Труды МАИ. 2026. № 150.

Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.)

Научная статья
УДК 629.054
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189690
EDN: https://www.elibrary.ru/LRMZID

МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ТРЕХМЕРНОМ БАЗИСЕ

М.А. Жеглов✉

Государственный научно-исследовательский институт приборостроения,

г. Москва, Россия

✉ majeglov@mail.ru

Цитирование: Жеглов М.А. Микрооптоэлектромеханические системы измерения параметров движения беспилотного летательного аппарата в трехмерном базисе // Труды МАИ: электрон. журнал. № 150. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189690

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы построения микрооптоэлектромеханических систем измерения трех проекций угловой скорости и трех проекций линейного ускорения с помощью одного вибрационного чувствительного элемента. Измерение перемещения и деформации чувствительного элемента осуществляется механооптическими модуляторами в двенадцати направлениях. С помощью частотного разделения сигнала о перемещении, выделяются медленно меняющиеся сигналы, пропорциональные линейному ускорению, и быстроменяющиеся сигналы, пропорциональные угловой скорости. Путем комплексирования информации, получаемой от механооптических модуляторов, производится расчет трех проекций угловой скорости и трех проекций линейного ускорения. Предложенное техническое решение может быть использовано для построения инерциальных систем управления беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханический; инерциальный; система; преобразователь; датчик; угловая скорость; ускорение; механооптический; модулятор.

MICROOPTOELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR MEASURING THE MOTION PARAMETERS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN A THREE-DIMENSIONAL BASIS

M.A. Zheglov ✉

State Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russia

✉ majeglov@mail.ru

Citation: Zheglov M.A. Microoptoelectromechanical systems for measuring the motion parameters of unmanned aerial vehicles in a three-dimensional basis // Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189690

Abstract. The paper deals with the construction of microoptoelectromechanical systems for measuring three projections of angular velocity and three projections of linear acceleration using a single vibration sensing structure. By measuring the motion signal of the SS and selecting from the measured signal slow-changing signals in the bandwidth of less than 500 Hz, proportional to linear acceleration, and fast-changing signals in the bandwidth of more than 5 kHz, proportional to the angular velocity, amplitude and frequency of primary vibrations, linear acceleration and angular velocity can be measured.

To measure the motion parameters of an object in a three-dimensional basis, it is necessary to use a vibration SS with several degrees of freedom, for example: ring, beam and four-mass. The mechanooptical modulators based on a Fabry-Perot interferometer or optical tunnel effect are measured movement and deformation of the SS in twelve directions. Using the frequency division of the displacement signal, slowly changing signals proportional to linear acceleration and rapidly changing signals proportional to angular velocity are distinguished. By combining the information received from MOMs, three projections of angular velocity and three projections of linear acceleration are calculated.

The measurement ranges of angular velocity in the range of ±250 deg/s and linear acceleration in the range of ±100 m/s^2 allows you to measure the movement parameters of a large number of types of unmanned aerial vehicles (UAVs). The use of microelectronics technologies in the production of MOEMS allows us to provide a cost comparable to the cost of microelectromechanical systems, which is important for

building promising UAVs. The combination of these two factors provides the construction of inertial control systems for advanced UAVs designed to solve a wide range of tasks based on the MOEMS measurement of motion parameters in a three-dimensional basis.

Keywords: microoptoelectromechanical; inertial; systems; transducer; sensor; angular velocity; acceleration; mechanooptical; modulator.

Введение

Расширение сферы применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для массовой перевозки грузов и в перспективе людей ставит вопрос снижения их стоимости. Снижение стоимости БПЛА в целом может быть достигнуто за счет снижения стоимости его систем, в том числе и инерциальной системы управления. При этом, для обеспечения безопасности полётов, должны обеспечиваться требуемые точностные характеристики инерциальной системы управления в автономном режиме. Одним из направлений развития является построение инерциальной навигационной системы на основе пространственного изотропного осциллятора, которая позволяет вычислять матрицу поворота, но и вектор абсолютного ускорения с использованием одного чувствительного элемента (ЧЭ) [1].

Развитие технологии изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС), вычислительной техники и фотоники, повышает интеграцию элементов, располагаемых внутри одного корпуса микросхемы и позволяет сформулировать основы построения микрооптоэлектромеханической системы (МОЭМС) измерения параметров движения БПЛА в трехмерном базисе на основе одного вибрирующего ЧЭ. Применение оптических методов позволяет увеличить чувствительность к измерению перемещения ЧЭ до 10 А/м по сравнению с 0,01 А/м для электростатического метода измерения положения, применяемого в МЭМС, повысить устойчивость к электромагнитным помехам и устойчивость к внешним воздействующим факторам [2].

Метод решения задачи

В основе построения МОЭМС измерения параметров движения летательного аппарата в трехмерном базисе на основе единого вибрирующего ЧЭ лежит анализ информации, получаемой из сигналов о перемещении ЧЭ (рисунок 1).

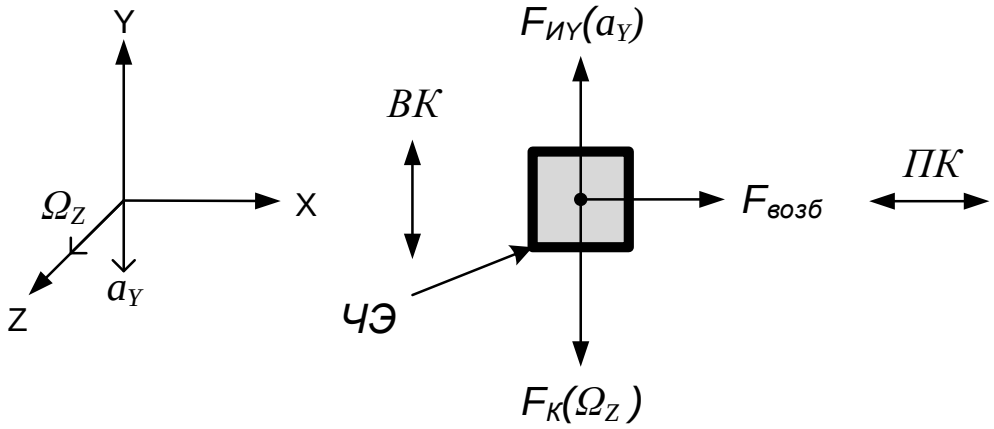


Рисунок 1 – Перемещение ЧЭ

Для функционирования МОЭМС в режиме измерения угловой скорости необходимым условием является возбуждение продольных гармонических первичных колебаний (ПК) ЧЭ на частоте резонанса *f*, направленных вдоль оси *X*. Для возбуждения ПК на ЧЭ воздействует сила $F_{возб}$, которая изменяется по периодическому закону. При воздействии на ЧЭ вектора угловой скорости Ω_Z, перпендикулярного направлению силы $F_{возб}$, возникает сила Кориолиса $F_K(\Omega_Z)$, которая приводит к деформации ЧЭ и возникновению вторичных колебаний (ВК) вдоль оси *Y*, перпендикулярных ПК. Амплитуда сигнала ВК пропорциональна угловой скорости Ω_Z, а частота *f* лежит в диапазоне 5…150 кГц в зависимости от параметров резонатора.

Воздействие на МОЭМС линейного ускорения a_Y приводит к возникновению силы инерции $F_И(a_Y)$ и перемещению ЧЭ вдоль оси *Y*. При этом частота сигнала о перемещении ЧЭ из-за воздействия линейного ускорения определяется динамическими характеристиками БПЛА и чаще всего лежит в диапазоне не более 500 Гц.

Измеряя сигнал о перемещении ЧЭ вдоль оси *Y* и выделив из измеренного сигнала медленно меняющиеся сигналы в полосе пропускания менее 500 Гц,

пропорциональные линейному ускорению, и быстроменяющиеся сигналы в полосе пропускания более 5 кГц, пропорциональные угловой скорости, амплитуде и частоте ПК, можно осуществить измерение линейного ускорения и угловой скорости.

Для измерения параметров движения БПЛА в трехмерном базисе необходимо использовать ЧЭ с несколькими степенями свободы, например, вибрационные ЧЭ кольцевого, балочного или четырехмассового типов. Сигналы о перемещении ЧЭ d_i по двенадцати направлениям будут зависеть от медленно меняющихся сигналов $d_{Mi}(a)$, пропорциональных линейному ускорению, и быстроменяющихся сигналов $d_{Бi}(\Omega, A, f)$, пропорциональных угловой скорости, амплитуде и частоте ПК:

$$d_i = d_{Mi}(a_X, a_Y, a_Z) + d_{Бi}(\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z, A, f),\ i = 1...12. \quad (1)$$

Зависимости изменения d_{Mi} от воздействия трех проекций линейного ускорения a_X, a_Y, a_Z и изменения $d_{Бi}$ от воздействия трех проекций угловой скорости Ω_X, Ω_Y, Ω_Z определяются параметрами ЧЭ и уточняются при калибровке.

МОЭМС осуществляет измерение сигналов d_i, разделение сигналов по частотному диапазону и выделение из них сигналов $d_{Mi}(a)$ и $d_{Бi}(\Omega, A, f)$, расчёт значений трех проекций измеренного линейного ускорения $a_{X_изм}$, $a_{Y_изм}$, $a_{Z_изм}$ и трех проекций измеренной угловой скорости $\Omega_{X_изм}$, $\Omega_{Y_изм}$, $\Omega_{Z_изм}$.

Алгоритм обработки информации МОЭМС измерения параметров движения БПЛА в трехмерном базисе на основе комплексирования данных о перемещения вибрационных ЧЭ кольцевого, балочного и четырехмассового типов в двенадцати направлениях показан на схеме (рисунок 2).

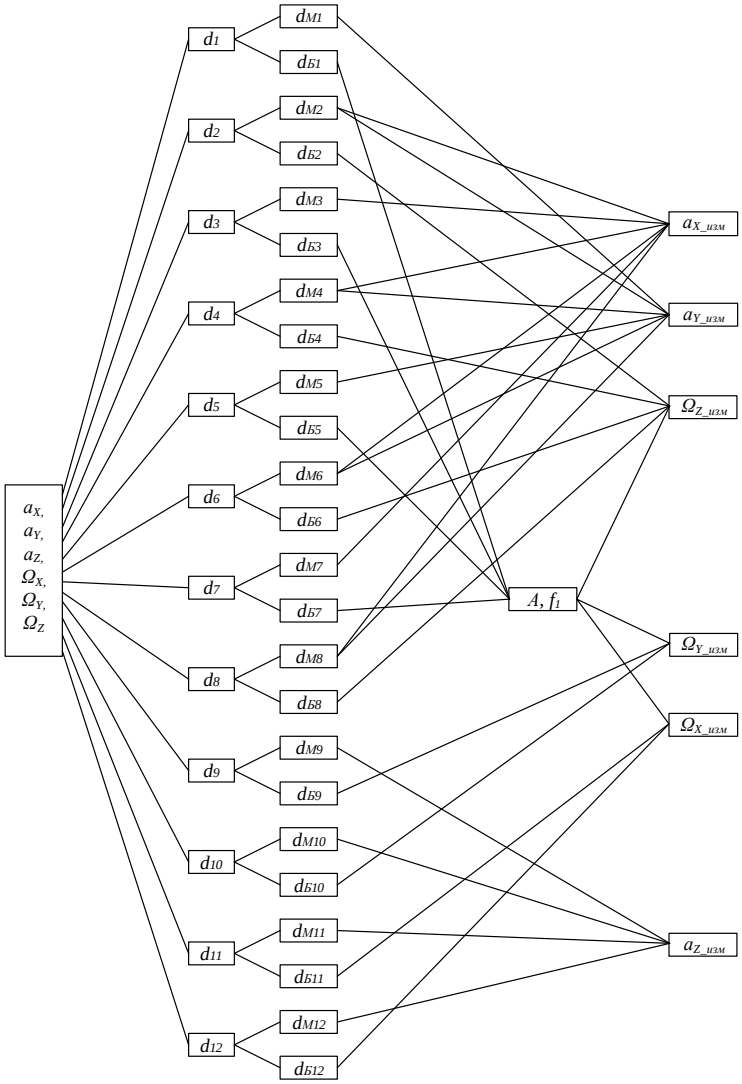


Рисунок 2 – Алгоритм комплексирования информации МОЭМС

Унифицированная структурная схема МОЭМС для измерения угловой скорости и линейного ускорения в трехмерном базисе на основе вибрационных ЧЭ различного типа показана на рисунке 3.

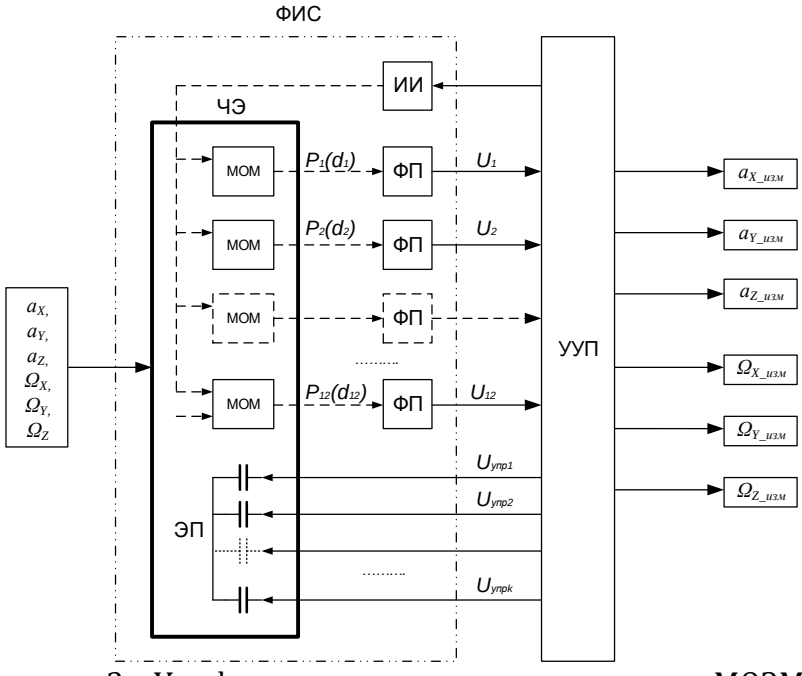


Рисунок 3 – Унифицированная структурная схема МОЭМС

На ЧЭ МОЭМС воздействует вектор параметров движения объекта, состоящий из трех проекций линейного ускорения a_X, a_Y, a_Z и трех проекций угловой скорости Ω_X, Ω_Y, Ω_Z. Для возбуждения ПК ЧЭ используются электростатические приводы (ЭП), количество которых зависит от типа ЧЭ [3]. Источник излучения (ИИ) генерирует оптическое излучение с требуемыми характеристиками, поступающее через оптические волноводы и оптические разветвители на механооптические модуляторы (МОМ), предназначенные для преобразования перемещения ЧЭ (d_1...d_{12}) в амплитудно-модулированный сигнал выходной оптической мощности (P_1...P_{12}), преобразовываемый фотоприемниками (ФП) в напряжение (U_1...U_{12}). ЧЭ, ИИ, ФП, ЭП входят в состав фотонной интегральная схема (ФИС). Для преобразования аналоговых напряжений (U_1... U_{12}) в цифровой код, их обработки, формирования управляющих воздействий на ЭП ($U_{\text{упр}1}$...$U_{\text{упр}k}$), расчета измеренных значений линейного ускорения $a_{X_изм}$, $a_{Y_изм}$, $a_{Z_изм}$ и трех проекций угловой скорости $\Omega_{X_изм}$, $\Omega_{Y_изм}$, $\Omega_{Z_изм}$ предназначено устройство управления и преобразования (УУП), функциональная схема которого показана на рисунок 4.

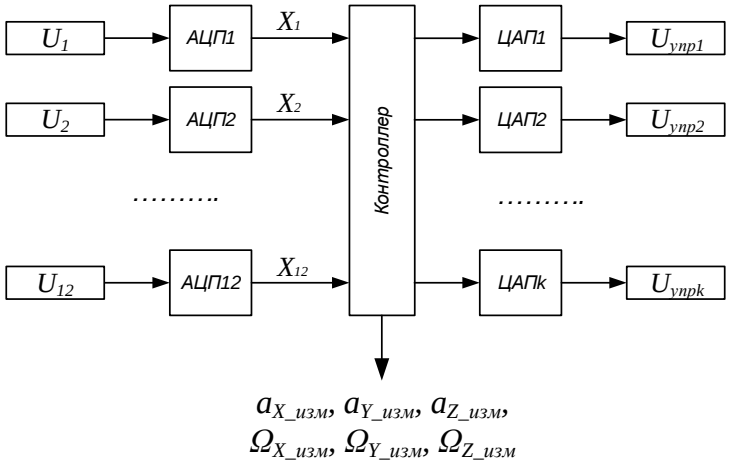


Рисунок 4 – Функциональная схема УУП

Для поддержания колебаний на частоте резонанса, а также вычисления амплитуд синфазной, квадратурной составляющих и средних значений сигналов за период воспользуемся методами цифровой обработки сигналов. Рассмотрим алгоритм обработки сигналов U_1...U_{12} на примере сигнала U_1. Проведем аналого-цифровое дискретное преобразование данного сигнала и обозначим результаты замеров X_{1l}, где l номер замера. Для вычисления амплитуд синфазной и

квадратурной составляющих гармонического сигнала по отношению к фазе φ_l сигнала возбуждения $U_{упр1}$ необходимо математически сгенерировать оценку сигнала, исходя из обеспечения условия минимума суммы квадратов отклонения сигнала X_1 от его оценки [4]:

$$\sum_{l=0}^{N-1}\left[X_{1l}-\left(X_{1синф}\cdot\cos(\varphi_l)+X_{1кв}\cdot\sin(\varphi_l)\right)\right]^2\to\min, \quad (2)$$

где N – количество дискретных замеров АЦП, $X_{1синф}$, $X_{1кв}$ – амплитуды синфазной и квадратурной составляющих, φ_l – текущая фаза сигнала возбуждения.

Если воспользоваться методами фазовой автоподстройки частоты и обеспечить кратное отношение частоты дискретизации АЦП к частоте сигнала управляющего напряжения f, то решением данного уравнения является:

$$X_{1синф}=\frac{\sum_{l=0}^{N-1}\cos(\varphi_l)\cdot X_{1l}}{\sum_{l=0}^{N-1}\cos^2(\varphi_l)}, \qquad X_{1кв}=\frac{\sum_{l=0}^{N-1}\sin(\varphi_l)\cdot X_{1l}}{\sum_{l=0}^{N-1}\sin^2(\varphi_l)}. \quad (3)$$

Контур фазовой автоподстройки частоты обеспечивает поиск и слежение за частотой f, при которой амплитуда сигнала X_1 максимальна, а значение $X_{1синф}$ стремиться к нулю. При этих условиях частота f будет являться резонансной частотой ЧЭ и будет использоваться для поддержания его колебаний. Значения $X_{1синф}$, $X_{1кв}$ используются для поддержания требуемой амплитуды A, скорости и фазы колебаний ЧЭ.

Воспользовавшись методами синхронного детектирования, выделяем из сигналов X_1... X_{12} средние значения сигналов $X_{1ср}$... $X_{12ср}$ за период, равный периоду сигнала $1/f$ и значения $X_{1синф}$, $X_{1кв}$, ... $X_{12синф}$, $X_{12кв}$, равные значениям синфазной и квадратурной составляющих сигнала с частотой f. Комплексная обработка данных сигналов позволяет рассчитать три проекции линейного ускорения и три проекции угловой скорости, определяющие параметры движения БПЛА в трехмерном базисе.

Математическая модель МОЭМС

Рассмотрим вариант построения математической модели информационно-измерительной системы параметров движения БПЛА в трехмерном базисе на основе МОЭМС с кремниевым кольцевым резонатором (КР), закрепленным к основанию упругими подвесами (рисунок 5а) [5].

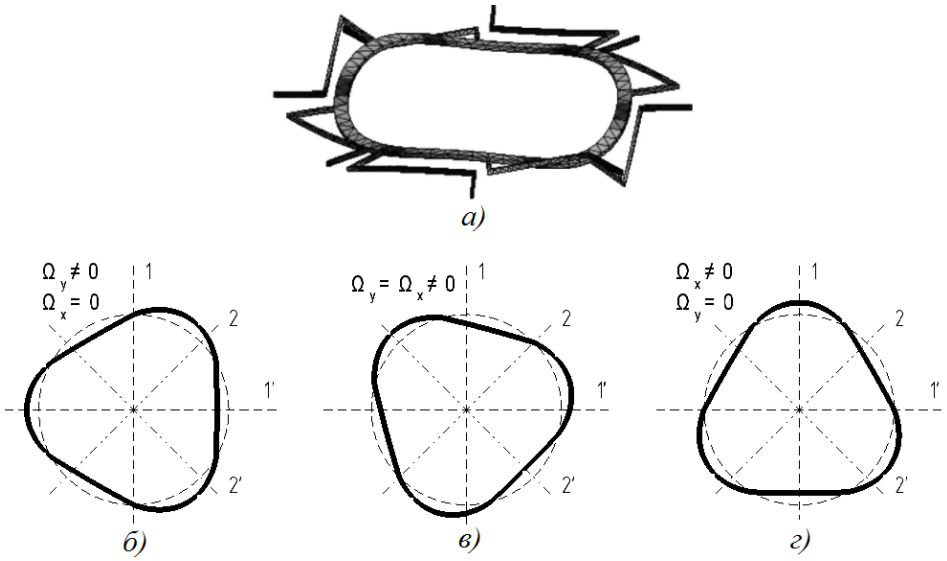


Рисунок 5 – Колебания в плоскости, перпендикулярной КР

Представляет интерес измерение с помощью одного КР трех проекций угловой скорости. Учитывая, что для преобразователя, показанного на рисунке 5 ПК осуществляются в плоскости КР, при соответствующей конфигурации подвесов ЧЭ возможно измерение угловых скоростей по трем осям [6,7]. ВК Ω_X, ВК Ω_Y представляют собой колебания по третьей форме (рисунок 5а), возникающие в плоскости, перпендикулярной плоскости КР. На рисунках 5б, 5в и 5г приведена иллюстрация распределения амплитуды по окружности КР колебаний, перпендикулярных плоскости КР, при различных воздействиях Ω_X и Ω_Y (пунктиром показана линия нулевого возвышения над плоскостью КР). При размещении МОМ над КР в точках, повернутых относительно оси 1 на углы 0, 60, 120, 180, 240 и 300°, возможно измерение ВК, вызванных воздействием Ω_X, а на углы 30, 90, 150, 210, 270 и 330° – возможно измерение ВК, вызванных воздействием Ω_Y. Перемещения КР в точках напротив МОМ1...МОМ12 показано на рисунок 6.

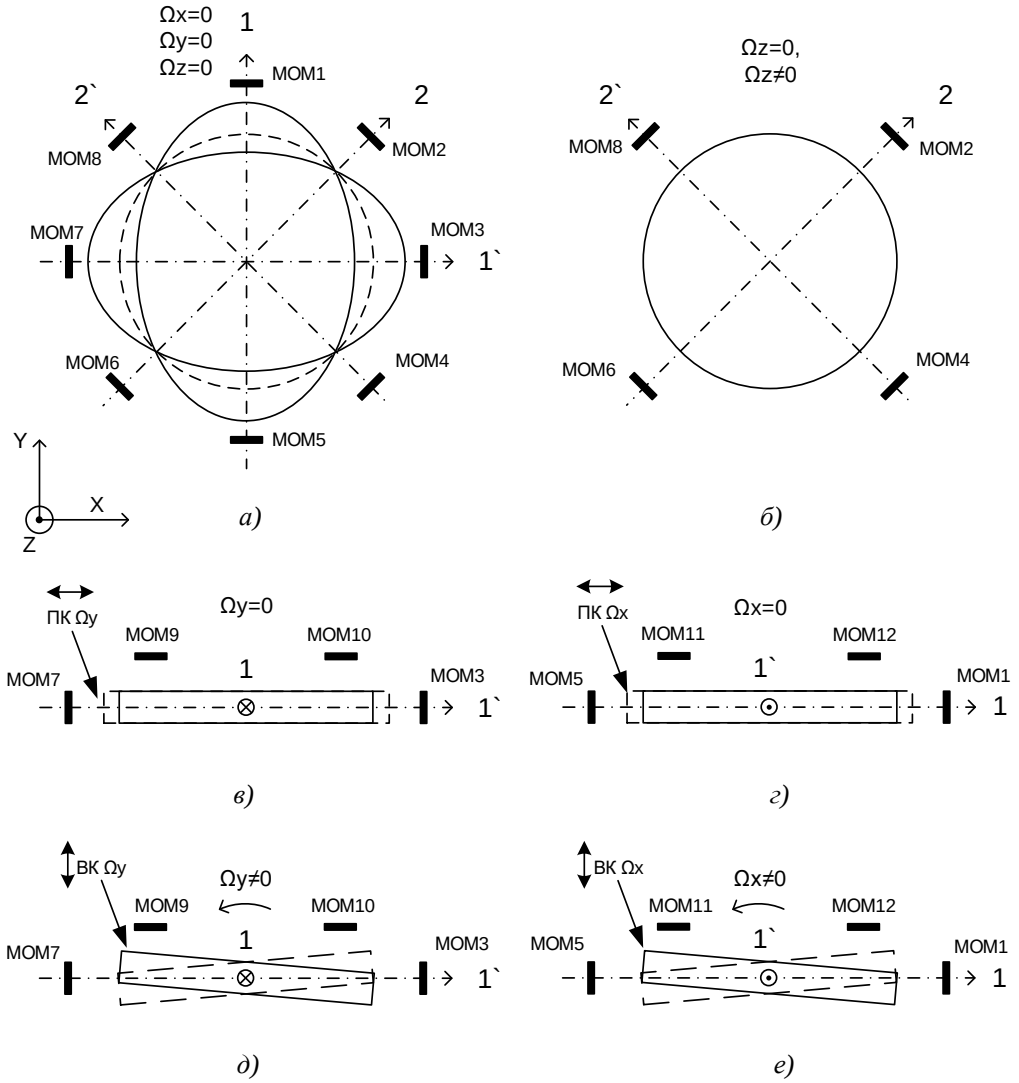


Рисунок 6 – Перемещения КР при воздействии угловой скорости

КР совершает ПК по второй форме вдоль осей 1-1` (рисунок 6а). Для их контроля используются МОМ1, МОМ3, МОМ5, МОМ7, расположенные относительно оси 1 со сдвигом на 0º, 90º, 180º, 270º.

При воздействии угловой скорости $\Omega_Z \neq 0$ появляются ВК Ω_Z по осям 2 и 2, регистрируемые МОМ2, МОМ4, МОМ6, МОМ8, расположенными относительно оси 1 со сдвигом на 45º, 135º, 225º, 315º. МОЭМС работает в режиме компенсационного измерения угловой скорости Ω_Z, поэтому система компенсации подает управляющие напряжения для создания силы парирования ВК Ω_Z по осям 2 и 2`, тем самым, устраняя их (рисунок 6б). Величина формируемой электроникой силы противодействия пропорциональна воздействующей угловой скорости Ω_Z.

При воздействии угловой скорости $\Omega_Y \neq 0$, возникнут изгибные ВК Ω_Y по третьей форме в перпендикулярной плоскости (рисунки 6в и 6д),

регистрируемые МОМ9, МОМ10. Информация, получаемая с МОМ3, МОМ7, МОМ9, МОМ10 используется для вычисления угловой скорости Ω_Y.

Для измерения Ω_X используется информация, получаемая с МОМ1, МОМ5, МОМ11, МОМ12 (рисунки 6г и 6е).

Частота ПК Ω_Z зависит от параметров КР [8]:

$$f_1 = \frac{k_1 \cdot \left(k_1^{\,2} - 1\right)}{\pi \cdot \sqrt{k_1^{\,2} + 1}} \cdot \frac{b}{D^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{E}{\rho}}, \quad (4)$$

где – мода колебаний в плоскости КР; E – модуль упругости КР; b – ширина КР; ρ – плотность КР; D – диаметр КР.

Частоты ПК Ω_X и ПК Ω_Y, учитывая симметричность КР относительно вертикальной оси, одинаковы [8]:

$$f_2 = f_{ПК\,\Omega x} = f_{ПК\,\Omega y} = \frac{2 \cdot k_2 \cdot \left(k_2^{\,2} - 1\right)}{\pi} \cdot \frac{h}{D^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot \left(12 k_2^{\,2} + 6{,}67\left(1 + \frac{h^2}{b^2}\right)(1 + \nu)\right)}}, \quad (5)$$

где – мода колебаний перпендикулярно плоскости КР; h – высота КР; ν – коэффициент Пуассона.

Для правильного функционирования КР необходимо, чтобы вторая мода резонансной частоты ПК Ω_Z (f_1) и третья мода резонансной частоты ПК Ω_X, ПК Ω_Y (f_2) были равны. Для КР со следующими характеристиками: D=6 мм; b=285,9 мкм; h=100 мкм; E = 1,65·10^{11} Па; ρ=2330 кг/м^3; ν=0,26; k_1=2; k_2=3, резонансная частота равна f=f_1=f_2=32957,86 Гц.

Перемещение КР в зависимости от амплитуды ПК и угловой скорости может быть определено [7]:

$$d_{Б1}(\mathrm{A}) = d_{Б5}(\mathrm{A}) = -d_{Б3}(\mathrm{A}) = -d_{Б7}(\mathrm{A}) = \mathrm{A} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t), \quad (6)$$

$$d_{Б2}(\Omega_z) = d_{Б4}(\Omega_z) = -d_{Б6}(\Omega_z) = -d_{Б8}(\Omega_z) = -\frac{4}{5}\frac{\Omega_z}{\xi_1 \cdot \omega_1} \cdot \mathrm{A} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t), \quad (7)$$

$$d_{Б9}(\Omega_y) = -d_{Б10}(\Omega_y) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Omega_y \cdot \omega_1}{\sqrt{\left(\omega_2^2 - \omega_1^2\right)^2 + 4 \cdot \xi_1^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}} \cdot \mathrm{A} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - \varphi), \quad (8)$$

$$d_{Б11}(\Omega_x) = -d_{Б12}(\Omega_x) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Omega_x \cdot \omega_1}{\sqrt{\left(\omega_2^2 - \omega_1^2\right)^2 + 4 \cdot \xi_1^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}} \cdot \mathrm{A} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - \varphi), \quad (9)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{2\cdot\xi_2\cdot\omega_1\cdot\omega_2}{\omega_2^2-\omega_1^2}\right), \quad (10)$$

где A – амплитуда ПК, $\omega_1=2\pi f_1$, $\omega_2=2\pi f_2$, ξ_1 – декремент затухания колебаний в плоскости кольца, ξ_2 – декремент затухания колебаний, перпендикулярных плоскости кольца.

Для КР со следующими характеристиками: $\omega_1=\omega_2=207080{,}3$ рад/с; $\xi_1=\xi_2=1$; A=5 мкм, рассчитана зависимость амплитуды ВК $d_{Б6}(\Omega_Z)$, $d_{Б10}(\Omega_X)$, $d_{Б11}(\Omega_Y)$ от воздействующей угловой скорости (рисунок 7) и изменение ЭТИХ сигналов от времени при воздействии угловой скорости $\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z$ = 250 град/с по каждой оси (рисунок 8).

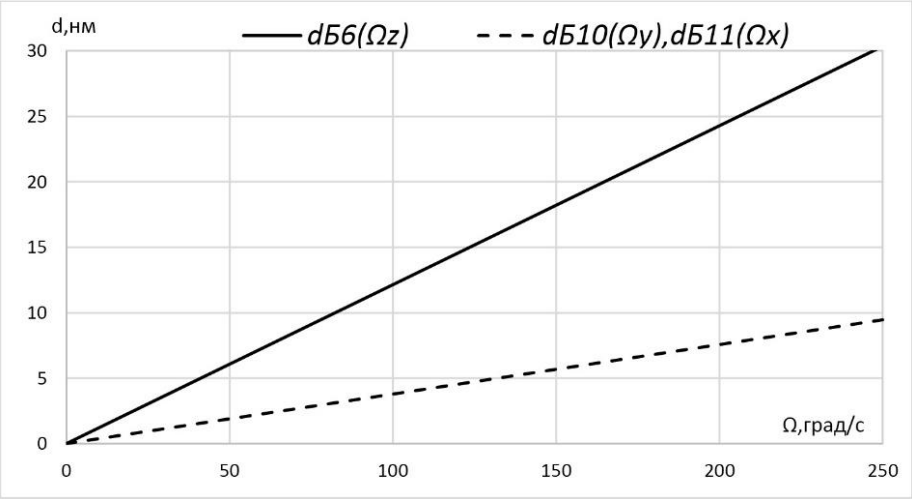


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды колебаний ЧЭ от угловой скорости

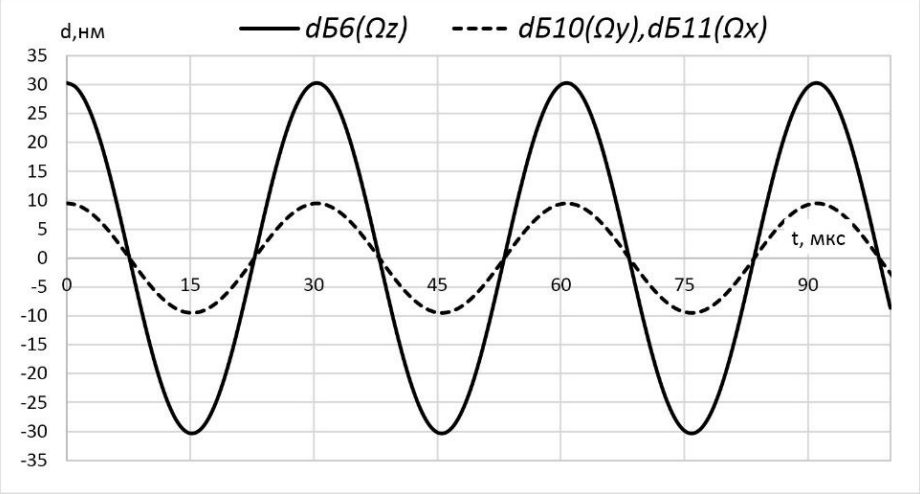


Рисунок 8 – Перемещение ЧЭ от времени при воздействии угловой скорости

При воздействии линейного ускорения происходит отклонение КР как твердого тела (без дополнительной деформации) за счет деформации подвесов [9]. Перемещение КР в направлении *i*-го МОМ $d_{Mi}(a)$ может быть определено:

$$d_{M1}(a_Y) = -d_{M5}(a_Y) = \frac{m \cdot a_Y}{K_Y}, \quad (11)$$

$$d_{M2}(a_X, a_Y) = -d_{M6}(a_X, a_Y) = \frac{m \cdot a_Y}{K_Y} \cdot \cos\frac{\pi}{4} + \frac{m \cdot a_X}{K_X} \cdot \cos\frac{\pi}{4}, \quad (12)$$

$$d_{M3}(a_X) = -d_{M7}(a_X) = \frac{m \cdot a_X}{K_X}, \quad (13)$$

$$d_{M4}(a_X, a_Y) = -d_{M8}(a_X, a_Y) = -\frac{m \cdot a_Y}{K_Y} \cdot \cos\frac{\pi}{4} + \frac{m \cdot a_X}{K_X} \cdot \cos\frac{\pi}{4}, \quad (14)$$

$$d_{M9}(a_Z) = d_{M10}(a_Z) = d_{M11}(a_Z) = d_{M12}(a_Z) = \frac{m \cdot a_Z}{K_Z}, \quad (15)$$

где K_X, K_Y, K_Z – жесткость подвесов КР в направлении *X*, *Y*, *Z* соответственно.

Жесткость подвесов в направлении оси *X* определяется соотношением $K_X = (2 \cdot \pi \cdot f_{0X})^2 \cdot m$, где f_{0X} – собственная частота колебаний КР без его деформации, в выбранном направлении. Для осей *Y*, *Z* аналогично.

Для КР с подвесами, выполненными в виде сложной структуры [5], с помощью программы твердотельного моделирования получено: $f_{0X}=f_{0Y}\approx$9465,2 Гц, f_{0Z}=4091,9 Гц. Определена зависимость изменения $d_{M9}(a_Z)$, $d_{M1}(a_Y)$, $d_{M3}(a_X)$ от воздействующего линейного ускорения по каждой оси (рисунок 9).

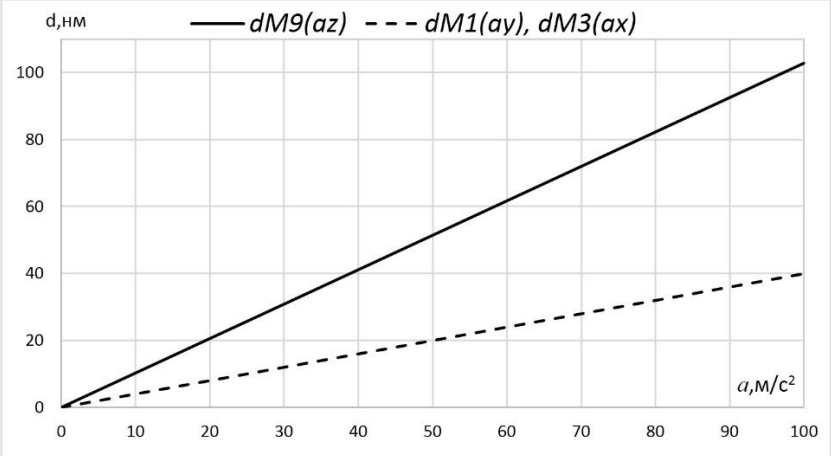


Рисунок 9 – Перемещение ЧЭ при воздействии ускорения

Расстояние от ЧЭ до *i*-го МОМ d_i определяется выражением:

$$d_i = d_{i0} - \Delta d_{Mi}(a) - d_{Бi}(\Omega), \quad (16)$$

где d_{i0} - расстояние от ЧЭ до i-го МОМ при отсутствии воздействия линейного ускорения и угловой скорости.

В качестве МОМ может быть использован модулятор на основе интерферометра Фабри-Перо (МИФП) или оптического туннельного эффекта [10,11]. Например, для МИФП зависимость выходного напряжения U_i от расстояния d_i:

$$U_i(d_i) = k_{1i} \cdot k_{2i} \cdot k_{3i} \cdot P_{ИИ} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot R3_i}{(1 - R3_i)^2} \cdot sin^2\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d_i}{\lambda}\right)} \right), \quad (17)$$

где k_{1i} – коэффициент потерь излучения при его вводе в МОМ i-го МОМ (k_{1i} ≈0,1), k_{2i} – коэффициент преобразования ФП i-го МОМ (k_{2i} ≈1 А/Вт), k_{3i} – коэффициент преобразования тока в напряжение i-го МОМ (k_{3i} ≈10^3…10^6 В/А), $P_{ИИ}$ – мощность источника излучения, поступающая на МОМ ($P_{ИИ}$=1 мВт), $R3_i$ – отражательная способность зеркал i-го МИФП; λ – длина волны ИИ.

$X_{iсинф}$ пропорционально $d_{Бi}(\Omega, A, f)$, следовательно, из (6) можно вычислить амплитуду ПК КР $A = \frac{K_A}{4} \cdot (X_{1синф} + X_{2синф} + X_{3синф} + X_{4синф})$, где K_A – масштабный коэффициент преобразования перемещение/код.

Для записи уравнений 7-9 в более компактном виде обозначим $K_{\Omega_X} = \frac{\left(1 + \frac{I_x}{b \cdot h} \cdot k_2^4 \cdot \xi^2\right) \cdot \gamma \cdot f_2}{k_2 \cdot A}$, $K_{\Omega_Y} = \frac{\left(1 + \frac{I_y}{b \cdot h} \cdot k_2^4 \cdot \xi^2\right) \cdot \gamma \cdot f_2}{k_2 \cdot A}$, $K_{\Omega_Z} = \frac{\left(k_1^2 + 1\right) \cdot \gamma \cdot f_1}{8 \cdot k_1 \cdot A}$

и выразим проекции измеренной угловой скорости:

$$\begin{pmatrix} \Omega_{X_изм} \\ \Omega_{Y_изм} \\ \Omega_{Z_изм} \end{pmatrix} == \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{\Omega_Z} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{\Omega_Z} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{\Omega_Z} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{\Omega_Z} \\ 0 & K_{\Omega_Y} & 0 \\ 0 & -K_{\Omega_Y} & 0 \\ K_{\Omega_X} & 0 & 0 \\ -K_{\Omega_X} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} X_{1синф} \\ X_{2синф} \\ X_{3синф} \\ X_{4синф} \\ X_{5синф} \\ X_{6синф} \\ X_{7синф} \\ X_{8синф} \\ X_{9синф} \\ X_{10синф} \\ X_{11синф} \\ X_{12синф} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Т.к. $X_{i\text{ср}} = d_{\text{Mi}}/K_A$, для записи уравнений 11-14 в более компактном виде обозначим $K_{a_X} = \frac{K_x \cdot K_A}{4 \cdot m}$, $K_{a_Y} = \frac{K_y \cdot K_A}{2 \cdot m}$, $K_{a_Z} = \frac{K_z \cdot K_A}{4 \cdot m}$ и выразим проекции измеренного линейного ускорения:

$$\begin{pmatrix} a_{X_изм} \\ a_{Y_изм} \\ a_{Z_изм} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & K_{a_Y} & 0 \\ K_{a_X} & K_{a_Y} & 0 \\ K_{a_X} & 0 & 0 \\ K_{a_X} & -K_{a_Y} & 0 \\ 0 & -K_{a_Y} & 0 \\ -K_{a_X} & -K_{a_Y} & 0 \\ -K_{a_X} & 0 & 0 \\ -K_{a_X} & K_{a_Y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{a_Z} \\ 0 & 0 & K_{a_Z} \\ 0 & 0 & K_{a_Z} \\ 0 & 0 & K_{a_Z} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} X_{1cp} - X_{1cp0} \\ X_{2cp} - X_{2cp0} \\ X_{3cp} - X_{3cp0} \\ X_{4cp} - X_{4cp0} \\ X_{5cp} - X_{5cp0} \\ X_{6cp} - X_{6cp0} \\ X_{7cp} - X_{7cp0} \\ X_{8cp} - X_{8cp0} \\ X_{9cp} - X_{9cp0} \\ X_{10cp} - X_{10cp0} \\ X_{11cp} - X_{11cp0} \\ X_{12cp} - X_{12cp0} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Предложенный способ построения математической модели МОЭМС с КР может быть применен для построения математической модели ЧЭ с резонаторами других типов, например, балочного и четырёхмассового [10].

Результаты экспериментальных исследований

Проведены экспериментальные исследования измерения перемещений ЧЭ с помощью устройства на основе МОМ [12]. При измерении ПК кромки резонатора d_1, экспериментально получена зависимость измеренного напряжения $U_{1_изм}$ на входе АЦП и рассчитанная на её основе зависимость $d_{1_изм}$ положения кромки резонатора (рисунок 10).

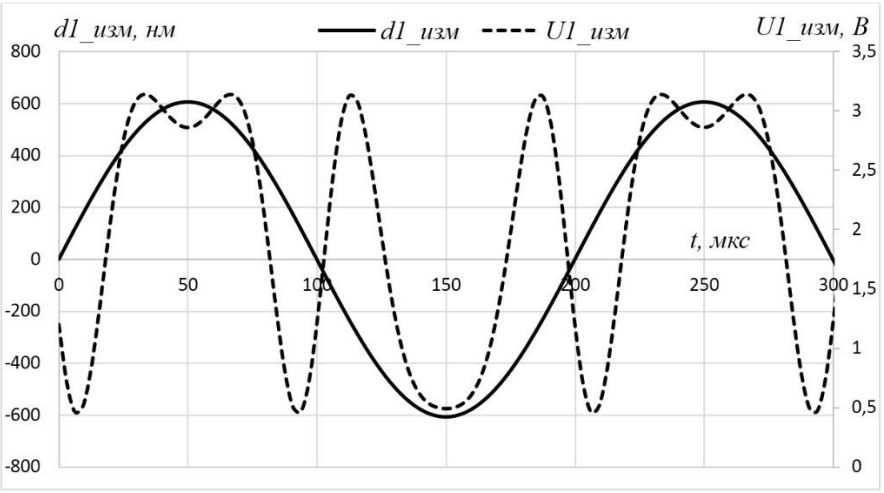


Рисунок 10 – Колебания ЧЭ

Сигнал $U_{1_изм}$ имеет сложную форму в связи с тем, что амплитуда колебаний ПК превышает λ/4 и при прохождении данной точки коэффициент зависимости $U_{1_изм}(d)$ меняет знак на противоположный, что учитывается при расчёте.

Зависимость положения кромки резонатора при изменении в момент времени t≈0,9 с воздействия линейного ускорения от ~9,81 м/с^2 до ~0 м/с^2 показана на рисунок 11.

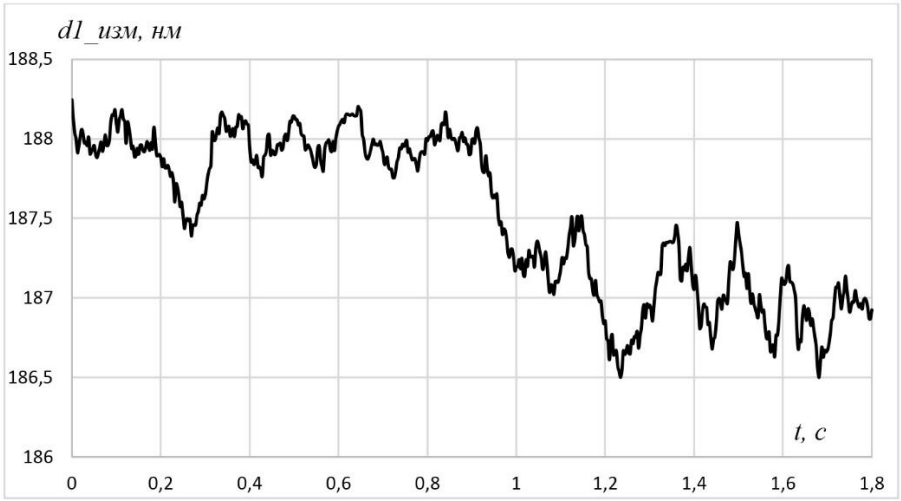


Рисунок 11 – Перемещение ЧЭ

Диапазон измерения угловой скорости в диапазон ±250 град/с и линейного ускорения в диапазоне ±100 м/с^2 позволяет измерять параметры движения большого количества типов БПЛА. Применение технологий микроэлектроники при производстве МОЭМС позволяет обеспечить стоимость, сравнимую со стоимостью МЭМС, что актуально для построения перспективных БПЛА. Сочетание этих двух факторов обеспечивает построение на основе МОЭМС измерения параметров движения в трехмерном базисе инерциальных систем управления перспективных БПЛА, предназначенных для решения широкого круга задач.

Заключение

Разработан метод построения информационно-измерительной системы параметров движения БПЛА в трехмерном базисе на основе МОЭМС с вибрационными ЧЭ различных типов.

Разработаны унифицированная структурная схема МОЭМС на основе вибрационных ЧЭ и алгоритм обработки информации на основе

комплексирования данных о перемещениях вибрационных ЧЭ в двенадцати направлениях для измерения трех проекций угловой скорости и линейного ускорения.

Предложен алгоритм цифровой обработки сигналов с использованием фазовой автоподстройки частоты, обеспечивающий вычисление амплитуд синфазной, квадратурной составляющих и средних значений сигналов за период для вычисления быстроменяющихся составляющих сигналов, соответствующих угловой скорости, и медленноменяющихся составляющих сигналов, соответствующих линейному ускорению.

Разработаны математическая модель перемещения вибрационного ЧЭ при воздействии трех проекций угловой скорости и трех проекций линейного ускорения, и математическая модель преобразования перемещения вибрационного ЧЭ с помощью МОМ на основе интерферометра Фабри-Перо или оптического туннельного эффекта.

Показано, что МОЭМС измерения параметров движения в трехмерном базисе обеспечивает построение инерциальных систем управления перспективных БПЛА, предназначенных для решения широкого круга задач.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Журавлёв В.Ф. Инерциальная навигационная система нового типа // Прикладная математика и механика. 2023, том 87, №4, с.513-518.

2. Бусурин В. И., Коробков В. В., Йин Наинг Вин. Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5, с. 340–346.

3. Violetta Di Napoli, Stewart McWilliam, Atanas A. Popov. Effects of mechanical non-linearity on the dynamic behavior of ring-based inertial rate sensors // Vibroengineering procedia. Sept. 2019, Vol. 27, p. 109-114.

4. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. – Тула: изд-во ТулГУ, 2018. – 189 с.

5. Benjamin Chouvion, Colin Fox, Stewart McWilliam, Atanas Popov. In-plane free vibration analysis of combined ring-beam structural systems by wave propagation // Journal of Sound and Vibration, Elsevier, 2010, 329 (24), p.5087-5104.

6. R. Eley, C.H.J Fox and S Mc. William. The dynamics of vibrating ring multi axis rate gyroscope // Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 214, no.12, 2000. – p. 1503-1513.

7. Gallacher B.J. Principles of a Three-Axis Vibrating Gyroscope / B.J. Gallacher, J.S. Burdess, A.J. Harris // IEEE transactions on aerospace and electronic systems Vol. 37, No. 4. – 2001. –p. 1333–1343.

8. Tom Irvine. Ring vibration modes revision D. 07/01/2014: http://www.vibrationdata.com/tutorials_alt/ringmode.pdf (дата обращения 04.06.2025 г.).

9. Бусурин В.Ф., Йин Наинг Вин, Жеглов М.А. Анализ влияния ускорения на характеристики кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости и его компенсация // Автометрия, 2019, Т. 55, № 3, с. 120-128.

10. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Микро-опто-электромеханические преобразователи информационно-измерительных и управляющих систем беспилотных летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2025. – 180 с.: ил.

11. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В., Дьячков В.В. ТВМ-преобразователь угловой скорости с интерферометрическим считыванием информации // Датчики и системы, 2017, №5, с. 37-43.

12. Штек С.Г., Жеглов М.А., Беляков В.В., Лунин Б.С., Васецкий С.О., Жмурова Д.Б., Седельникова О.В., Тюнин А.Н. Устройство для определения расщепления собственной частоты колебаний резонатора волнового твердотельного гироскопа. Патент на изобретение №2841594 от 24.01.2025.

References

1. Zhuravlev V.Ph. The New Type of Inertial Navigation Systems // Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 513-518.

2. Busurin V.I., Korobkov V.V., Yin Naing Win Investigation of Characteristics of the Optoelectronic Ring Wave Angular Velocity Transducer // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2016, 17(5), p. 340-346. (In Russ.)

3. Violetta Di Napoli, Stewart McWilliam, Atanas A. Popov. Effects of mechanical non-linearity on the dynamic behavior of ring-based inertial rate sensors // Vibroengineering procedia. Sept. 2019, Vol. 27, p. 109-114.

4. Raspopov V.Ya., Volchikhin I.A., Volchikhin A.I., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V., Matveev V.V. Coriolis Vibrating Gyroscope with metal resonator. – Tula: Tula State University Press, 2018. – 189 p.

5. Benjamin Chouvion, Colin Fox, Stewart McWilliam, Atanas Popov. In-plane free vibration analysis of combined ring-beam structural systems by wave propagation // Journal of Sound and Vibration, Elsevier, 2010, 329 (24), p.5087-5104.

6. R. Eley, C.H.J Fox and S Mc. William. The dynamics of vibrating ring multi axis rate gyroscope // Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 214, no.12, 2000. – p. 1503-1513.

7. Gallacher B.J. Principles of a Three-Axis Vibrating Gyroscope / B.J. Gallacher, J.S. Burdess, A.J. Harris // IEEE transactions on aerospace and electronic systems Vol. 37, No. 4. – 2001. –p. 1333–1343.

8. Tom Irvine. Ring vibration modes revision D. 07/01/2014: http://www.vibrationdata.com/tutorials_alt/ringmode.pdf (дата обращения 04.06.2025 г.).

9. Busurin V.I, Win Y.N., Zheglov M.A. Effect of linear acceleration on the characteristics of an optoelectronic ring transducer of angular velocity and its compensation // Avtometriya, 2019, 55(3), p. 120-128.

10. Busurin V.I., Zheglov M.A. Micro-opto-electromechanical transducer for information measuring and control systems of unmanned aerial vehicles. – M.: MAI Publishing House, 2025. – 180 p.: ill.

11. Busurin V.I., Gorshkov B.G., Korobkov V.V., Diachkov V.V. Solid-state wave micro-optoelectronic converter of angular velocity with interferometric information reading // Sensors and Systems, 2017, 5, p. 37-43.

12. Shtek S.G., Zheglov M.A., Belyakov V.V., Lunin B.S., Vasetsky S.O., Zhmurova D.B. Device for determining wave solid-state gyroscope resonator natural frequency splitting. RU Patent 2841594 (24.01.2025).

Информация об авторах

Максим Александрович Жеглов, к.т.н., главный конструктор по направлению, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, г. Москва, Россия; e-mail: majeglov@mail.ru

Information about the authors

Maksim A. Zheglov, Ph.D., Chief Designer, State Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russia; e-mail: majeglov@mail.ru

Получено 19 июня 2026 ● Принято к публикации 06 июля 2026 ● Опубликовано 28 октября 2026
Received 19 June 2026 ● Accepted 06 July 2026 ● Published 28 October 2026