

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.586.5

DOI: 10.14529/ctcr180209

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОДНООСЕВОГО МИКРО-ОПТО-ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

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

<sup>1</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия,*

<sup>2</sup> *АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», г. Москва, Россия*

Предложена методика расчета одноосевого микро-опто-электро-механического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей, построенного на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Разработан алгоритм и программное обеспечение, позволяющие производить расчет основных параметров МОЭМ-преобразователя при обеспечении заданных технических требований.

*Ключевые слова:* МОЭМ, угловая скорость, преобразователь, методика, характеристики, оптический туннельный эффект.

### Введение

Направление исследования и разработки датчиков угловых скоростей на основе микро-электро-механических (МЭМ) технологий является перспективным в приборостроении с точки зрения возможности различных применений в системах управления подвижными объектами. За последние несколько лет широкое распространение получили МЭМ-датчики угловых скоростей, выполненные на основе емкостного метода измерения, имеющие ряд достоинств, таких как простота их использования, малые массогабаритные показатели и энергопотребление. Но при разработках емкостных МЭМ-датчиков также встречается ряд ограничений, таких как возможность пробоя конденсаторов и нелинейность функции преобразования, сильно зависящая от глубины модуляции емкостного зазора [1–3].

Для устранения таких недостатков и обеспечения гальванической развязки цепи возбуждения чувствительного элемента (ЧЭ), а также получения квазилинейной функции преобразования предлагается использовать схему одноосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ, построенного в системе «призма полного внутреннего отражения (ППВО) – воздух – ЧЭ». Такой МОЭМ-преобразователь угловых скоростей обеспечивает рабочие диапазоны значений зазора около сотен нанометров, что на порядок меньше, чем у емкостных МЭМС-гироскопов, и приводит к уменьшению требуемых амплитуд возбуждаемых колебаний в пьезоэлементе. Также за счет применения оптического считывания результатов измерений такие МОЭМ-преобразователи по сравнению с другими аналогами имеют меньшую минимальную детектируемую угловую скорость ( $\sim 10^{-6}$  рад/с) и широкий динамический диапазон измерения ( $\sim 67$  дБ в частотном диапазоне 20 кГц) [4, 5].

Целью данной работы является обеспечение определения конструктивных параметров МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ для реализации заданного диапазона функционирования.

## Алгоритм расчета одноосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ

Алгоритм расчета МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на ОТЭ основан на обеспечении заданного диапазона измерения с высокой чувствительностью (рис. 1) [6, 7]. Исходными данными при расчете преобразователя являются: диапазон измерения, уровень чувствительности, динамический диапазон, основная и дополнительная погрешности, а также массогабаритные показатели.

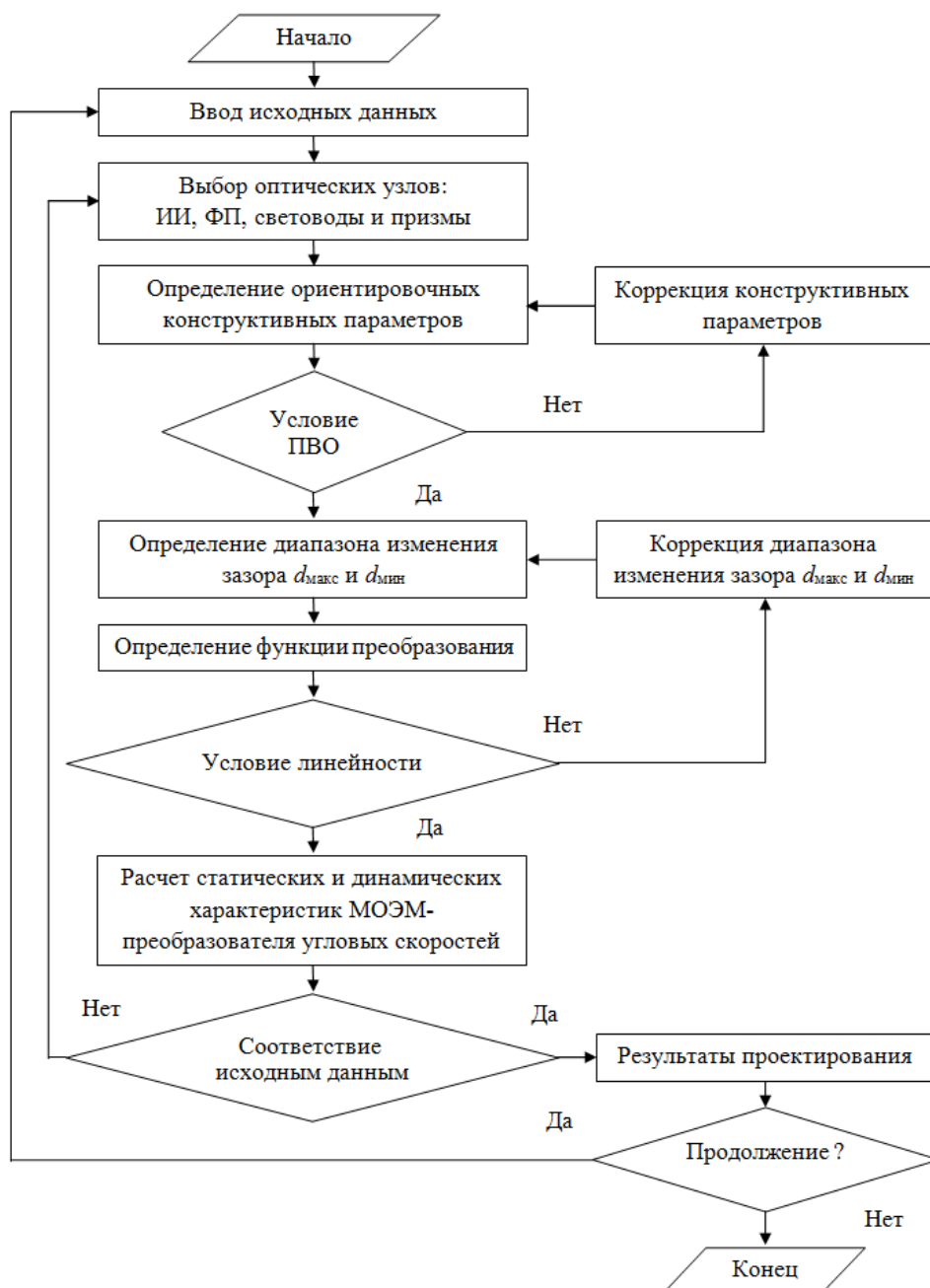


Рис. 1. Алгоритм расчета одноосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ

При рассмотрении задач разработки и расчета МОЭМ-преобразователя угловых скоростей допустимы следующие положения:

– ЧЭ симметричен и изготовлен из однородного пьезоматериала; центры масс недеформируемых дополнительных масс ЧЭ располагаются в их геометрических центрах на расстоянии  $l/2$

от точки  $O$ , жестко закрепленной с корпусом МОЭМ-преобразователя угловых скоростей; величина прогиба конца ЧЭ линейно зависит от приложенных сил;

– диапазон рабочих температур от  $-50$  до  $+80$  °С; при этом температурные изменения модуля Юнга, пьезомодуля обратного пьезоэлектрического эффекта и также линейных размеров ЧЭ считаются линейными.

### Выбор оптоэлектронных узлов и материалов

Источник излучения (ИИ), фотоприемник (ФП), ППВО и световоды для МОЭМ-преобразователя угловых скоростей должны быть совместимы по спектральным характеристикам с большими коэффициентами эффективного использования с малыми оптическими потерями, обладать долговечностью, сохранять работоспособность в диапазоне температур от  $-50$  до  $+80$  °С [7, 8].

В качестве ИИ могут быть использованы светодиодные модули, работающие в режиме генерации оптического излучения с длиной волны  $\lambda = 0,7 \dots 1,3$  мкм, которые создают мощность десятки мВт с малым коэффициентом потерь. Для поддержания стабильной излучаемой мощности ИИ на заданном уровне может быть применен модуль стабилизации оптического излучения, при котором часть потока от ИИ поступает в световод обратной связи, соединенной с ФП [9].

Основным требованием при выборе ФП является его соответствие спектральным характеристикам используемых ИИ, световодов и достаточный диапазон, в котором ток ФП пропорционален падающему потоку излучения. Для малогабаритных преобразователей целесообразно использовать кремниевые фотодиоды, имеющие достаточно линейную зависимость фототока от мощности падающего излучения, малую детектируемую мощность и высокую термостабильность.

Выбор пьезоматериала ЧЭ ограничен соображениями необходимой прочности, упругости, высокого пьезомодуля, малой гистерезисности, температурной стабильности и точкой Кюри. К таким пьезоматериалам могут быть отнесены: титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ , ниобат лития  $\text{LiNbO}_3$  и цирконат-титанат свинца ЦТС-19  $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ . Материал эффективной поверхности ЧЭ с показателем преломления ( $n_3$ ) выбирается таким образом, чтобы относительно него в призме ( $n_1$ ) условие полного внутреннего отражения (ПВО) нарушалось раньше, чем относительно среды ( $n_2$ ) между призмой и ЧЭ, т. е.  $n_3 > n_2$  [10].

ППВО и ЧЭ с дополнительной массой могут быть изготовлены из кварца и пьезокерамики соответственно, что позволяет снизить дополнительную погрешность, обусловленную изменением конструктивных параметров МОЭМ-преобразователя при повышенных температурах и обеспечить высокую чувствительность во всем диапазоне измерений.

При определении размеров ППВО необходимо учитывать, что основание ППВО должно быть больше ширины эффективной оптической поверхности ЧЭ. Отметим, что расходимость и неравномерность оптического излучения, выходящего из ИИ, приводят к тому, что при увеличении расстояния между торцами световодов ИИ и ФП все меньшая часть излучения попадает на входной торец ФП. Количественно оптические потери в устройстве можно выразить через коэффициент использования излучения  $\eta$  [9, 10]:

$$\eta = 1 - \exp \left\{ -\beta \cdot \left( \frac{d_c}{2 \cdot a_T} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – постоянный коэффициент, зависящий от числовой апертуры и типа используемых световодов;  $a_T$  – расстояние между торцами световодов, измеряемое по ходу осевого луча;  $d_c$  – диаметр световодов.

При использовании световодов с большой числовой апертурой светораспределение на торце световода ИИ становится шире и параметр  $\beta$  будет уменьшаться. Для повышения коэффициента использования излучения  $\eta$  требуется устанавливать максимальное приближение торцов световодов ИИ и ФП друг к другу ( $d_c/a_T \rightarrow 1$ ), соответствующее минимально возможным размерам призм, определяемыми размером ЧЭ; для призмы необходимо использовать оптический материал с высокими показателями преломления [11].

## Критерии для определения диапазона рабочих зазоров

Угол падения излучения  $\theta$  на модулируемую поверхность необходимо выбирать таким, что при оптическом контакте призмы лишь с оптической поверхностью ЧЭ в нем нарушалось условие ПВО. Это значит, что угол ПВО  $\theta_1$  должен удовлетворять условию

$$\arcsin(n_2/n_1) < \theta_1 < \arcsin(n_3/n_1). \quad (2)$$

Для уменьшения оптических потерь излучения, которое способно достигнуть торца ФП, критерий подбора угла падения  $\theta$  определяется углом ПВО  $\theta_1$  и размерами призмы:

$$\theta = \theta_1 \pm \arctg\left(\frac{d_c}{2 \cdot a_T}\right). \quad (3)$$

Чувствительность преобразователя к наноперемещениям, вызванным измеряемой угловой скоростью, определяется производной отражательной способности  $R[d(\Omega_z), \lambda, \theta]$  структуры «ППВО – воздух – ЧЭ» по рабочему зазору  $d(\Omega_z)$  [12]:

$$S = \frac{\partial}{\partial d(\Omega_z)} R[d(\Omega_z), \lambda, \theta] \Big|_{\lambda, \theta = \text{const}}. \quad (4)$$

Отметим, что чувствительность  $S$  не постоянна в расчетном диапазоне измерения и меняется также от конструктивных параметров ( $d_0, \theta, \lambda$ ) (рис. 2). Проблема обеспечения квазилинейной функции преобразования, исходя из требуемого уровня чувствительности  $S$ , решается определением допустимого рабочего участка  $2\Delta d = d_{\text{макс}} - d_{\text{мин}}$ , где  $d_{\text{макс}}$  и  $d_{\text{мин}}$  – максимальный и минимальный зазоры между ППВО и ЧЭ. При этом допустимое уменьшение чувствительности  $S$  относительно максимального значения задается параметром  $n$ , т. е. до  $S = S_{\text{макс}}/n$ .

Основная погрешность МОЭМ-преобразователя зависит от диапазона изменения относительного зазора  $d_{\text{мин}}/\lambda \dots d_{\text{макс}}/\lambda$ , т. е. от того, какой участок  $2\Delta d$  выбран в качестве рабочего (рис. 3), и может определяться как

$$\delta_{\text{осн}} = \frac{2 \cdot R_{d_0}(d_0, \theta, \lambda) - R_{d_{\text{макс}}}(d_{\text{макс}}, \theta, \lambda) - R_{d_{\text{мин}}}(d_{\text{мин}}, \theta, \lambda)}{R_{d_{\text{макс}}}(d_{\text{макс}}, \theta, \lambda) - R_{d_{\text{мин}}}(d_{\text{мин}}, \theta, \lambda)} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Максимальная основная погрешность наблюдается при максимальных отклонениях конца ЧЭ, соответствующих максимальным величинам угловой скорости  $\Omega_z = \Omega_{\text{макс}}$ , т. е. концам диапазона изменения относительного зазора – точкам  $d_{\text{мин}}/\lambda$  и  $d_{\text{макс}}/\lambda$ . Для уменьшения основной погрешности целесообразно выбирать наиболее крутой участок  $2\Delta d$ .

Полученный ориентировочный диапазон изменения зазора  $d_{\text{макс}}$  и  $d_{\text{мин}}$  необходимо уточнить путем возможного возрастания основной погрешности в результате смещения начального зазора  $d_0$  и осевого угла падения  $\theta$ , отклонения геометрических параметров ЧЭ и дополнительных масс от номинальных значений. Для этого можно рассчитать характеристики МОЭМ-преобразователя при среднем квадратическом отклонении указанных параметров. В результате этой коррекции определяются окончательные значения максимального и минимального зазоров между ППВО и ЧЭ.

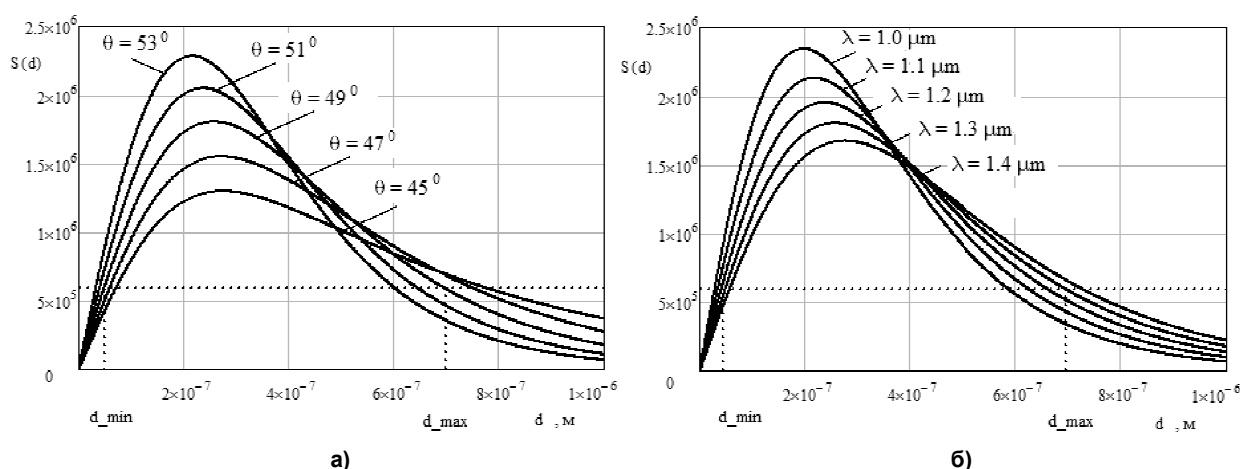


Рис. 2. Зависимости чувствительности МОЭМ-преобразователя от рабочего зазора при вариациях: а – угла падения  $\theta$  излучения, б – длины волны  $\lambda$ .

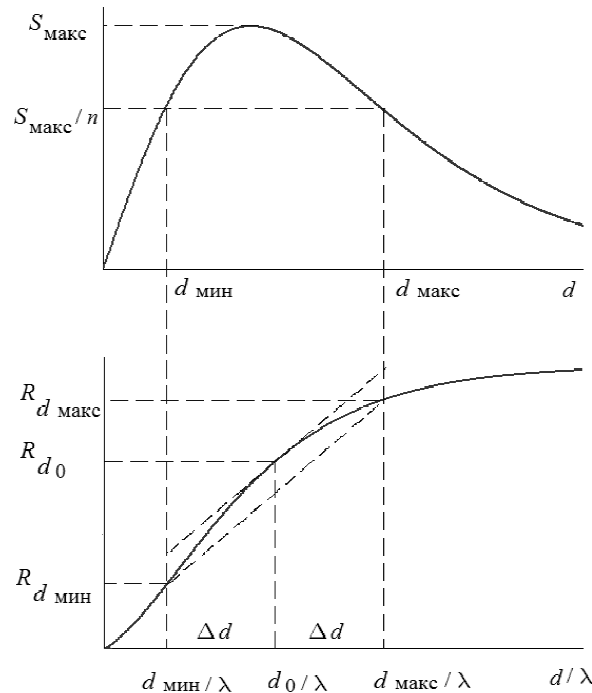


Рис. 3. К определению основной погрешности МОЭМ-преобразователя угловых скоростей

### Критерии определения геометрических параметров и дополнительной массы ЧЭ

При расчете МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ необходимо учитывать, что рабочий зазор  $d(\Omega_z)$  между основанием ППВО и ЧЭ не должен превышать длины волны оптического излучения и составляет сотни нанометров. Для обеспечения возможности функционирования МОЭМ-преобразователя амплитуды отклонений концов ЧЭ с учетом выбранного начального зазора  $d_0$  должны выбираться на основе скорректированного диапазона изменения зазора  $d_{\max}$  и  $d_{\min}$ , т. е. значения геометрических параметров  $l$ ,  $b$ ,  $h$  и дополнительной массы  $m$  ЧЭ удовлетворяют следующим условиям [13, 14]:

$$d_{\min} \leq \left\{ d_0 - \frac{3 \cdot \omega \cdot \rho \cdot d_{\text{обр}} \cdot U_{\text{возб}} \cdot m \cdot \Omega_z \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot h^2} \left[ \frac{l}{20} + \frac{m}{\rho \cdot h \cdot b} \right] \right\}_{\max} \leq d_{\max} \quad (6)$$

Величина длины  $l$  предварительно выбирается как можно меньшей, чтобы исключить вторую и выше формы изгиба ЧЭ, т. е. должно быть только угловое движение относительно точки закрепления ЧЭ, и удовлетворять ограничениям по габаритным показателям, но достаточной с точки зрения технологичности изготовления. Уменьшение величины длины ЧЭ  $l$  приводит к уменьшению амплитуды вынужденного колебания, что требует использования повышенного напряжения возбуждения.

Минимальные величины толщины  $h$  и ширины  $b$  ЧЭ ограничиваются механической жесткостью конструкции и размерами оптического пятна, образующегося на основании ППВО от тех лучей, которые, отразившись, попадают на торец световодов ФП. Этим требованиям предварительно удовлетворяют величины  $l$  в диапазоне 1...10 мм,  $h$  и  $b$  – в 10...200 мкм [15, 16].

Для увеличения чувствительности  $S$  МОЭМ-преобразователя могут быть введены дополнительные массы  $m$ , расположенные на двух концах ЧЭ. При этом следует учитывать, что если установить большую величину  $m$ , то эффективный диапазон измерения уменьшится, линейность функции преобразования ухудшится и в критическом случае возможно нарушение работоспособности устройства.

Получены зависимости дополнительной нелинейности функции преобразования от величины  $m$  по схемой одноканального считывания при следующих параметрах:  $\lambda = 1,3$  мкм,  $\theta = 51^\circ$ , и для ЧЭ:  $l = 5$  мм,  $b = 90$  мкм,  $h = 45$  мкм (рис. 4). Поэтому определение величины  $m$  ЧЭ ограничивается выполнением условия дополнительной линейности функции преобразования.

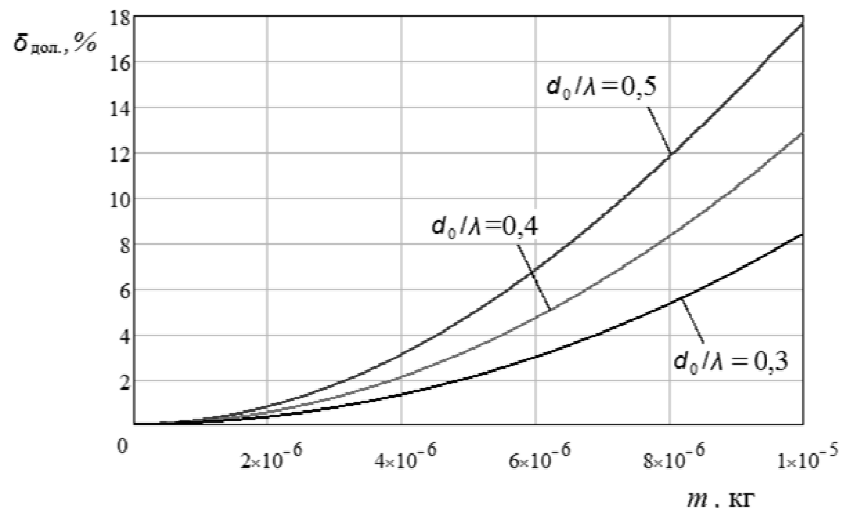


Рис. 4. Зависимости дополнительной нелинейности функции преобразования от дополнительной массы  $m$

Кроме того, при определении дополнительной массы  $m$  должно быть выполнено условие механической прочности по нормальным напряжениям  $\sigma_{\text{макс}}$  при максимальном перепаде моментов, действующих на ЧЭ [17, 18]:

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{M_{\Sigma \text{ макс}}}{W_{\text{С мин}}} < [\sigma], \quad (7)$$

где  $W_{\text{С мин}}$  – наименьшее значение момента сопротивления сечения ЧЭ;  $[\sigma] = \sigma_{\text{макс}}/n_{\sigma}$  – предельное допустимое напряжение,  $\sigma_{\text{макс}}$ ,  $n_{\sigma}$  – предел текучести и запас прочности материала ЧЭ, соответственно;  $M_{\Sigma \text{ макс}}$  – максимальное значение суммарного изгибающего момента, действующего на ЧЭ, который можно определить как

$$M_{\Sigma \text{ макс}} \approx \frac{\omega \cdot d_{\text{обр}} \cdot U_{\text{возб } m} \cdot l \cdot \Omega_Z}{2 \cdot E \cdot h^2} \left[ \frac{\rho \cdot b \cdot h \cdot l}{8} + m \right]. \quad (8)$$

С учетом ориентировочных геометрических параметров получим

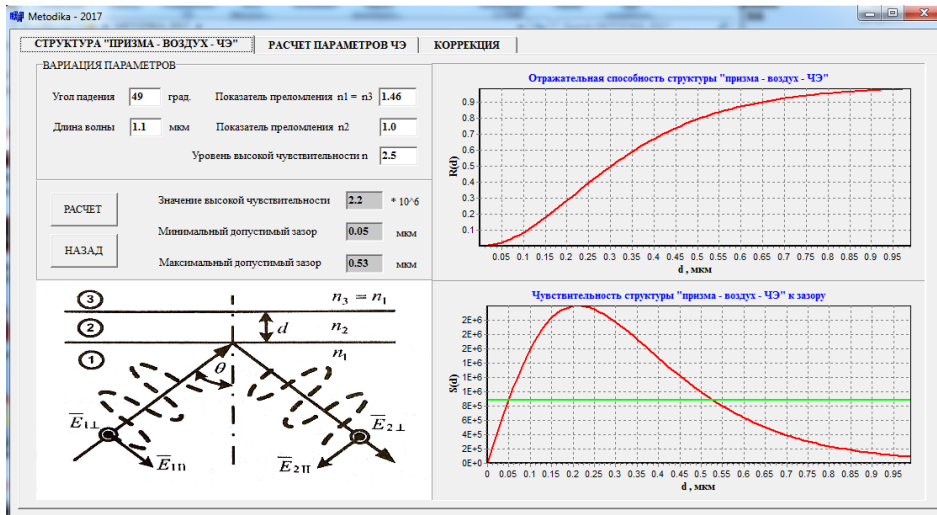
$$m \leq \frac{2 \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot W_{\text{С мин}} \cdot E \cdot h^2}{\omega \cdot d_{\text{обр}} \cdot U_{\text{возб } m} \cdot l \cdot \Omega_Z} - \frac{\rho \cdot b \cdot h \cdot l}{8}. \quad (9)$$

Назовем эти условия необходимыми критериями для подбора геометрических параметров и дополнительной массы ЧЭ МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. Определяемые параметры ЧЭ необходимо настраивать и корректировать путем проверки допустимой нелинейности функции преобразования, работоспособности прибора с учетом увеличения напряжения возбуждения и частоты колебания, воздействия ударно-линейных ускорений.

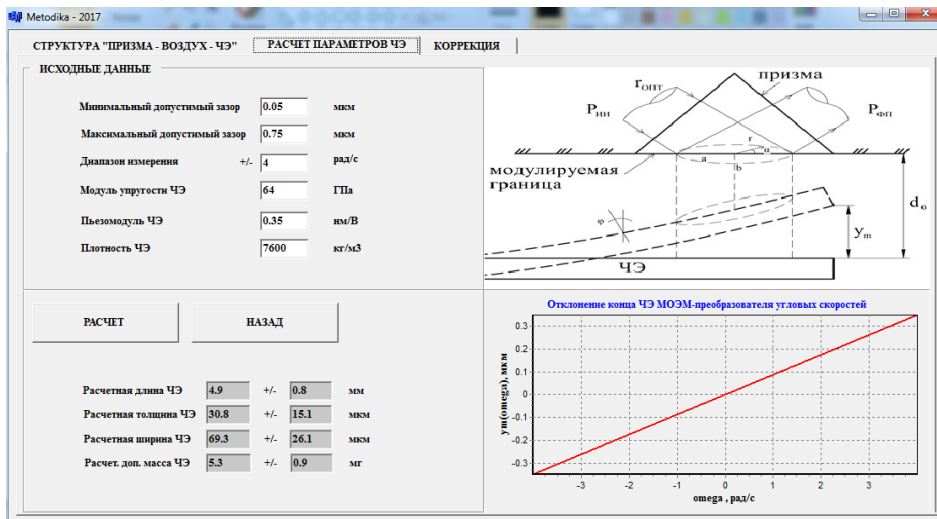
### Программное обеспечение и результаты моделирования расчета МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на ОТЭ

Разработано программное обеспечение в соответствии с алгоритмом расчета, по которому определяются основные параметры МОЭМ-преобразователя по заданным техническим требованиям (рис. 5).

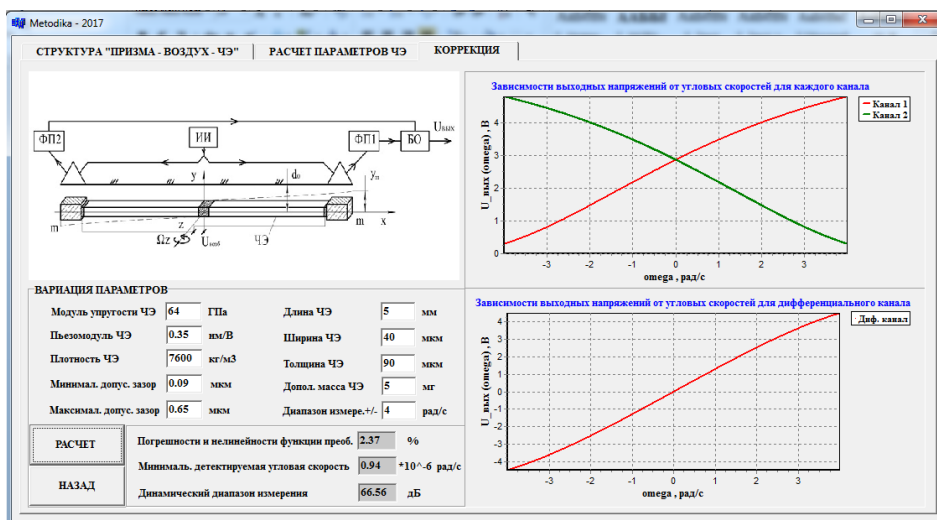
Для примера укажем, что для следующих исходных данных: материал ЧЭ – ЦТС-19 ( $E = 64$  ГПа,  $d_{\text{обр}} = 0,35$  нм/В,  $\rho = 7600$  кг/м<sup>3</sup>),  $n_1 = 1,46$ ,  $n_3 = 1,46$ ,  $n_2 \approx 1$ , диапазон измерения  $\pm 4$  рад/с, нелинейность функции преобразования не более 1,5 %, параметр  $n = 3$ , погрешность не более 1,5 % на расчетном диапазоне измерения, температурные погрешности не более 1 % на диапазоне  $-50$  °С...+80 °С получены: длина  $l = 5$  мм, толщина  $h = 40$  мкм и ширина ЧЭ  $b = 90$  мкм, соответственно;  $\theta = 49^\circ$ ;  $d_0 = 0,41$  мкм;  $\lambda = 1,1$  мкм.



а)



б)



в)

Рис. 5. Рабочие окна программного обеспечения: а – режим определения диапазона изменения зазора по заданному уровню чувствительности; б – режим расчета параметров по данным исходных требований; в – режим проверки и настраивания параметров

### Выводы

В представленной работе предложена методика расчета одноосевого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ по заданным техническим требованиям, включающая алгоритм и реализованное программное обеспечение. Получены основные формулы и критерии, позволяющие определить основные параметры такого прибора, которые удовлетворяют данным исходных требований.

Результаты численного моделирования доказывают возможность технической реализации конструкции МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. При измерении малой угловой скорости, как правило, такой прибор имеет квазилинейную функцию с высокой чувствительностью, хорошие массогабаритные показатели и уровень энергопотребления, что обеспечивает его конкурентоспособность с другими датчиками и также возможность эффективного применения в достаточно жестких условиях сильных электромагнитных помех.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447-а).

### Литература

1. Kostsov, E.G. *State and Prospects of Micro- and Nanoelectromechanics* / E.G. Kostsov // *Optoelectron., Instrum. Data Process.* – 2009. – Vol. 45 (3). – P. 189–226.
2. Дмитриев, С.А. *Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы* / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.
3. Jacopo, I. *Reliability of MEMS: A perspective on failure mechanisms, improvement solutions and best practices at development level* / I. Jacopo // *Displays.* – 2015. – Vol. 37. – P. 62–71. DOI: 10.1016/j.displa.2014.08.003
4. Ghodssi, R. *MEMS materials and processes handbook* / R. Ghodssi, P. Lin. – Springer, USA, 2011. – 1188 p. DOI: 10.1007/978-0-387-47318-5
5. *Трехосевой микро-опто-электро-механический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта* / В.И. Бусурин, А.Т. Фам, М.А. Жеглов, В.М. Медведев // *Автометрия.* – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 33–41. DOI: 10.15372/aut20170604
6. Шаранов, В.М. *Пьезоэлектрические датчики* / В.М. Шаранов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шаранова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Якушенко, Ю.Г. *Теория и расчет оптико-электронных приборов* / Ю.Г. Якушенко. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
8. Grattan, K.T.V. *Fiber optic sensor technology: an overview* / K.T.V. Grattan, T. Sun // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 2000. – Vol. 82, iss. 1-3. – P. 40–61. DOI: 10.1007/978-1-4757-6081-1\_1
9. Бусурин, В.И. *Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения* / В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоавтомиздат, 1990. – 256 с.
10. Борн, М. *Основы оптики: пер. с англ.* / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1983. – 721 с.
11. Удд, Э. *Волоконно-оптические датчики: пер. с англ.* / Э. Удд. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
12. Busurin, V.I. *Micro-opto-elctro-mechanical angular velocity transducer based on the optical tunneling effect* / V.I. Busurin, A.T. Pham // *Optoelectron., Instrum. Data Process.* – 2016. – Vol. 52 (2). – P. 210–215. DOI: 10.3103/s8756699016020151
13. Бусурин, В.И. *Волоконно-оптические информационно-измерительные системы* / В.И. Бусурин, Б.Г. Горшков, В.В. Коробков. – М.: МАИ, 2012. – 168 с.
14. Распопов, В.Я. *Микромеханические приборы* / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
15. Тимошенко, С.П. *Колебания в инженерном деле: пер. с англ.* / С.П. Тимошенко. – М.: КомКнига, 2007. – 440 с.
16. Liu, C. *Foundations of MEMS* / C. Liu. – 2<sup>nd</sup> edition. – Prentice Hall, USA, 2011. – 576 p.
17. Bose, A. *Modern inertial sensors and systems* / A. Bose, K.N. Bhat, P. Banerjee. – Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2014. – 425 p.
18. Jeroen, D.H. *Modeling and calibration of inertial and vision sensors* / D.H. Jeroen, B.S. Thomas, G. Fredrik // *The International Journal of Robotics Research.* – 2010. – Vol. 29, iss. 2-3. – P. 231–244. DOI: 10.1177/0278364909356812



**Бусурин Владимир Игоревич**, д-р техн. наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой систем автоматического и интеллектуального управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва; vbusurin@mai.ru.

**Фам Ань Туан**, аспирант кафедры систем автоматического и интеллектуального управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва; phamanhtuanlqd@gmail.com.

**Коробков Вадим Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматического и интеллектуального управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва; vvkor@bk.ru.

**Медведев Владимир Михайлович**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технических средств систем управления и контроля летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), генеральный директор, АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», г. Москва; vbusurin@mai.ru.

**Жеглов Максим Александрович**, канд. техн. наук, доцент, АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», г. Москва; mazheglov@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 февраля 2018 г.

DOI: 10.14529/ctcr180209

## THE METHOD FOR CALCULATING OF SINGLE-AXIS MICRO-OPTO-ELECTRO-MECHANICAL ANGULAR VELOCITY TRANSDUCER

V.I. Busurin<sup>1</sup>, vbusurin@mai.ru,  
A.T. Pham<sup>1</sup>, phamanhtuanlqd@gmail.com,  
V.V. Korobkov<sup>1</sup>, vvkor@bk.ru,  
V.M. Medvedev<sup>1, 2</sup>, vbusurin@mai.ru,  
M.A. Zheglov<sup>2</sup>, mazheglov@mail.ru

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup> JSC "State Scientific Research Institute of Instrument Making", Moscow, Russian Federation

The method for calculating of single-axis micro-opto-elctro-mechanical (MOEM) angular velocity transducer based on the optical tunneling effect (OTE) is conceived. This paper is created the algorithm and the software development that allows calculating transducer's basic parameters in providing of defined technical requirements

*Keywords: MOEM, angular velocity, transducer, method, characteristics, optical tunneling effect.*

### References

1. Kostsov E.G., State and Prospects of Micro- and Nanoelectromechanics. *Optoelectron., Instrum. Data Process*, 2009, vol. 45 (3), pp. 189–226.
2. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskie tekhnika: sovremennoe sostoyanie i novye perspektivy* [Fiber-Optical Technique: Advanced State and New Prospects]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010. 608 p.
3. Jacopo I. Reliability of MEMS: A Perspective on Failure Mechanisms, Improvement Solutions and Best Practices at Development Level. *Displays*, 2015, vol. 37, pp. 62–71. DOI: 10.1016/j.displa.2014.08.003
4. Ghodssi R., Lin P. *MEMS Materials and Processes Handbook*. USA, Springer, 2011. 1188 p. DOI: 10.1007/978-0-387-47318-5

5. Busurin V.I., Pham A.T., Zheglov M.A., Medvedev V.M. [Three-Axis Micro-opto-electro-mechanical Angular Velocity Transducer Based on the Optical Tunneling Effect]. *Avtometrya*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 33–41. (in Russ.) DOI: 10.15372/aut20170604
6. Sharanov V.M., Musienko M.P., Sharanova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric Sensors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 632 p.
7. Yakushenko Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-electronnykh priborov* [Theory and Calculating of the Opto-electronics Devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 360 p.
8. Grattan K. T. V., Sun T. Fiber Optic Sensor Technology: an Overview. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 82, iss. 1-3, pp. 40–61. DOI: 10.1007/978-1-4757-6081-1\_1
9. Busurin V.I., Nosov Yu.R. *Volokonno-opticheskie datchiki: fizicheskie osnovy, woprosi rascheta i pimeneniya* [Fiber-optical Sensors: Physical Basis, Calculating Questions and Applications]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 256 p.
10. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Principles of Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 721 p.
11. Udd E. *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber-optical Sensors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 520 p.
12. Busurin V.I., Pham A.T. Micro-opto-elctro-mechanical Angular Velocity Transducer Based on the Optical Tunneling Effect. *Optoelectron., Instrum. Data Process*, 2016, vol. 52 (2), pp. 210–215. DOI: 10.3103/s8756699016020151
13. Busurin V.I., Gorshkov B.G., Korobkov V.V. *Volokonno-opticheskie informatsionno-izmeritel'nye sistemy* [Fiber-optic Information-measuring Systems]. Moscow, MAI Publ., 2012. 168 p.
14. Paspopov V.Ya. *Micromekhanicheskie pribory* [Micromechanical Devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p.
15. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibration Problems in Engineering]. Moscow, KomKniga Publ., 2007. 440 p.
16. Liu C. *Foundations of MEMS*, 2<sup>nd</sup> edition. Prentice Hall, USA, 2011. 576 p.
17. Bose A., Bhat K.N., Banerjee P. *Modern Inertial Sensors and Systems*. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2014, 425,p.
18. Jeroen D.H., Thomas B.S., Fredrik G. Modeling and Calibration of Inertial and Vision Sensors. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, vol. 29, iss. 2-3, pp. 231–244. DOI: 10.1177/0278364909356812

*Received 27 February 2018*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Методика расчета одноосевого микро-опто-электро-механического преобразователя угловых скоростей / В.И. Бусурин, А.Т. Фам, В.В. Коробков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 93–102. DOI: 10.14529/ctcr180209

### FOR CITATION

Busurin V.I., Pham A.T., Korobkov V.V., Medvedev V.M., Zheglov M.A. The Method for Calculating of Single-Axis Micro-Opto-Electro-Mechanical Angular Velocity Transducer. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 93–102. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180209