уменьшается в 8 раз по сравнению с использованием одного канала и улучшается линейность функции преобразования.

### Выводы

Исследован МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, построенный на основе ОТЭ, и предложена уточненная математическая модель преобразователя, позволяющая получить более достоверную информацию об измеряемой угловой скорости во всем диапазоне измерения с меньшей погрешностью. Проведено моделирование характеристик преобразователя и определена относительная погрешность выходной оптической мощности  $\partial P_{\text{ФП\_уточ}}$  при использовании

уточненной математической модели  $P_{ФП\_уточ}$  по сравнению с приближенной моделью  $P_{ФП\_прибл}$  при вариации зазора и радиуса оптического пятна  $r_{опт}$ . Оценено влияние конструктивных параметров на характеристики МОЭМ-преобразователя угловых скоростей. Анализ показал, что для относительной погрешности не более 1% отклонение толщины ВП должно быть не более 0,5 мкм и длины ВП не более 0,25мм. Определена величина дополнительной температурной погрешности МОЭМ-преобразователя угловых скоростей в диапазоне температур от -50 °С до +150 °С при максимальной угловой скорости  $\pm 4$ рад/с. Предположены способы ее компенсации, основанные на изготовлении симметричного ВП и использовании двух каналов считывания выходных сигналов.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-08-00493-а).*

### **Библиографический список**

1. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. – 392 с.
2. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Фам Ань Туан. Исследование характеристик микроопто-электромеханического преобразователя угловых скоростей // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т.22. №1. С. 29-37.
3. Бусурин В.И., Звей Ней Зо. Моделирование и компенсация температурной погрешности преобразователя давления на основе оптического туннелирования // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т.19. №1 С. 149-156.



4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1983. – 721 с.
5. Duanne Tandeske. Pressure sensors : selection and application. Publisher : CRC Press, USA, 1990, 312 pp.
6. В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов. Волоконно – оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 258 с.
7. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / Под ред. А.Е. Панича. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 315 с.