

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Бусурин В.И.<sup>\*</sup>, Казарьян А.В.<sup>\*\*</sup>, Фам А.Т.<sup>\*\*\*</sup>

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

*<sup>\*</sup> e-mail: vbusurin@mai.ru*

*<sup>\*\*</sup> e-mail: kazaryan1@yadex.ru*

*<sup>\*\*\*</sup> e-mail: phamanhtuanlqd@gmail.com*

---

Рассмотрена модель структуры одноосевого микрооптоэлектромеханического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей. Воспринимающий элемент преобразователя представляет собой микроэлектронный механический элемент, работающий на основе оптического туннельного эффекта и использующий эффект Кориолиса для преобразования угловой скорости в перемещение специальной чувствительной структуры. Также рассчитано влияние силы Кориолиса на отклонение чувствительного элемента в зависимости от различных конструктивных факторов, выбран соответствующий пьезоматериал. Исследуются и сравниваются с предыдущим вариантом характеристики чувствительного элемента с дополнительной массой.

*Ключевые слова:* первичный преобразователь, пьезокерамика, микрооптоэлектромеханическая система, оптическое туннелирование, функция преобразования, сила Кориолиса.

---

### Введение

Микроэлектромеханические (МЭМ) преобразователи угловой скорости находят широкое применение в устройствах определения местоположения, системах управления самолетов. Такие преобразователи, измеряющие угловые скорости вокруг одной или нескольких осей, естественно дополняют микроэлектромеханические акселерометры. Благодаря комбинации акселерометров и преобразователей угловой скорости появляется возможность отследить и зафиксировать движение в трехмерном пространстве. Это позволяет создавать более совершенные пользовательские интерфейсы, малогабаритные навигационные системы и т.п.

Использование данных преобразователей угловой скорости на летательных аппаратах позволяет на порядок уменьшить габариты, массу, энергопотребление приборов и в результате значительно снизить цену навигационной системы в целом. Надежность и точность в управлении широким спектром самолетов, вертолетов и других летательных аппаратов при этом может увеличиваться. Таким образом, данный вид преобразователей угловой скорости оптимально подходит для использования в ситуации, когда есть ограничения по габаритам,

массе и стоимости изделия. Однако для повышения помехозащищенности таких преобразователей желательно использовать каналы различной физической природы: для обеспечения автоколебательного режима чувствительного элемента (ЧЭ) и для съема измерительной информации об угловой скорости. Если возбуждать автоколебания с помощью традиционных схем на основе пьезоэлектрических элементов, а для съема информации об угловой скорости применять оптоэлектронные методы, обладающие повышенной чувствительностью к микроперемещениям, получим МОЭМ-преобразователь угловой скорости. Высокочувствительные оптоэлектронные схемы съема информации об угловой скорости могут быть построены на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Полный диапазон измеряемых перемещений составляет порядка сотен нанометров.

### 1. Продольное колебание чувствительного элемента МОЭМ-преобразователя

В конструкцию МОЭМ-преобразователя угловой скорости должен входить пьезоэлемент, который предназначен для преобразования электричес-

ких колебаний в упругие (обратный пьезоэлектрический эффект) или упругих колебаний в электрические (прямой пьезоэлектрический эффект). Материал и размеры пьезоэлемента должны быть такими, чтобы результирующие отклонения его частей составляли сотни нанометров.

Исследуем поведение простейшего чувствительного элемента МОЭМ-преобразователя в виде двусторонней консоли без дополнительной массы, которая схематично показана на рис. 1. Двусторонняя консоль представляет собой пьезокерамическую пластину, закрепленную в центре.

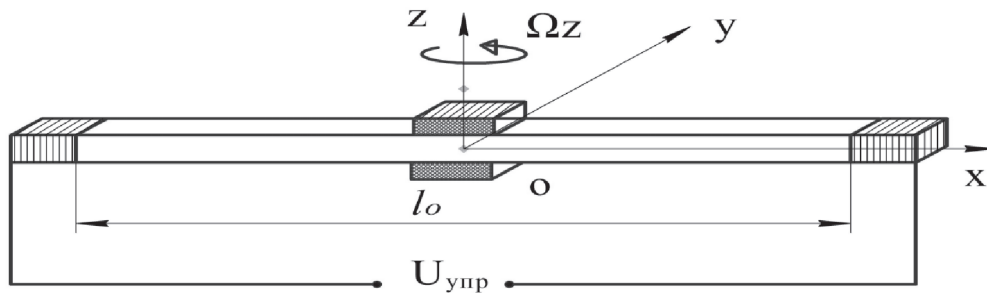


Рис. 1. Модель одноосевого ЧЭ преобразователя угловой скорости без дополнительной массы

Пусть расстояние между двумя электродами управляющего электрического поля без приложения электрического поля равно  $l_0$ . При приложении к чувствительному элементу управляющего переменного напряжения  $U_{упр} = 200$  В, например частотой  $f = 300$  кГц, за счет обратного пьезоэлектрического эффекта изменятся размеры пьезоэлектрика, помещенного в электрическое поле. Относительная деформация пьезоэлектрика  $\xi$  в электрическом поле с напряженностью  $E_{упр}$  рассчитывается из выражения [1]

$$\xi = \frac{d_{max}}{l_0} = d_{обр} E_{упр}, \tag{1}$$

где  $d_{обр}$  — пьезомодуль обратного пьезоэффекта, м/В;  $d_{max} = l - l_0$  — удлинение ЧЭ.

Так как к пьезоэлектрику приложено переменное электрическое поле  $E_{упр} = U_{упр} / l$  с частотой  $f$ , то в материале возникают переменные деформации с той же частотой. Таким образом, продольная деформация двух концов записывается в виде

$$d_{конец} = \frac{d_{max}}{2} \sin(2\pi ft) = d_{обр} U_{упр} \frac{l_0}{2l} \sin(2\pi ft). \tag{2}$$

Полагая, что пластина однородна и закреплена в середине, продольную деформацию элементов пластины вдоль оси  $Ox$  определяем из выражения

$$d_x = \frac{2x}{l_0} d_{конец} = d_{обр} U_{упр} \frac{x}{l} \sin(2\pi ft). \tag{3}$$

На рис. 2 показана зависимость амплитуды продольного колебания ЧЭ МОЭМ-преобразователя от координат  $Ox$ , с длиной ЧЭ  $l = 10$  мм при возбуж-

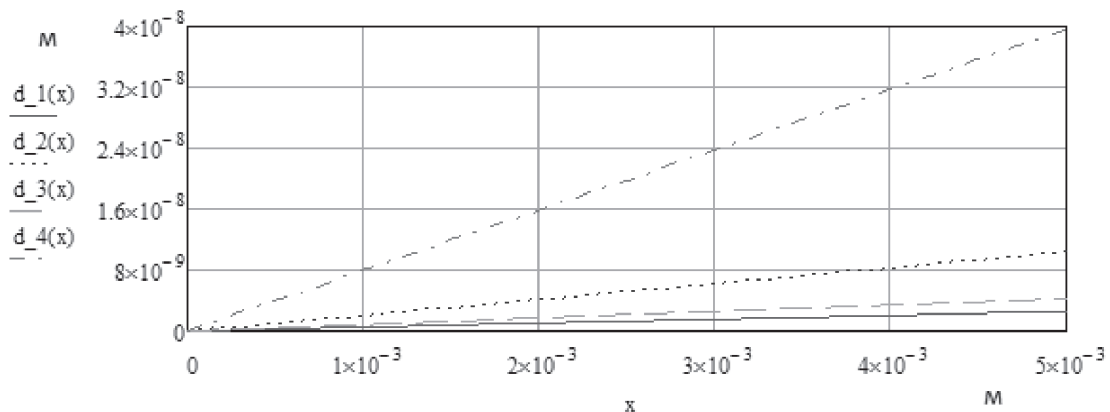


Рис. 2. Зависимость амплитуды продольного колебания ЧЭ от координаты по оси  $Ox$  для различных материалов:  $d_1(x)$  — ЦТС-19;  $d_2(x)$  —  $BaTiO_3$ ;  $d_3(x)$  —  $SiO_2$ ;  $d_4(x)$  —  $LiNbO_3$

дении колебаний управляющим переменным напряжением  $U_{\text{упр}} = 200$  В с частотой  $f = 300$  кГц для различных пьезокерамических материалов: цирконата-титаната свинца ЦТС-19, титаната бария  $\text{BaTiO}_3$ , кварца  $\text{SiO}_2$  и ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ .

При рабочей температуре  $T$ , меньшей температуры точки Кюри  $T_k$ , амплитуда продольной деформации по оси  $OX$  линейна за счет возбуждения колебаний управляющим переменным электрическим напряжением  $U_{\text{упр}}$ . Максимальное значение амплитуды конца ЧЭ МОЭМ-преобразователя равно 40 нм. ЧЭ изготовлен из цирконата-титаната свинца ЦТС-19.

## 2. Определение силы Кориолиса и отклонений ЧЭ МОЭМ-преобразователя

Рассматриваемый МОЭМ-преобразователь угловой скорости является твердотельным устройством с вибрационной консолью, которая имеет возможность отклоняться. Он позволяет определять величину и направление угловой скорости благодаря использованию эффекта силы Кориолиса. Во время вращения МОЭМ-преобразователя силы Кориолиса действуют на пьезокерамический чувствительный элемент и отклоняют консоль по оси  $OY$ , расположенной в плоскости колебаний и направленной перпендикулярно оси  $OX$ . На рис. 3 показано действие силы Кориолиса на ЧЭ МОЭМ-преобразователя и её направление, перпендикулярное оси  $OX$ .

Сила Кориолиса, действующая на элемент  $dx$ , определяется формулой [2]

$$dF_c = 2dm_x v_x \Omega_z, \quad (4)$$

где  $dm_x = \rho b_m h_m dx$  — масса элемента;  $v_x$  — скорость элемента;  $\Omega_z$  — угловая скорость относительно оси  $OZ$ , вызывающая силу Кориолиса, рад/с.

С учётом (3) скорость колебания элемента пластины равна

$$v_x = \frac{\partial d_x}{\partial t} = d_{\text{обр}} U_{\text{упр}} \frac{x}{l} 2\pi f \cos(2\pi ft). \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$dF_c = \rho b_m h_m d_{\text{обр}} U_{\text{упр}} \frac{4\pi f}{l} x dx \cos(2\pi ft) \Omega_z. \quad (6)$$

Интегрируем уравнение (6) для получения силы:

$$F_c = \rho b_m h_m d_{\text{обр}} U_{\text{упр}} \frac{2\pi x^2 f}{l} \cos(2\pi ft) \Omega_z. \quad (7)$$

Сила Кориолиса линейно пропорциональна измеряемой угловой скорости и достигает максимального значения на конце ЧЭ. На рис. 4 приведены численные значения силы  $F_c$ , действующей вдоль оси  $OX$  на ЧЭ с размерами: длина  $l = 10$  мм, толщина  $h_m = 50$  мк, ширина  $b_m = 1$  мм, при возбуждении колебаний управляющим переменным напряжением  $U_{\text{упр}} = 200$  В с частотой  $f = 300$  кГц. ЧЭ изготовлены из различных пьезокерамических материалов: цирконата-титаната свинца ЦТС-19, титаната бария  $\text{BaTiO}_3$ , кварца  $\text{SiO}_2$  и ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ . Максимальное значение силы в диапазоне измеряемых угловых скоростей равно  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Н для ЦТС-19 при  $\Omega_z = 4$  рад/с на концах ЧЭ МОЭМ-преобразователя.

Сила Кориолиса изменяется с частотой, равной частоте возбуждения колебаний  $f$ , и квадратично зависит от координаты вдоль оси  $OX$ . В точке  $O$  скорость элемента равняется  $v_x|_{x=0} = 0$ , поэтому

$F_c|_{x=0} = 0$ . Эюра силы Кориолиса вдоль консоли приведена на рис. 5.

Сила  $F_c$  является распределенной и симметричной относительно центра (точка  $O$ ).

Балка, в общем случае, прогибается под воздействием распределенной силы. Деформация балки представлена на рис. 6.

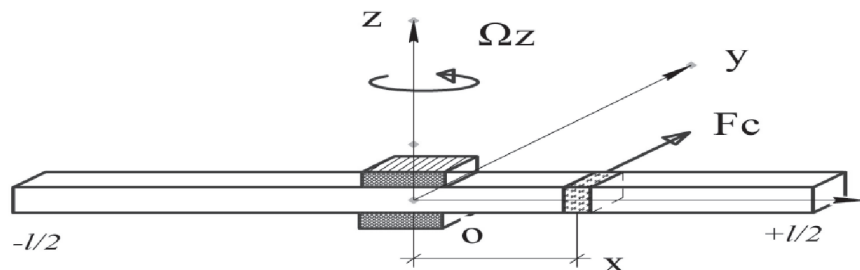


Рис. 3. Сила Кориолиса, действующая на ЧЭ МОЭМ-преобразователя

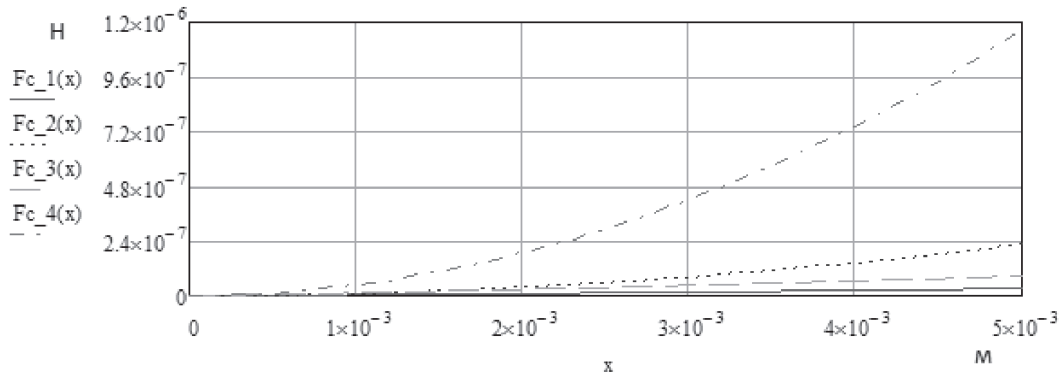


Рис. 4. Сила Кориолиса, действующая вдоль оси  $OX$  на ЧЭ, изготовленные из различных материалов:  $F_{1(x)}$  — ЦТС-19;  $F_{2(x)}$  —  $BaTiO_3$ ;  $F_{3(x)}$  —  $SiO_2$ ;  $F_{4(x)}$  —  $LiNbO_3$

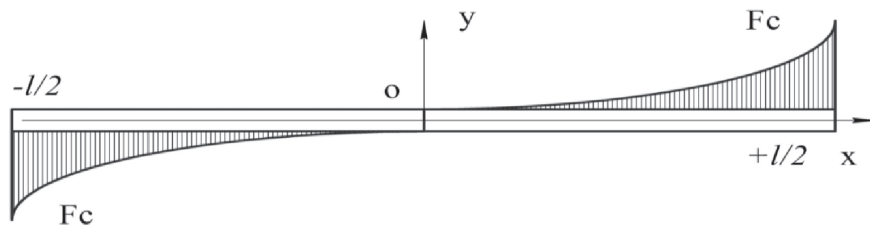


Рис. 5. Эпюры силы Кориолиса

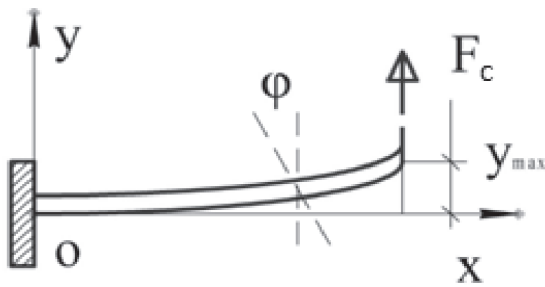


Рис. 6. Деформация балки при плоском изгибе

Прогиб балки в данной точке является функцией координаты вдоль оси  $OX$  и может быть записан в виде [3]

$$y = \iint \frac{M_x}{EJ_x} dx + C_1x + D_1, \quad (8)$$

где  $E$  — модуль упругости материала (Юнга);  $M_x$  — изгибающий момент;  $J_x$  — осевой момент инерции поперечного сечения;  $C_1, D_1$  — постоянные интегрирования (для нашего варианта  $C_1 = 0, D_1 = 0$ ).

Таким образом, отклонение ЧЭ МОЭМ-преобразователя под действием силы Кориолиса можно записать в виде

$$y = \frac{\pi f \rho d_{обр} U_{упр}}{Eh^2_m} \left( \frac{24x^5}{5l} - 8x^4 + 4lx^3 \right) \cos(2\pi ft) \Omega_z. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что отклонение ЧЭ МОЭМ-преобразователя угловой скорости зависит от его конструктивных параметров. На рис. 7 представлены зависимости отклонения конца ЧЭ, изготовленных из различных материалов, от толщины

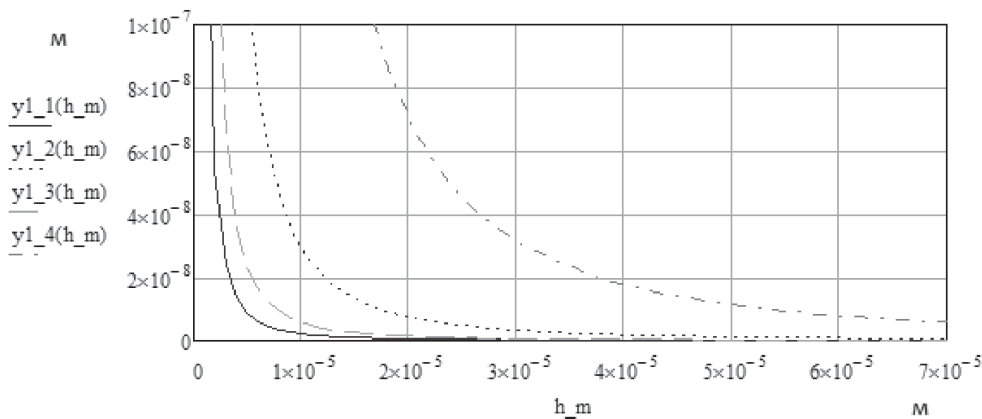


Рис. 7. Зависимость отклонения конца ЧЭ от его толщины для различных материалов:  $y_{1_1}(h_m)$  — ЦТС-19;  $y_{1_2}(h_m)$  —  $BaTiO_3$ ;  $y_{1_3}(h_m)$  —  $SiO_2$ ;  $y_{1_4}(h_m)$  —  $LiNbO_3$

при длине  $l = 10$  мм и измеряемой угловой скорости  $\Omega_z = 4$  рад/с.

Наибольшее отклонение (12 нм) — у конца ЧЭ, изготовленного из цирконата-титаната свинца ЦТС-19; отклонения меньше 2 нм — у концов ЧЭ, изготовленных из других пьезоматериалов: титаната бария  $BaTiO_3$ , кварца  $SiO_2$  и ниобата лития  $LiNbO_3$ . Отклонения ЧЭ нелинейно зависят от его толщины и сильно возрастают при её уменьшении: при толщине 50 мкм отклонение равно 12 нм для цирконата-титаната свинца ЦТС-19, а при уменьшении толщины до значения 20 мкм отклонение достигает значения 76 нм, и аналогично для остальных материалов. Определены зависимости отклонения конца консоли от другой конструктивной величины — длины  $l$  при толщине  $b_m = 50$  мкм и измеряемой угловой скорости  $\Omega_z = 4$  рад/с (рис. 8).

Зависимость отклонения от длины нелинейная. Показано, что с увеличением длины консоли уве-

личивается отклонение. В рассматриваемом случае отклонения консоли длиной  $l = 10$  мм составляют 12 нм для материала ЦТС-19, меньше 1,5 нм — для остальных материалов.

В МОЭМ-преобразователях угловой скорости применяются высокочувствительные оптоэлектронные схемы съема информации об угловой скорости, построенные на основе оптического туннельного эффекта. Поэтому обеспечивается высокая чувствительность при малых диапазонах угловых скоростей. На рис. 9 показана зависимость от измеряемой угловой скорости отклонения конца ЧЭ, изготовленных из различных материалов. Анализ показывает, что отклонение конца ЧЭ линейно изменяется от приложения измеряемой угловой скорости в рабочем диапазоне температуры. Максимальное значение отклонения ЧЭ МОЭМ-преобразователя равно 39 нм (материал ЦТС-19) при  $\Omega_z = 4$  рад/с на двух его концах.

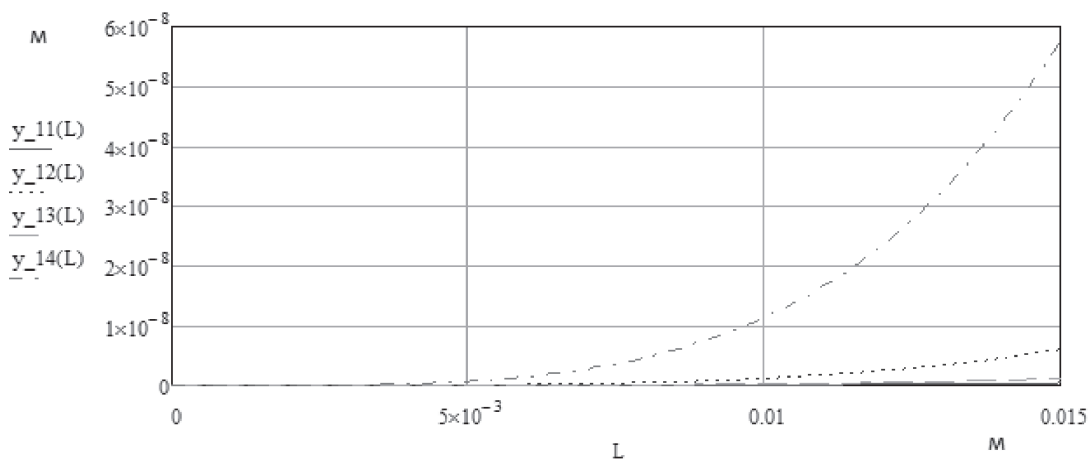


Рис. 8. Зависимость отклонения конца ЧЭ от длины для различных материалов:  $y_{11}(L)$  — ЦТС-19;  $y_{12}(L)$  —  $BaTiO_3$ ;  $y_{13}(L)$  —  $SiO_2$ ;  $y_{14}(L)$  —  $LiNbO_3$

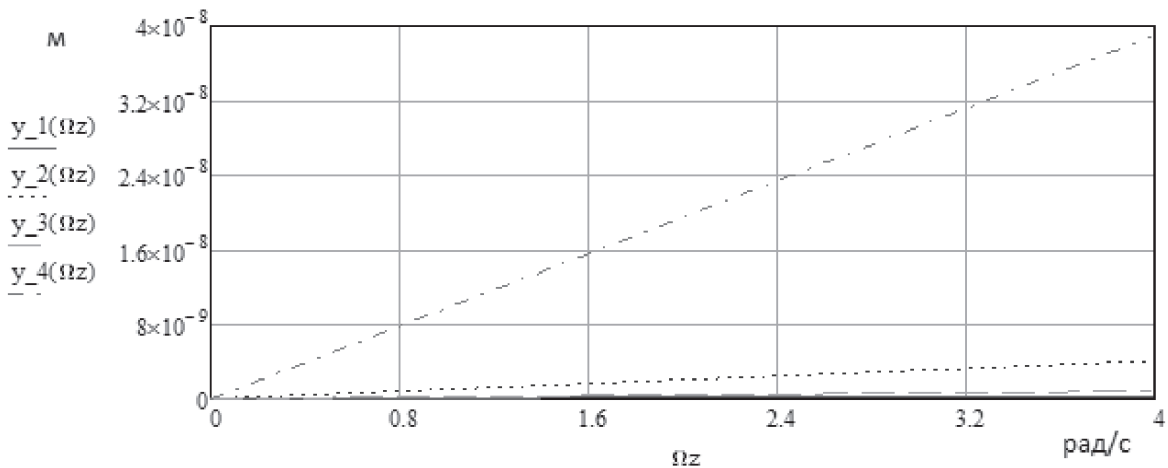


Рис. 9. Зависимость отклонения конца ЧЭ от измеряемой угловой скорости для различных материалов:  $y_1(\Omega_z)$  — ЦТС-19;  $y_2(\Omega_z)$  —  $BaTiO_3$ ;  $y_3(\Omega_z)$  —  $SiO_2$ ;  $y_4(\Omega_z)$  —  $LiNbO_3$

### 3. Определение отклонения чувствительного элемента МОЭМ-преобразователя с применением дополнительной массы

Для увеличения чувствительности МОЭМ-преобразователя угловой скорости может быть введена дополнительная масса  $m$ , расположенная, например, на двух концах ЧЭ. В этом случае прогиб ЧЭ под действием угловой скорости зависит также и от дополнительной массы. При этом следует учитывать, что если установить очень большую дополнительную массу, то диапазон измерения угловой скорости уменьшится, линейность преобразования ухудшится и, в критическом случае, возможно разрушение ЧЭ. Конструкция ЧЭ с дополнительной массой показана на рис. 10.

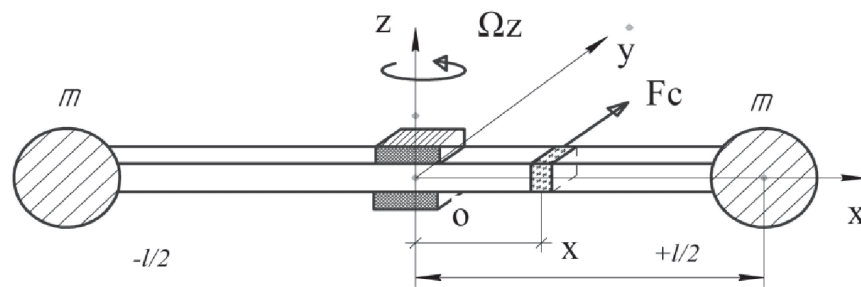


Рис. 10. ЧЭ МОЭМ-преобразователя угловой скорости с дополнительной массой  $m$

Для того чтобы не возникала продольная деформация под действием управляющего электрического поля дополнительной массы, используемая дополнительная масса не должна быть изготовлена из пьезоматериалов.

В этом случае скорость колебания массы равна скорости конца консоли без дополнительной массы:

$$v_m = \left. \frac{\partial d_x}{\partial t} \right|_{\text{конец}} = d_{\text{обр}} U_{\text{упр}} \frac{2\pi l_0 f}{l} \cos(2\pi f t). \quad (10)$$

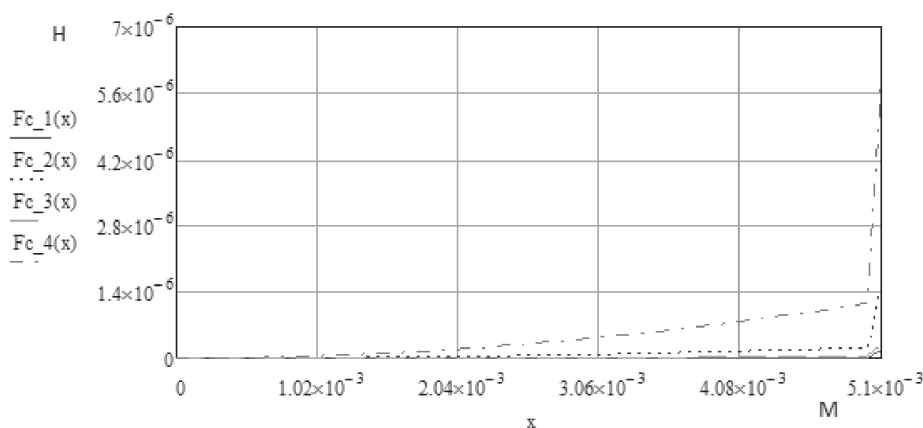


Рис. 11. Сила Кориолиса, действующая на ЧЭ, изготовленные из различных материалов, в случае применения дополнительной массы  $m$ :  $F_{c\_1}(x)$  — ЦТС-19;  $F_{c\_2}(x)$  — BaTiO<sub>3</sub>;  $F_{c\_3}(x)$  — SiO<sub>2</sub>;  $F_{c\_4}(x)$  — LiNbO<sub>3</sub>

Сила Кориолиса определяется формулой

$$F_{c/m} = \begin{cases} \rho b_m h_m d_{\text{обр}} U_{\text{упр}} \frac{2\pi x^2 f}{l} \cos(2\pi f t) \Omega_z, & \text{если } x < \frac{l}{2}; \\ m d_{\text{обр}} U_{\text{упр}} \frac{4\pi l_0 f}{l} \cos(2\pi f t) \Omega_z, & \text{если } x = \frac{l}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 11 приведены графики зависимости силы Кориолиса, действующей на ЧЭ с дополнительной массой  $m = 5 \cdot 10^{-6}$  кг, от длины консоли, изготовленной из различных материалов. Их анализ показывает, что дополнительная масса сильно влияет на значение силы Кориолиса. Такой подход

обеспечивает получение больших отклонений ЧЭ при измерении малых угловых скоростей.

Таким образом, сила Кориолиса воздействует на массу  $m$  во много раз сильнее, чем на конец ненагруженной консоли. Поэтому такой перепад приводит к значительному увеличению отклонения ЧЭ по оси  $OY$ .

Следовательно, отклонение ЧЭ МОЭМ-преобразователя с дополнительной массой можно определить как

$$y_m = \frac{\pi \rho f d_{\text{обр}} U_{\text{упр}}}{E h^2 m} \times \left[ \left( \frac{24x^5}{5l} - 8x^4 + 4kx^3 \right) + \frac{3m l l_0^2}{\rho h_m b_m} \right] \cos(2\pi f t) \Omega_z. \quad (12)$$

Рассмотрим различные характеристики ЧЭ, нагруженного дополнительной нагрузкой, и сравним с предыдущим вариантом при размерах  $10 \times 1 \times 0,05$  мм и возбуждении таким же управляющим переменным напряжением  $U_{\text{упр}} = 200$  В с частотой  $f = 300$  кГц. На рис. 12 представлена зависимость отклонения конца ЧЭ от дополнительной массы при измеряемой угловой скорости  $\Omega_z = 4$  рад/с для различных материалов.

Очевидно, что конструкция с дополнительной массой  $m$  обеспечивает больший изгиб ЧЭ. При одинаковых размерах, материалах и дополнительной массе  $m = 10 \cdot 10^{-6}$  кг отклонение составляет 1,5 мкм, что в несколько десятков раз больше, чем в случае без дополнительной массы  $m$  (около 4 нм).

Поэтому такой метод обеспечивает повышение чувствительности ЧЭ. На рис. 13 представлена зависимость отклонения конца ЧЭ от измеряемой угловой скорости в случае применения дополнительной массы  $m = 5 \cdot 10^{-6}$  кг.

Измеряемая угловая скорость  $\Omega_z$  вызывает изменение зазора  $d$  между чувствительным элементом и оптической призмой ЧЭ, а значит, вызывает изменение эффективного показателя преломления  $n_z$ . Это фиксируется на выходе преобразователя, что потенциально обеспечивает получение оптических выходных сигналов, пропорциональных угловой скорости  $\Omega_z$ .

**Выводы**

Исследованы характеристики МОЭМ-преобразователя угловой скорости. Выбраны конструктивные параметры ЧЭ преобразователя для получения отклонения ЧЭ в желательном диапазоне перемещений. Показано, что численные значения отклонений могут быть получены в пределах долей мик-

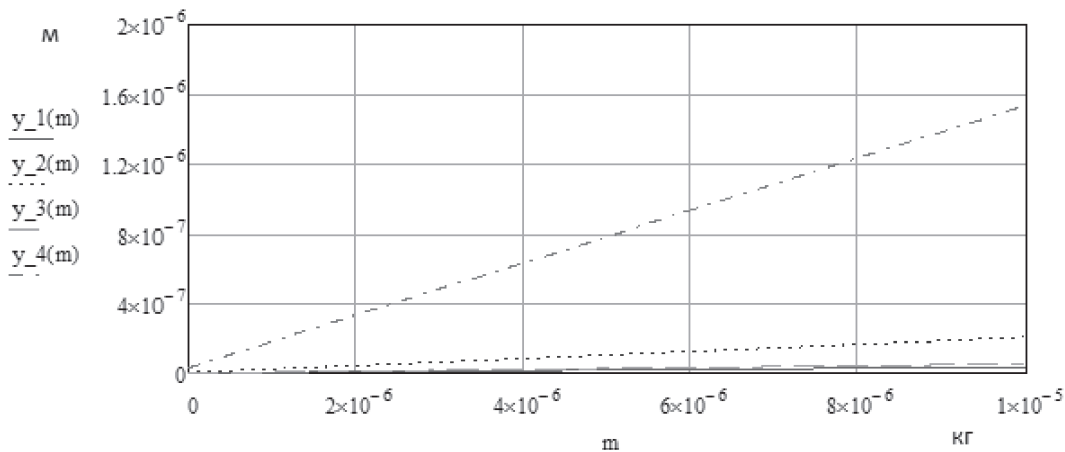


Рис. 12. Зависимость отклонения конца ЧЭ от дополнительной массы для различных материалов:  $y_1(m)$  — ЦТС-19;  $y_2(m)$  — BaTiO<sub>3</sub>;  $y_3(m)$  — SiO<sub>2</sub>;  $y_4(m)$  — LiNbO<sub>3</sub>

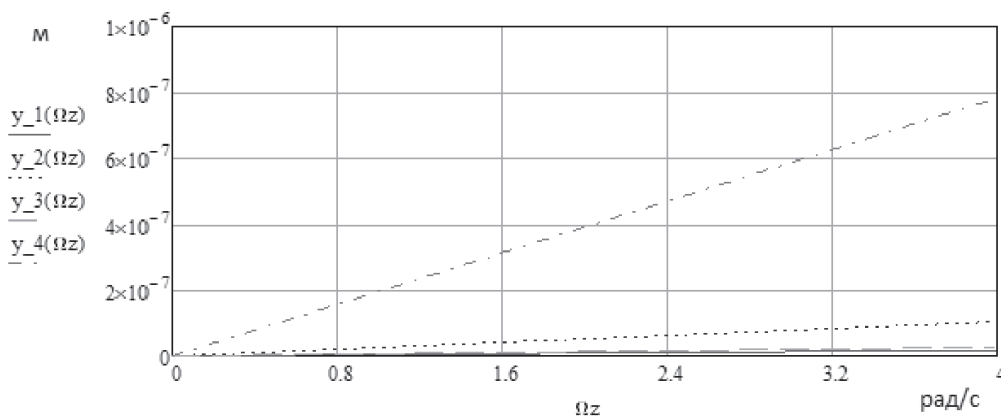


Рис. 13. Зависимость отклонения конца ЧЭ с дополнительной массой от измеряемой угловой скорости для различных материалов:  $y_1(\Omega_z)$  — ЦТС-19;  $y_2(\Omega_z)$  — BaTiO<sub>3</sub>;  $y_3(\Omega_z)$  — SiO<sub>2</sub>;  $y_4(\Omega_z)$  — LiNbO<sub>3</sub>

рометров, соответствующих по порядку длине волны оптического излучения. Поэтому преобразователь угловой скорости можно создать на основе оптического туннельного эффекта, который обеспечивает большую чувствительность при измерении малой угловой скорости.

Из анализа приведённых характеристик следует, что материал марки ЦТС-19 обладает высокой пьезохарактеристикой и стабильностью в рабочих диапазонах температур и давлений и может быть использован в МОЭМ-преобразователях угловой скорости на основе ОТЭ.

Показано, что для повышения чувствительности МОЭМ-преобразователя угловой скорости не-

обходимо применять дополнительную массу, интегрированную с ЧЭ.

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

#### Библиографический список

1. Шаранов В.М., Мусиенко М.П., Шаранова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — М.: Техносфера, 2006. — 636 с.
2. Бусурин В.И., Можяев В.А., Шеленков В.М. Сенсорные технологии. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 92 с.
3. Горшков А.Г., Трошин В.И., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов. — М.: Физматлит, 2005. — 544 с.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF OPTICAL MICRO ELECTROMECHANICAL ANGULAR VELOCITY SENSOR

**Busurin V.I.\* , Kazar'yan A.V.\*\* , Pham A.T.\*\*\***

*Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

*\* e-mail: vbusurin@mai.ru*

*\*\* e-mail: kazaryan1@yadex.ru*

*\*\*\* e-mail: phamanhtuanlqd@gmail.com*

#### Abstract

The article describes optical micro electromechanical (MOEM) angular velocity transducer, representing a solid-state device having vibration console, with the ability to deviate. This transducer allows determine magnitude and direction of angular velocity by using Coriolis force effect and optical information reading. Coriolis force is acting on the piezoceramic sensitivity element during rotation of the MOEM transducer, causing its deviation over the axis, positioned on vibration plane and directed perpendicular to the plane along the longitudinal axis of the console.

Material and dimensions of sensitive piezoelectric element (SE) should be such that the resulting deflection of its parts does not exceed hundreds of nanometers. The highly sensitive optoelectronic circuit for information retrieval about angular velocity with the purpose of obtaining more accurate information should be herewith based on optical tunneling effect (OTE), allowing fixation of a small measured displacements.

The structural model of uniaxial MOEM angular velocity transducer is described. The impact of the Coriolis force on SE is calculated depending on various design parameters and piezoelectric materials. For a SE

in the form of a plate deflection has no strong dependence upon the temperature, and vibration element longitudinal oscillations amplitude linearly depends on the coordinate along the longitudinal axis and exciting AC voltage.

Simulation results showed that numerical values of the deviations can be obtained within the range of several hundred nanometers, which corresponds to the value of the optical radiation wavelength. Thus, angular velocity transducer can be designed on the basis of optical tunneling effect, which provides greater sensitivity when measuring small angular velocity.

The above characteristics analysis shows that the material with the brand ZTC-19 having larger piezoelectric module and higher stability within the working range of temperatures and pressures, can be used in MOEM angular velocity transducer based on OTE.

We examined characteristics of the transducer, using SE with additional mass to improve its sensitivity. With structural dimensions decreasing it is necessary herewith to increase the value of additional mass to provide greater sensitivity for measuring small angular velocities.



With the same sizes and materials introduction of additional mass  $m = 5 \cdot 10^{-6}$  kg, SE end deviation under the influence of the measured angular velocity will be  $1,5 \mu\text{m}$ , which is hundred times greater than in the case without the additional mass  $m$ . It also provides the possibility of organizing an optical information reading by means of optical tunneling.

**Keywords:** transducer, piezoceramic, optical micro electromechanical systems, optical tunneling effect, conversion function.

## References

1. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki* (Piezoelectric sensors), Moscow, Tekhnosfera, 2006, 636 p.
2. Busurin V.I., Mozhaev V.A., Shelenkov V.M. *Sensornye tekhnologii* (Sensor technology), Moscow, MAI, 2013, 92 p.
3. Gorshkov A.G., Troshin V.I., Shalashilin V.I. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials), Moscow, Fizmatlit, 2005, 544 p.