

4. Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л. Экспериментальные исследования локализации деформации в металлах по топологии работы выхода электрона /

Перспективные материалы и технологии: Материалы 4-го междунар. симпозиума. – Витебск, ВГТУ. 2015. – С. 270-273.

УДК 681

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ГРАВИТАЦИОННЫХ МОМЕНТОВ С НЕСИММЕТРИЕЙ

Джилавдари И.З.¹, Ризноокая Н.Н.¹, Инсарова Н.И.²

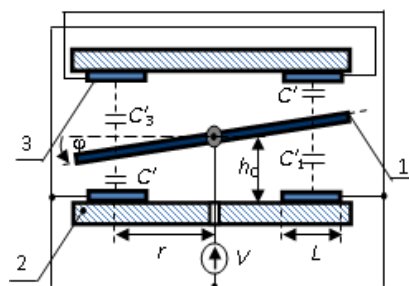
¹Белорусский национальный технический университет

²УО «Белорусский государственный медицинский университет»
Минск, Республика Беларусь

Гравиинерциальные датчики (ГИД), такие как линейные и угловые акселерометры, сейсмографы а также гравитационные градиентометры, обладающие максимально возможной чувствительностью, обычно построены на основе упруго подвешенной подвижной массы (ПМ), совершающей повороты относительно корпуса в пределах малого угла вокруг фиксированной оси под действием измеряемых сигналов [1-3]. Такие ГИД должны иметь малую собственную частоту, и низкий уровень шумов. Требуемый уровень шумов и чувствительности могут обеспечить емкостные датчики. В последнее время большое внимание уделяется резонансным датчикам, в которых электростатическое поле используется для уменьшения крутильной жесткости подвесов.

Цель данной работы состоит в анализе в линейном и нелинейном приближениях динамики ГИД с дифференциальной электростатической системой съема полезного сигнала.

Описание электрической схемы датчика. Общую схему датчика (рисунок 1) с дифференциальной емкостной системой считывания сигналов, можно назвать «трехслойной». Предположим, что, вследствие технологических погрешностей, в системе нарушена симметрия, так что между емкостями конденсаторов выполняются соотношения $C'_1=C'_3=C_0$ и $C'_2=C'_4=(1+\gamma)C_0$, где γ - параметр несимметрии электростатической системы датчика. Учитывая, что емкости C'_1 и C'_3 , как и емкости C'_2 и C'_4 , соединены параллельно, введя обозначения $\gamma_1=1+\gamma$ и $2C_0=C_s$, можно свести трехслойную схему к эквивалентной «двухслойной» схеме, показанной на рисунке 2. При анализе «двухслойной» схемы будет учтено наличие резисторов и дополнительных источников постоянного напряжения.



1 – проводящая ПМ, 2 – непроводящая пластина, 3 – электроды.

В центре показан упругий торсион

Рисунок 1 – «Трехслойная» схема дифференциального датчика

Можно показать, что в схеме на рисунке 2 зависимость емкостей конденсаторов от угла наклона ПМ дается формулами :

$$C_1(\varphi) = \frac{C_s \varphi_m}{\varphi_m + \varphi}, C_2(\varphi) = \frac{\gamma_1 C_s \varphi_m}{\varphi_m - \varphi}, C_s = \frac{2\epsilon_0 S}{h_0}, \quad (1)$$

$$\varphi_m = \frac{h_0}{L} \ln \frac{a_2}{a_1}; a_1 = r - \frac{L}{2}; a_2 = r + \frac{L}{2}. \quad (2)$$

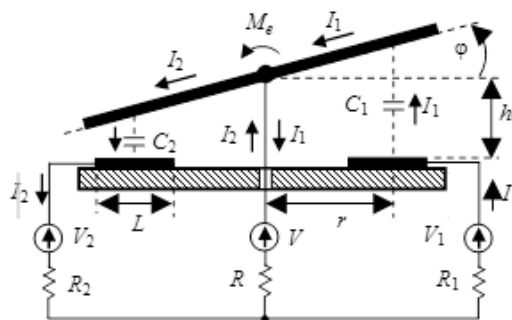


Рисунок 2 – Эквивалентная «двухслойная» схема дифференциального датчика

Вывод формул динамики электростатического ГИД. Полагаем, что момент силы трения M_ω пропорционален скорости вращения ПМ, т.е.

$M_\omega = D_0 \frac{d\varphi}{dt}$. Тогда, учитывая связи между направлениями моментов сил трения, сил инерции, сил упругости и электростатических сил, уравнение движения ПМ будет иметь вид

$$I_z \frac{d^2\varphi}{dt^2} + D_0 \frac{d\varphi}{dt} + k\varphi - \frac{1}{2} \frac{q_2^2 - \gamma_1 q_1^2}{\gamma_1 C_s \Phi_m} = M(t) \quad (3)$$

Составив уравнения электрического баланса (уравнения Кирхгофа) в схеме на рисунке 2, выразив токи, текущие через оба конденсатора, в

виде $I_1 = \frac{dq_1}{dt}$ и $I_2 = \frac{dq_2}{dt}$, получим два уравнения

$$\begin{aligned} \frac{q_1}{C_1} + R \left(\frac{dq_1}{dt} - \frac{dq_2}{dt} \right) + R_1 \frac{dq_1}{dt} &= -V_1 + V, \\ \frac{q_2}{C_2} + R \left(\frac{dq_2}{dt} - \frac{dq_1}{dt} \right) + R_2 \frac{dq_2}{dt} &= -V + V_2 \end{aligned} \quad (4)$$

В частности, в статическом случае (при отсутствии тока) на основании формул (4) и при $\varphi=0$ заряды в конденсаторах могут быть вычислены по формулам:

$$q_1 \equiv q_{1s} = C_s (V - V_1), \quad q_2 \equiv q_{2s} = -C_s \gamma_1 (V - V_2) \quad (8)$$

С точки зрения теории дифференциальных уравнений система уравнений (3) - (4) является «жесткой», что в нашем случае проявляется в том, что при численном решении число шагов и время расчета неограниченно растут при уменьшении значений сопротивлений резисторов. Решение таких систем требует специальных алгоритмов, однако теория оценки точности решения в общем случае еще не разработана.

Для аналитических исследований динамики датчика линеаризируем систему (3) - (4), сведя ее к одному линейному дифференциальному уравнению четвертого порядка. Будем считать, что заряды конденсаторов содержат соответствующие постоянные q_s и переменные составляющие q_v :

$$q_1 = q_{1s} + q_{1v}, \quad q_2 = q_{2s} + q_{2v}. \quad (9)$$

Сохраняя постоянные члены, а также члены, линейные по φ , q_{1v} и q_{2v} , исключая члены, содержащие произведения этих трех параметров, получим искомые линейные уравнения для зарядов q_{1v} и q_{2v} , которые для краткости запишем их матричном виде:

$$\begin{aligned} p_4 \frac{d^4}{dt^4} \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} + p_3 \frac{d^3}{dt^3} \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} + p_2 \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} + \\ + p_1 \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} + p_0 \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} &= - \begin{bmatrix} K_1(t) \\ K_2(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

где коэффициенты, представленные в соответствующих матрицах, даются формулами

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K_1(t) \\ K_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} b_1 \\ \gamma_1 b_2 \end{pmatrix} \cdot \left[M_1(t) + \frac{1}{2} P \right] + \\ &+ \begin{bmatrix} \gamma_1 (\tau b_2 + \tau_2 b_1) \\ \gamma_1 (\tau b_1 + \tau_2 b_2) \end{bmatrix} \frac{dM_1(t)}{dt}; \end{aligned}$$

$$p_4 = a_2 \gamma_1 I_z; \quad p_3 = a_1 I_z + a_2 \gamma_1 D_0;$$

$$p_2 = I_z + a_1 D_0 + a_2 \gamma_1 \begin{pmatrix} k - P \\ k + P \end{pmatrix};$$

$$p_1 = D_0 + a_1 k - \frac{1}{C_s \Phi_m^2} \begin{pmatrix} \gamma_1 a_1 b_2^2 + 2\gamma_1 \tau b_1 b_2 \\ a_1 b_1^2 + 2\gamma_1 \tau b_1 b_2 \end{pmatrix} \mp \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \gamma_1 \tau_2 \end{pmatrix} P;$$

$$p_0 = k - \frac{2}{C_s \Phi_m^2} \begin{pmatrix} \gamma_1 b_2^2 \\ b_1^2 \end{pmatrix};$$

$$a_1 = \tau_1 + \tau_2 \gamma_1; \quad a_2 = \tau_1 \tau_2 - \tau^2; \quad P = \frac{\gamma_1 b_2^2 - b_1^2}{C_s \Phi_m^2}.$$

В этих формулах введены следующие обозначения:

$$\tau = RC_s, \quad \tau_1 = (R + R_1)C_s, \quad \tau_2 = (R + R_2)C_s,$$

$$b_1 = C_s (V - V_1), \quad b_2 = C_s (V - V_2), \quad M_1(t) = \frac{M(t)}{\Phi_m}.$$

Пренебрегая малыми слагаемыми, содержащими τ_i , найдем, что динамика датчика описывается формулой

$$\begin{aligned} I_z \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} + D_0 \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} + \left[k - \frac{2}{C_s \Phi_m^2} \begin{pmatrix} \gamma_1 b_2^2 \\ b_1^2 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} q_{1v} \\ q_{2v} \end{pmatrix} = \\ = - \begin{pmatrix} b_1 \\ \gamma_1 b_2 \end{pmatrix} \cdot \left[M_1(t) + \frac{\gamma_1 b_2^2 - b_1^2}{2C_s \Phi_m^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собой линейное дифференциальное. Из его вида можно сразу установить некоторые особенности динамики датчика, описываемой нелинейной системой уравнений (3) - (4). В частности, видно, что устранить влияние несимметрии датчика можно, реализовав условие $b_1 = \gamma_1^{1/2} b_2$. В этом случае уравнения для зарядов q_1 и q_2 совпадают между собой. Также видно, что последнее слагаемое, стоящее в квадратной скобке правой части (6) и ответственное за появление фонового сигнала в выходном сигнале датчика, пропадает.

1. Liu H., Pike W. T., Dou G. Design, fabrication and characterization of a micro-machined gravity gradiometer suspension // ratio. – 2014. – V. 1. – P. 3.

2. Pike W. T. et al. Design, fabrication and testing of a micromachined seismometer with NANO-G resolution // Solid-State Sensors, Actuators and

Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International. – IEEE, 2009. – P. 668-671.

УДК 535-3, 535.314

СКАНЕР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБРАТНО-РАССЕЯННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н., Новик М.И., Белый И.В., Кречотень О.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета
Минск, Республика Беларусь

Рентгеновские лучи широко используются для просвечивания изделий и материалов с целью определения внутренних неоднородностей. Комплекс аппаратуры для просвечивания содержит источник рентгеновских лучей и цифровую ПЗС-камеру или фотопленку. Объект располагается между источником и камерой, изображение получается за счет того, что различные участки объекта по-разному поглощают рентгеновские лучи. Такое изображение называется теньевым. В ряде случаев получить теньевое изображение затруднительно из-за невозможности поместить камеру или фотопленку в требуемом месте за объектом. Поэтому, как дополнение к известному методу получения теневого изображения объектов, в последние годы разрабатывается методика получения изображения объектов с использованием обратнорассеянных рентгеновских лучей, регистрируемых детектором, располагаемым со стороны источника излучения. Преимущества такой методики получения информации об объекте очевидны, поэтому разработка рентгеновского сканера, работающего на основе обратнорассеянного излучения, является актуальной проблемой.

Нами разработан рентгеновский сканер на основе обратнорассеянного рентгеновского излучения. Сканер содержит рентгеновскую трубку, механическое сканирующее устройство для формирования рентгеновского пучка и детектор для измерения интенсивности обратнорассеянных рентгеновских лучей. Сканирующее устройство содержит коллиматор рентгеновских лучей, который перемещается в двух направлениях, и таким образом формирует рентгеновский пучок в заданном месте на объекте. Точность позиционирования рентгеновского луча на исследуемом объекте при его удалении от источника излучения на расстояние 500 мм составляет 1-3 мм. Частота перемещения рентгеновского луча по исследуемому объекту составляет не менее 1000 точек в секунду. При поле сканирования 100x150 точек время сканирования составляет 15-20 секунд.

В качестве источника излучения в сканере использовался переносной рентгеновский аппарат РЕЙС 25 с напряжением на трубке 21 кВ и током 92 мкА. Интенсивного обратнорассеянного рентгеновского пучка измерялась счетно-вычислительным устройством, состоящим из сцинтилляционного детектора на основе монокристалла NaI(Tl) и фотоэлектронного умножителя [1,2]. Управление сканером и обработка информации может осуществляться двумя способами: on-line (то есть подчиняясь командам компьютера) так и off-line (при помощи микроконтроллера). Программное обеспечение разработано на базе C++. Разработаны алгоритмы и программы управления работой сканирующего устройства.

Для проведения исследований с обратнорассеянным рентгеновским излучением собран макет стенда, фотография которого показана на рисунке 1, структурная схема стенда показана на рисунке 2.



1 – рентгеновская трубка, 2 – сканирующее устройство, 3 – сцинтилляционный детектор, 4- объект, 5 - рентгеновская ПЗС-камера

Рисунок 1 – Фотография стенда (вид сверху)

Макет содержит рентгеновскую ПЗС-камеру Photonic Science, которая позволяет визуализировать рентгеновский пучок в месте расположения объекта и определять размер пучка с использова-