

таблице данные для  $\Delta\sigma_{\text{осн}}$ ,  $\Delta\mu_{\text{осн}}$ . В процессе нанесения покрытий на основания следует также опираться на данные для  $\Delta\sigma_n$  и контролировать этот параметр с помощью сертифицированных СИ. Использование таких мер позволит обеспечить достоверность результатов поверки. Таким образом, проведённые исследования подтвердили необходимость учёта электрофизических свойств объектов контроля при измерении толщины покрытий.

#### Л и т е р а т у р а

1. **Сясько В. А.** Теория и методы создания электромагнитных приборов контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Константа, 2015.

2. **ISO 21968:2005.** Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials — Measurement of coating thickness — Phase-sensitive eddy-current method.

3. **Потапов А. И., Сясько В. А., Соломенчук П. В., Ивкин А. Е., Чертов Д. Н.** Монография: Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Том 1: Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Нестор-История, 2014. 480 с.

4. **ГОСТ 9.302—88.** ЕСЗКС. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.

5. **Федеральный** информационный фонд по обеспечению единства измерений. [Официальный сайт] <http://www.fundmetrology.ru/default.aspx> (дата обращения: 23.12.2016).

Дата принятия: 16.01.2017.

681.586.5

## Методы расширения диапазона измерения микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей

**В. И. БУСУРИН<sup>1</sup>, М. А. ЖЕГЛОВ<sup>2</sup>, В. В. КОРОБКОВ<sup>1</sup>, А. Т. ФАМ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Россия, e-mail: vbusurin@mail.ru

Разработаны методы расширения диапазона измерения микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта и алгоритм формирования выходных оптических сигналов. Определена аппроксимирующая функция зависимости длительности выходного импульса микрооптоэлектромеханического преобразователя от угловой скорости.

**Ключевые слова:** МОЭМ, угловая скорость, преобразователь, динамическое управление, диапазон измерения.

The methods for expanding the measurement range of microopto-electromechanical (MOEM) angular velocity transducer based on optical tunneling effect (OTE) are developed. Approximating function of dependence of the output pulse duration of MOEM transducer upon angular velocity is determined.

**Key words:** MOEM, angular velocity, transducer, dynamic control, measurement range.

В современных системах навигации и управления подвижными объектами для определения угловой скорости часто используют вибрационные миниатюрные гироскопы, изготовленные с помощью технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1, 2]. Вибрационные МЭМС-гироскопы существенно отличаются от других (например, роторных и лазерных) наличием чувствительного элемента, совершающего микромеханические колебания. При этом в МЭМС-гироскопах с учётом воздействия силы Кориолиса возбуждаемое колебание чувствительного элемента, который может быть выполнен в виде пластинки, балки, четырёхлучевого стержня и т. д., вызывает вторичную вибрацию в направлении, перпендикулярном исходной. Вторичная регистрируемая вибрация пропорциональна угловой скорости [3, 4].

Для обеспечения гальванической развязки цепи возбуждения чувствительного элемента и схемы съёма информации, исключения возможности электрического пробоя, а также для получения квазилинейной функции преобразования предлагается использовать схему микрооптоэлектромеханического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), построенного в системе «оптический узел полного внутреннего отражения — вакуум — чувствительный пьезоэлемент (ЧПЭ)» [5—8].

Одним из существенных ограничений применения МОЭМ-преобразователей является узкий диапазон измерения, связанный с малым рабочим зазором, составляющим около одного микрометра. Для эффективного использования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей в системах управления подвижными объектами необходимо разработать

методы, обеспечивающие расширение диапазона измерения.

**Амплитудный метод расширения диапазона измерения МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.** Отметим, что чем выше измеряемая угловая скорость  $\Omega_Z$ , тем больше отклонение ЧПЭ  $y_m(\Omega_Z)$  с введением дополнительной массы  $m$ . В случае если на МОЭМ-преобразователе действует скорость  $\Omega_Z$ , которая больше максимально допустимого значения  $\Omega_{Z \max}$  диапазона измерения, то отклонение ЧПЭ  $y_m(\Omega_Z)$  может выйти за пределы рабочего диапазона ОТЭ. В критическом случае, когда угловая скорость  $\Omega_Z$  достаточно велика, происходит механический контакт между ЧПЭ и оптическим узлом, нарушающий работоспособность такого устройства.

Для расширения диапазона измерения МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ можно использовать *амплитудный метод*, когда с увеличением скорости  $\Omega_Z$  пропорционально уменьшается амплитуда напряжения возбуждения  $U_{\text{взб}}$  таким образом, что минимальные значения рабочего зазора  $d_{\min}$  остаются постоянными.

Функциональная схема МОЭМ-преобразователя, реализующая такой метод, представлена на рис. 1, а. Под действием скоростей  $\Omega_Z$  из-за эффекта Кориолиса происходят малые отклонения ЧПЭ, приводящие к уменьшению зазора  $d$  между ЧПЭ и оптическим узлом. При этом большая часть оптической энергии источника излучения ИИ поглощается, проникая в ЧПЭ, что изменяет выходные сигналы фотоприёмников ФП1, ФП2. Сформированное в блоке обработки БО выходное напряжение  $U_{\text{о.с}}$  обратной связи (ОС) поступает в блок возбуждения БВ, где формируется результирующее напряжение возбуждения  $U_{\text{взб}}$ .

При организации двух каналов считывания угловой скорости  $\Omega_Z$  (см. рис. 1) рассматриваемый МОЭМ-преобразователь работает в *совместном режиме модуляции двух оптических сигналов*, что обеспечивает компенсацию дополнительных погрешностей, уменьшение влияния температуры и получение квазилинейной функции преобразования. Структурная схема такого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с регулированием напряжения возбуждения приведена на рис. 1, б.

При приложении к ЧПЭ напряжения возбуждения  $U_{\text{взб}} = U_{\text{взб} \text{ м}} \sin \omega t$  с частотой  $\omega$  отклонение ЧПЭ  $y_m(\Omega_Z)$  можно определить как

$$y_m(\Omega_Z) = K_m U_{\text{взб} \text{ м}} \Omega_Z \sin \omega t,$$

где  $K_m$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров и свойства выбранного материала ЧПЭ ( $K_m = 3\pi\rho d_{\text{обр}}^3 [l/20 + m/(\rho b h)]/(Eb^2)$ ,  $m$  — дополнительная масса;  $l, b, h$  — длина, толщина и ширина ЧПЭ, соответственно;  $\rho, E, d_{\text{обр}}$  — плотность, модуль упругости, пьезомодуль обратного пьезоэффекта пьезокерамики ЦТС-19, соответственно).

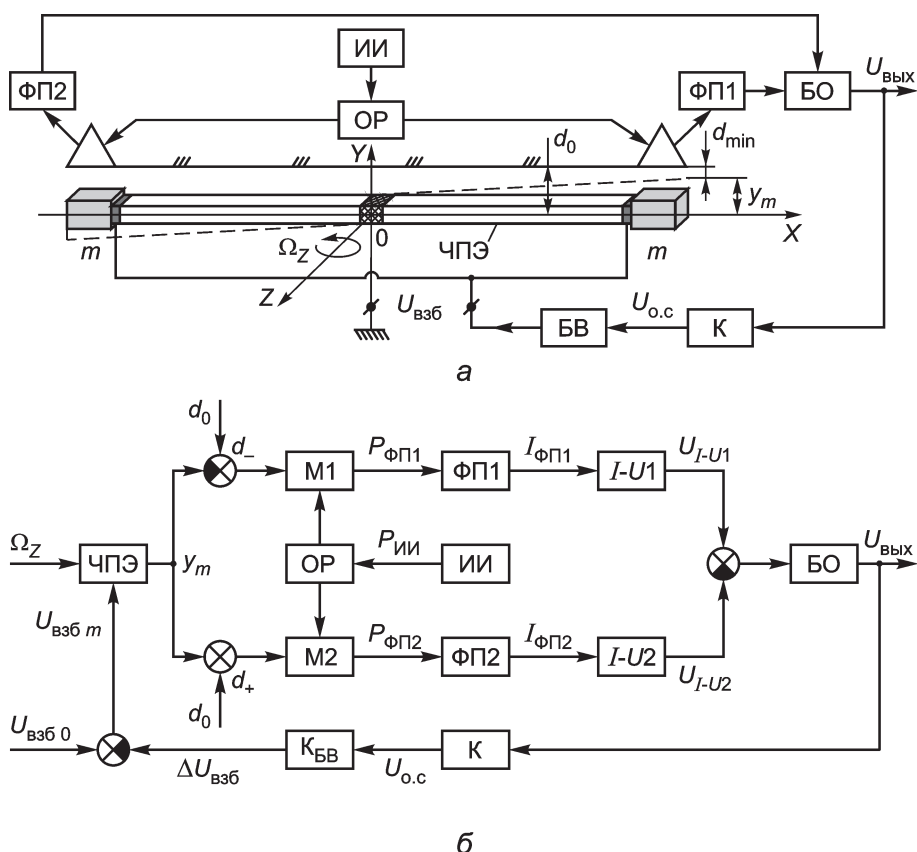


Рис. 1. Функциональная (а) и структурная (б) схемы МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с регулированием напряжения возбуждения:

ИИ — источник излучения; ОР — оптический разветвитель; ФП1, ФП2 — фотоприёмники; БО — блок обработки; БВ — блок формирования напряжения возбуждения; К — компаратор; М1, М2 — оптические модуляторы; I-U1, I-U2 — преобразователи «ток—напряжение»;  $m$  — дополнительная масса

Зазор  $d_{\pm}(U_{\text{взб} \text{ м}}, \Omega_Z)$  (знаки «+» или «-» соответствуют каналам считывания оптических сигналов) между оптическим узлом и ЧПЭ определяется начальным зазором  $d_0$ , сформированным при изготовлении, и отклонением конца ЧПЭ  $y_m(\Omega_Z)$ :

$$d_{\pm}(U_{\text{взб} \text{ м}}, \Omega_Z) = d_0 \pm K_m U_{\text{взб} \text{ м}} \Omega_Z \sin \omega t. \quad (1)$$

Для каждого значения скорости  $\Omega_Z$  рабочий зазор одного канала  $d_{+}(U_{\text{взб} \text{ м}}, \Omega_Z)$  достигает минимального значения  $d_{\min}$  в моменты времени  $t_i = (2i + 1)\pi/(2\omega)$ , где  $i = 1, 3, 5, \dots$ , а рабочий зазор другого канала  $d_{-}(U_{\text{взб} \text{ м}}, \Omega_Z)$  при  $i = 0, 2, 4, \dots$ . Очевидно, что чем меньше выбранный минимальный зазор  $d_{\min}$ , тем больше может быть допустимая амплитуда напряжения возбуждения  $U_{\text{взб} \text{ м}}$ . Значение  $d_{\min}$  необходимо выбирать так, чтобы было удовлетворено условие:  $d_n < d_{\min} < d_0$ , где  $d_n$  — пороговое значение зазора ОТЭ, которое при максимальном значении  $\Omega_{Z \max}$  диапазона измерения обеспечивает возможность функционирования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с заданной линейностью преобразования.

МОЭМ-преобразователь угловых скоростей с расширением диапазона измерения работает в двух режимах: прямого преобразования при воздействии на входе  $\Omega_Z \leq \Omega_{Z \max}$  и отрицательной ОС при  $\Omega_Z > \Omega_{Z \max}$ . Переключение из пер-

вого режима во второй выполняется при  $d < d_{\min}$ . Во втором режиме при увеличении скорости  $\Omega_Z > \Omega_{Z \max}$  постоянные минимальные значения  $d_{\min}$  обеспечиваются регулированием напряжения  $U_{\text{взб } m}$ .

При этом амплитуду напряжения  $U_{\text{взб } m}$  можно представить в виде

$$U_{\text{взб } m}(\Omega_Z) = U_{\text{взб } 0} - \Delta U_{\text{взб}}(\Omega_Z), \quad (2)$$

где  $\Delta U_{\text{взб}}(\Omega_Z) = K_{\text{БВ}} U_{\text{вых}}(\Omega_Z)$  — уменьшение амплитуд напряжения возбуждения;  $K_{\text{БВ}}$  — коэффициент усиления блока возбуждения;  $U_{\text{взб } 0}$  — начальная амплитуда напряжения возбуждения при воздействии на входе  $\Omega_Z \leq \Omega_{Z \max}$ .

В соответствии со структурной схемой (см. рис. 1, б) зависимость выходного напряжения блока обработки  $U_{\text{вых}}(\Omega_Z)$  от зазора  $d_{\pm}(U_{\text{взб } m}, \Omega_Z)$  принимает вид [7]:

$$U_{\text{вых}}(\Omega_Z) = K_U (R[d_-(U_{\text{взб } m}, \Omega_Z)] - R[d_+(U_{\text{взб } m}, \Omega_Z)]), \quad (3)$$

где  $K_U$  — масштабный коэффициент преобразования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей,  $K_U = S_{\text{ФП}} k_{\text{П}} R_{\text{I-U}} P_{\text{ИИ}}/2$ ;  $S_{\text{ФП}}$  — чувствительность фотоприёмника;  $P_{\text{ИИ}}$  — оптическая мощность источника излучения;  $R_{\text{I-U}}$  — сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя преобразователя «ток—напряжение»;  $k_{\text{П}}$  — коэффициент оптических потерь;  $R[d_{\pm}(U_{\text{взб } m}, \Omega_Z)]$  — отражательная способность границы раздела сред «оптический узел — вакуум — ЧПЭ».

Решая совместно уравнения (1)—(3) с учётом  $d_{\min}$ , запишем функцию преобразования как

$$U_{\text{вых}}(\Omega_Z) = K_U R [d_0 - K_{\text{М}} U_{\text{взб } 0} \Omega_Z + K_{\text{БВ}} \Omega_Z U_{\text{вых}}(\Omega_Z)] - K_U R [d_0 + K_{\text{М}} U_{\text{взб } 0} \Omega_Z - K_{\text{БВ}} \Omega_Z U_{\text{вых}}(\Omega_Z)]. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет вид функции  $F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z) = 0$ , описывающей нелинейную систему, когда нельзя использовать преобразование Лапласа для анализа характеристик. Такая нелинейная система может быть исследована с помощью метода линеаризации [9, 10].

Для рассматриваемой системы обозначим изменения скорости  $\Omega_Z$  и выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  через  $\Delta \Omega_Z$ ,  $\Delta U_{\text{вых}}$ .

Тогда получим  $\Omega_Z = \Omega_Z^0 + \Delta \Omega_Z$ ,  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^0 + \Delta U_{\text{вых}}$  при

начальных условиях  $t = 0$ ,  $\Omega_Z^0 = \Omega_{Z \max}$ ,  $U_{\text{вых}}^0 = U_{\text{вых } \max}$ , где  $U_{\text{вых } \max}$  — выходное напряжение блока обработки, соответствующее  $\Omega_{Z \max}$  диапазона измерения в режиме прямого преобразования. Подставив полученные выражения в уравнение (4), разложим его в ряд Тейлора по точке ( $t = 0$ ):

$$F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z)^0 + \left( \frac{\partial F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z)}{\partial U_{\text{вых}}} \right)^0 \Delta U_{\text{вых}} + \left( \frac{\partial F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z)}{\partial \Omega_Z} \right)^0 \Delta \Omega_Z = 0, \quad (5)$$

где

$$\left( \frac{\partial F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z)}{\partial U_{\text{вых}}} \right)^0 = 1 - K_U K_1;$$

$$K_1 = \left( \frac{\partial R[d_0 - K_{\text{М}} U_{\text{взб } 0} \Omega_Z + K_{\text{БВ}} \Omega_Z U_{\text{вых}}(\Omega_Z)]}{\partial U_{\text{вых}}} \right)^0 - \left( \frac{\partial R[d_0 + K_{\text{М}} U_{\text{взб } 0} \Omega_Z - K_{\text{БВ}} \Omega_Z U_{\text{вых}}(\Omega_Z)]}{\partial U_{\text{вых}}} \right)^0;$$

$$\left( \frac{\partial F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z)}{\partial \Omega_Z} \right)^0 = -K_U K_2;$$

$$K_2 = \left( \frac{\partial R[d_0 - K_{\text{М}} U_{\text{взб } 0} \Omega_Z + K_{\text{БВ}} \Omega_Z U_{\text{вых}}(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} \right)^0 - \left( \frac{\partial R[d_0 + K_{\text{М}} U_{\text{взб } 0} \Omega_Z - K_{\text{БВ}} \Omega_Z U_{\text{вых}}(\Omega_Z)]}{\partial \Omega_Z} \right)^0;$$

$$F(U_{\text{вых}}, \Omega_Z)^0 = 0.$$

Уравнение (5) запишем в виде

$$U_{\text{вых}} = \Omega_Z K_U K_2 / [1 - K_U K_1].$$

При этом общая функция преобразования  $U_{\text{вых}} = f(\Omega_Z)$  МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с регулированием амплитуд напряжения возбуждения может быть представлена двумя квазилинейными участками ( $\Omega_Z \leq \Omega_{Z \max}$  в режиме прямого преобразования,  $\Omega_Z > \Omega_{Z \max}$  при включении отрицательной ОС) в виде

$$U_{\text{вых}}(\Omega_Z) = \begin{cases} K_U S \Omega_Z & \text{при } \Omega_Z \leq \Omega_{Z \max} \\ K_U K_2 \Omega_Z / (1 - K_U K_1) & \text{при } \Omega_Z > \Omega_{Z \max}, \end{cases}$$

где  $S$  — чувствительность МОЭМ-преобразователя угловых скоростей, которая определяется производной отражательной способности границы раздела сред «оптический узел — вакуум — ЧПЭ» по зазору  $S = \partial R(\Omega_Z) / \partial d(\Omega_Z)$ .

Введение отрицательной ОС уменьшает коэффициент передачи в  $K_2/S(1 - K_U K_1)$  раз, что позволяет настраивать диапазон измерения, увеличивая максимальную измеряемую угловую скорость. При регулировании коэффициента усиления  $K_{\text{БВ}}$  можно увеличить диапазон измерения, но одновременно с этим уменьшается чувствительность преобразователя.

Произведено моделирование МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с применением регулирования амплитуд напряжения возбуждения  $U_{\text{взб}}$  для расширения диапазона измерения. Показано, что при минимальном зазоре  $d_{\min} = 0,1$  мкм переключение режимов может происходить при  $\Omega_Z = 4$  рад/с, что позволяет увеличить диапазон измерения в шесть раз.

**Компенсационный метод расширения диапазона измерения МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.** В случае, если желательно сохранять режим возбуждения ЧПЭ неизменным, можно применить компенса-

ционный метод расширения диапазона измерения. Такой метод заключается в том, что используется динамическое управление рабочим зазором. Вместе с тем, для поддержания постоянных минимальных значений рабочего зазора  $d_{\min}$  при увеличении измеряемой угловой скорости  $\Omega_Z$  применяется регулирование рабочего зазора  $\Delta d(\Omega_Z)$  с помощью управляющего напряжения:  $\Delta d = f[U_{\text{упр}}(\Omega_Z)]$ . При реализации схемы МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ с динамическим управлением зазором в качестве прокладок, фиксирующих зазор, используются пьезоактюаторы, на которые подается управляющее напряжение  $U_{\text{упр}}(\Omega_Z)$  по цепи ОС (рис. 2).

Сигнал, пропорциональный оптической мощности  $P_{\text{ФП}}$ , поступая по каналу ОС на пьезоактюаторы, за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта приводит к изменению рабочего зазора в зоне контакта оптического излучения со структурой

«оптический узел — вакуум — ЧПЭ» [11, 12]. В этом случае увеличение рабочего зазора  $\Delta d(\Omega_Z)$  можно определить как

$$\Delta d(\Omega_Z) = \xi_n l_n \approx E_U(\Omega_Z) d_n l_n,$$

где  $l_n$ ,  $\xi_n$  — длина и относительная линейная деформация пьезоактюаторов, соответственно;  $d_n$  — пьезомодуль обратного пьезоэффекта материала пьезоактюаторов;  $E_U(\Omega_Z)$  — напряжённость управляющего электрического поля, приложенного к пьезоактюаторам ( $E_U(\Omega_Z) = 0,5 U_{\text{упр max}}(\Omega_Z) / l_0$ , где  $l_0$  — длина пьезоактюаторов).

Зазор между оптическим узлом и ЧПЭ в МОЭМ-преобразователе угловых скоростей с использованием динамического управления рабочим зазором в структуре «оптический узел — вакуум — ЧПЭ» можно записать в виде

$$d(\Omega_Z, t) = d_0 + U_{\text{упр max}}(\Omega_Z) d_n l_n / (2 l_0) - K_m U_{\text{взб 0}} \Omega_Z \sin \omega t.$$

При этом выходную оптическую мощность  $P_{\text{ФП}}(\Omega_Z, t)$  найдём как

$$P_{\text{ФП}}(\Omega_Z, t) = \frac{P_{\text{ИИ}}}{2} k_n R \left[ d_0 + \frac{U_{\text{упр max}}(\Omega_Z)}{2 l_0} d_n l_n - K_m U_{\text{взб 0}} \Omega_Z \sin \omega t \right].$$

Введение ОС с динамическим управлением зазором позволяет существенно расширить диапазон измерения МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. Использование такого метода для регулирования рабочего зазора приводит к дополнительным погрешностям из-за искажения выходных сигналов.

Для исключения этого недостатка МОЭМ-преобразователя можно использовать широтно-импульсную модуляцию выходного сигнала. При этом регистрируемым параметром становится длительность импульса  $\tau_{\Omega Z} = f(\Omega_Z)$ , которая зависит от угловой скорости  $\Omega_Z$ . Диаграмма формирования вы-

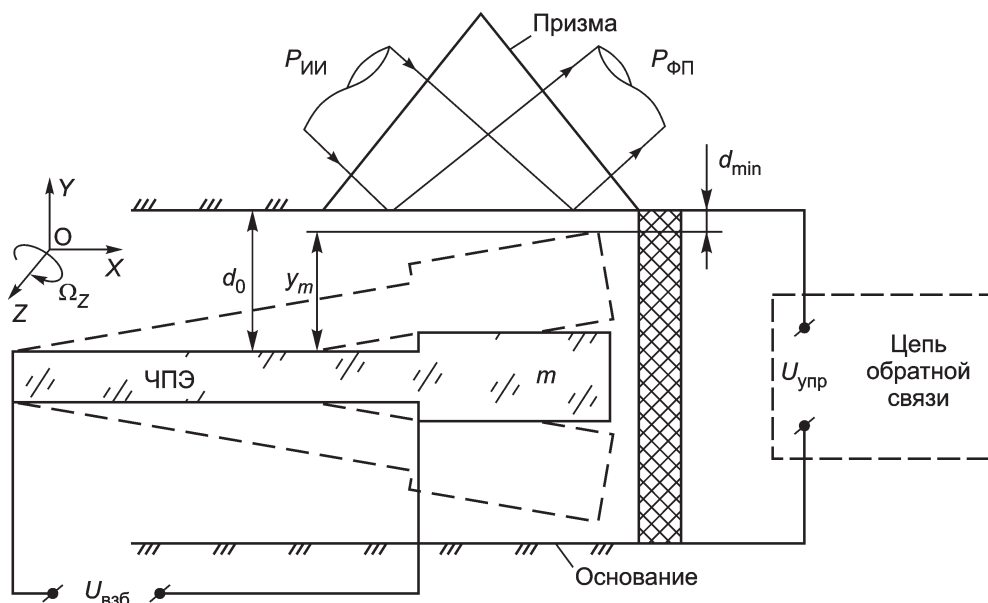


Рис. 2. Функциональная схема одного канала преобразования МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с динамическим управлением зазором:

ЧПЭ — чувствительный пьезоэлемент;  $m$  — дополнительная масса

ходных сигналов при численном моделировании МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ показана на рис. 3.

При исследовании процесса формирования выходного сигнала используется определение длительности импульсов  $\tau_{\Omega Z}$ , соответствующих уменьшению выходной мощности  $P_{\text{ФП}}(\Omega_Z)$ , достигающей фотоприёмника, ниже уровня срабатывания  $P_{\text{ср}}$ , регистрируемого с помощью компаратора.

Для каждой угловой скорости  $\Omega_Z$  длительность импульса выходного оптического сигнала  $\tau_{\Omega Z}$  определяется как разность времён, соответствующих двум решениям уравнения в течение одного периода колебания  $T$ :

$$\frac{P_{\text{ИИ}}}{2} k_n \left( R \left[ d_0 + \frac{U_{\text{упр max}}(\Omega_Z)}{2 l_0} d_n l_n - K_m U_{\text{взб 0}} \Omega_Z \sin \omega t \right] \right) \Big|_{\Omega_Z = \text{const}} - P_{\text{ср}} = 0.$$

При увеличении измеряемой угловой скорости  $\Omega_Z$  уменьшается длительность импульсов  $\tau_{\Omega Z}$  выходного сигнала МОЭМ-преобразователя. Следуя результатам численного моделирования МОЭМ-преобразователя, квазилинейная зависимость длительности импульсов  $\tau_{\Omega Z}$  от угловой скорости  $\Omega_Z$  может быть определена аппроксимирующей функцией:

$$\tau_{\Omega Z}(\Omega_Z) = k_1 \Omega_Z + k_2 \Omega_Z^{-1} + k_3 \Omega_Z^{-2} + k_4 \Omega_Z^{-3} + k_5 \Omega_Z^{-4},$$

где  $k_1 = 3,981 \cdot 10^{-8} \text{ с}^2$ ,  $k_2 = 7,555 \cdot 10^{-5}$ ,  $k_3 = -2,439 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $k_4 = 2,714 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}$ ,  $k_5 = -2,477 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-3}$  — расчётные коэффициенты аппроксимирующей функции по методу наименьших квадратов с погрешностью не более 2 %. При этом длительность выходных импульсов  $\tau_{\Omega Z}$  изменялась, например, от 10 до 4 мкс во всём диапазоне измерения угловой скорости, который был увеличен с 4 до 20 рад/с.

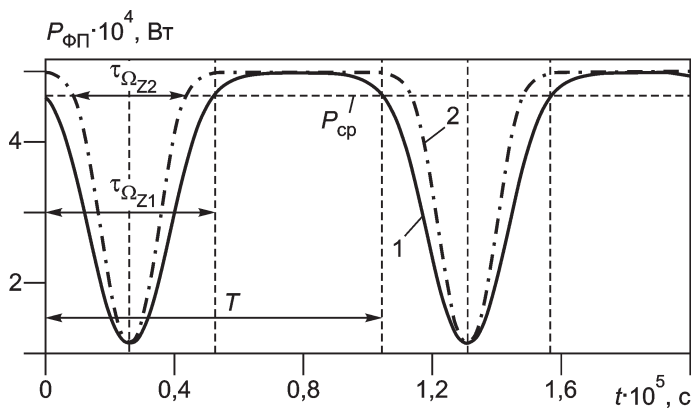


Рис. 3. Диаграмма формирования выходных оптических сигналов МОЭМ-преобразователя угловых скоростей при использовании динамического управления зазором:

1 — зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{оп}}$  от времени  $t$  при угловой скорости  $\Omega_{z1}$ ; 2 — зависимости выходной оптической мощности  $P_{\text{оп}}$  от времени  $t$  при угловой скорости  $\Omega_{z2} > \Omega_{z1}$

При организации дифференциальной схемы на основе двух каналов считывания выходной сигнал следует формировать по разности длительностей импульсов каждого канала, что обеспечивает компенсацию дополнительных погрешностей и уменьшение нелинейности функции преобразования.

**Заключение.** В представленной работе исследована возможность расширения диапазона измерения МОЭМ-преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ. Разработан амплитудный метод расширения диапазона измерения на основе регулирования напряжения возбуждения в линейаризованной нелинейной системе. Показано, что в МОЭМ-преобразователе угловых скоростей с регулированием напряжения возбуждения с минимальным зазором  $d_{\text{min}} = 0,1$  мкм и переключением режимов при  $\Omega_z = 4$  рад/с диапазон измерения может быть увеличен в шесть раз. Разработан компенсационный метод динамического управления рабочим зазором с использованием нового подхода к регистрации выходных оптических сигналов, обеспечивший расширение диапазона измерения МОЭМ-преобразователя до пяти раз. На основе данных моделирования определена аналитическая формула зависимости длительности выходного импульса  $\tau_{\Omega z}$  от угловой скорости  $\Omega_z$  с погрешностью не более 2 %. Применение разработанных методов обеспечивает расширение возможностей использования

МОЭМ-преобразователя угловых скоростей в системах управления подвижными объектами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447-а).

## Литература

1. Robert B. MEMS sensors: past, present and future // Sensor Review. 2007. V. 27(1). P. 7—13.
2. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нано-электромеханики // Автометрия. 2009. № 3. С. 3—52.
3. Мельников В. Е., Мельникова Е. Н., Черноморский А. И., Гончаренко Г. Г. Датчики инерциальной информации. М.: МАИ-ПРИНТ, 2011.
4. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007.
5. Бусурин В. И., Горшков Б. Г., Коробков В. В. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. М.: МАИ, 2012.
6. Busurin V. I., Naing H. L., Pham A. T. Investigation of microopto-elektromechanical angular velocity and acceleration transducers based on optical tunneling effect // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 198—204.
7. Бусурин В. И., Фам А. Т. Микрооптоэлектромеханический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта // Автометрия. 2016. Т. 52. № 2. С. 124—130.
8. Пат. 2566384 РФ. Микрооптоэлектромеханический двухосевой датчик угловой скорости и линейного ускорения / Бусурин В. И., Жеглов М. А., Коробков В. В., Фам А. Т. // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 30.
9. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАЛИТ, 2010.
10. Khalil H. K. Nonlinear systems, 3<sup>rd</sup> Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
11. Min H. B. Handbook of sensors and actuators — 8: micro mechanical transducers pressure sensors, accelerometers and gyroscopes. Elsevier Press, 2000.
12. Ramyar R., Momeni H. System dynamics and adaptive control for MEMS gyroscope sensor // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2010. V. 7(4). P. 77—82.

Дата принятия: 18.10.2016.