

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ О ЗАЗОРЕ

Р.Г. Люкшонков, Н.В. Моисеев

Рассмотрена структурная схема дифференциального емкостного датчика перемещений подвижной массы микромеханического гироскопа. Отличительной особенностью датчика является наличие в схеме дополнительного сигнала для компенсации изменений зазора между измерительными электродами и инерционным телом, связанных с влиянием внешних воздействий. Представлены экспериментальные результаты работы датчика перемещений.

Ключевые слова: дифференциальные емкостные датчики, микромеханические инерциальные датчики, компенсация внешних воздействий, межэлектродный зазор.

Введение

Дифференциальные емкостные датчики перемещений предназначены для преобразования одной физической величины, емкости, в другую, например, в напряжение. Они являются входной частью различных микромеханических устройств: гироскопов, акселерометров, датчиков давления, различных сенсоров, емкостных микрофонов, т.е. устройств, в которых используется емкостной съём информации.

Рассмотрим одно из вышеперечисленных устройств – микромеханический гироскоп (ММГ), у которого инерционное тело (ИТ) закреплено на упругом подвесе. Конструкция ММГ наиболее чувствительна к таким механическим воздействиям, как линейные вибрации, удары и ускорения вдоль оси первичных колебаний, и к изменению температуры. Перечисленные внешние воздействия приводят к изменению зазора между измерительными электродами, расположенными по оси вторичных колебаний, и ИТ. При этом изменяются характеристики датчиков угла и датчиков момента, в частности, их коэффициенты передачи. Это приводит к изменению масштабного коэффициента и смещению нуля, а также влияет на величину отрицательной жесткости и квадратурную помеху, что, в свою очередь, приводит к появлению ошибок измерения в выходном сигнале ММГ.

Проведенный анализ рынка показал, что в настоящее время емкостные датчики перемещений выпускают такие фирмы производители, как, например, «Analog Devices, Inc», «MicroSensors, Inc» и «Хемикс». Но выполняются они по схеме, в которой отсутствует алгоритм измерения зазора.

Известны различные способы уменьшения влияния изменений межэлектродного зазора. В [1] предложено решение для гироскопов прямого типа преобразования, заключающееся в измерении суммы токов, протекающих через электроды дифференциального емкостного датчика для выделения информации о зазоре, и в использовании полученного сигнала для поддержания постоянной амплитуды колебаний по первичной оси. Однако такой схемы компенсации изменения зазора в ММГ замкнутого типа недостаточно, так как от величины зазора зависят моменты, приложенные к силовым электродам по оси вторичных колебаний, следовательно, и коэффициенты передачи этих электродов.

Цель настоящей работы заключается в разработке структуры дифференциального емкостного датчика перемещений, особенностью которого является наличие дополнительного выходного сигнала, пропорционального зазору между измерительными электродами и ИТ и анализе возможности использования этого дополнительного сигнала для повышения точности микромеханических датчиков.

Оценка влияния внешних воздействий на параметры микромеханического гироскопа

Теоретическое обоснование. Для оценки влияния внешних воздействий на различные параметры ММГ в качестве объекта исследования был выбран гироскоп RR-типа разработки ЦНИИ «Электроприбор» [2]. Конструктивная схема и принцип действия поясняются рис. 1.

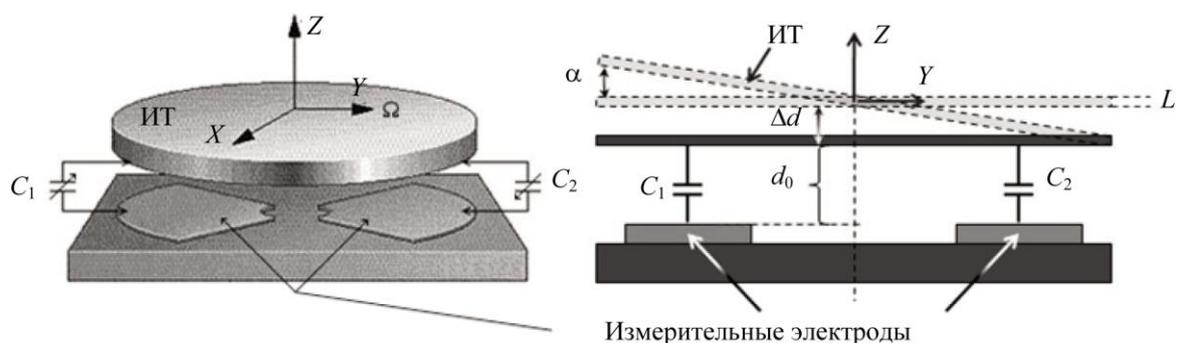


Рис. 1. Конструктивная схема ММГ

Инерционное тело на упругом подвесе под управлением системы разгона совершает колебательные движения вокруг оси первичных колебаний Z . При появлении угловой скорости основания Ω относительно оси чувствительности Y возникают моменты сил Кориолиса, что вызывает вторичные угловые колебания ИТ вокруг оси X . При отклонении ротора на угол α , пропорциональный действующей угловой скорости, будут изменяться расстояния между измерительными электродами и ИТ. Воздействие таких внешних факторов, как температуры, вибрации, линейных ускорений и давления, будет приводить к изменению первоначального зазора d_0 на величину Δd .

Другими словами, при изменении величины зазора один и тот же наклон ротора будет вызывать различные изменения емкостей, что приведет к изменению масштабного коэффициента датчиков угла и момента. Для этого необходимо компенсировать это изменение, чтобы масштабный коэффициент датчиков оставался постоянным.

Для электродов, имеющих форму ограниченного сектора (рис. 2), емкости C_1 и C_2 могут быть определены по формулам

$$C_1(\alpha, \Delta d) = \epsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) + r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr,$$

$$C_2(\alpha, \Delta d) = \epsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) - r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr,$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ [Ф/м] – электрическая постоянная; α – угол поворота ИТ вокруг вторичной оси, [град]; d_0 – зазор между ИТ и измерительными электродами в нейтральном положении, [м]; Δd – изменение зазора, [м]; R_{\max} и R_{\min} – соответственно внутренний и наружный радиусы рассматриваемого электрода, [м]; Ψ – угол сектора электрода, [град].

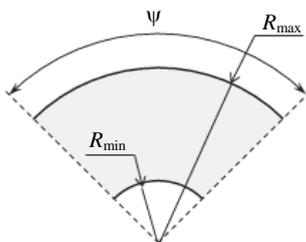


Рис. 2. Форма измерительных электродов

Для того чтобы оценить влияние линейных ускорений на изменение зазора, можно воспользоваться вторым законом Ньютона и законом Гука:

$$(K_{\text{мех}0z} - K_{\text{эл}})\Delta d = ma_{0z},$$

где m – масса ИТ, [кг]; a_{0z} – действующее ускорение вдоль оси Z , [м/с²]; $K_{\text{мех}0z}$ – линейная механическая жесткость вдоль оси Z , [Н/м]; $K_{\text{эл}}$ – электростатическая жесткость, [Н/м].

В табл. 1 приведена зависимость изменения зазора от действующего ускорения. Например, для зазора $d_0 = 2$ мкм при воздействии ускорения, равного 300 g, зазор изменится на 0,6 мкм, что приведет к изменению масштабного коэффициента датчика угла и масштабного коэффициента гироскопа на 30%.

Линейное ускорение вдоль оси Z , м/с ²	Изменение зазора, мкм
10g	0,023
50g	0,115
300g	0,69

Таблица 1. Зависимость изменения зазора от действующего ускорения

На величину зазора влияет и температура, так как ее изменение приводит к изменению размеров ИТ. Используя коэффициент расширения кремния ($\alpha_L = 2,33 \times 10^{-6}$ 1/°C) и толщину ИТ ($L = 60$ мкм), можно определить линейное расширение материала при изменении температуры ΔT (табл. 2):

$$\Delta L = \alpha_L L \Delta T.$$

Изменение температуры, °C	Расширение ИТ, нм
5	0,7
20	2,8

30	4,2
----	-----

Таблица 2. Зависимость расширения ИТ при изменении температуры

Экспериментальные исследования. Для подтверждения теоретических обоснований были проведены экспериментальные исследования гироскопа ММГ-ЭПТРОН. Выходной сигнал записывался при неподвижном основании. При обработке полученной информации с помощью метода вариации Аллана была получена нестабильность смещения нуля $5 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (рис. 3, а). При испытании на вибростенде (при действии вибрации с увеличивающейся частотой в диапазоне 10–3000Гц и амплитудой 2 g) на некоторых образцах наблюдались изменения выходного сигнала гироскопа (рис. 3, б). Можно предположить, что это изменение связано с изменением зазора под действием вибраций.

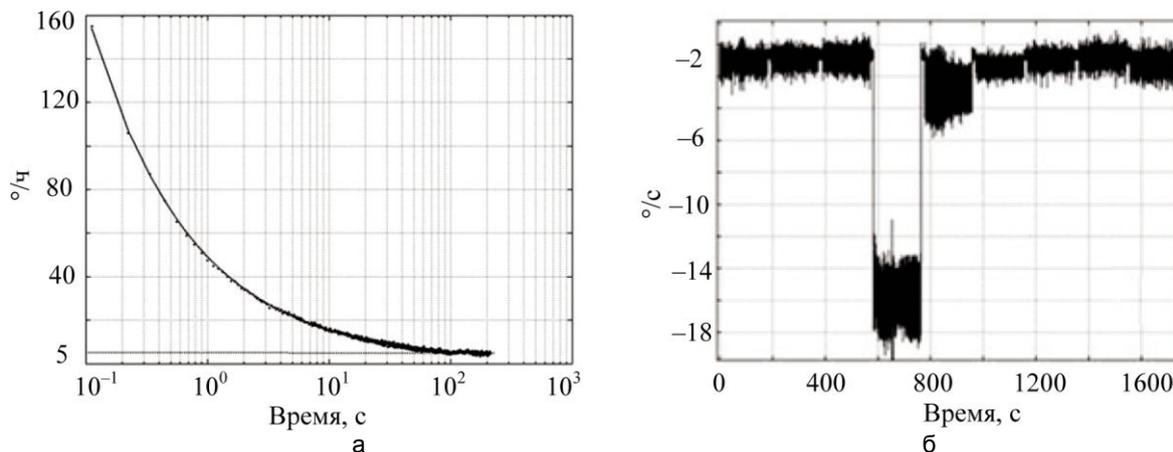


Рис. 3. Результаты испытаний: при неподвижном основании (а); при воздействии вибраций вдоль оси первичных колебаний (б)

Структурная схема дифференциального емкостного датчика перемещений с дополнительным выходом об изменении зазора

В микромеханических датчиках прямого преобразования для решения задачи компенсации предлагается алгоритмический подход. Для этого необходимо измерять не только дифференциальное изменение емкости, но и синфазное. При этом предлагается изменить существующую структурную схему преобразователя (см. рис. 4). На измерительные емкости C_1 и C_2 , которые представляют собой емкостной мост, с генератора сигнала (ГС) подается напряжение, изменяющееся по гармоническому закону. При этом через емкости будут протекать токи I_1 и I_2 , которые состоят из двух компонент:

$$I_1 = I(C_0) + I(\Delta C),$$

$$I_2 = I(C_0) - I(\Delta C),$$

где $I(C_0)$ – ток, пропорциональный величине зазора; $I(\Delta C)$ – ток, определяемый полезным изменением емкости. Эти токи с помощью трансрезистивных усилителей К1 и К2 преобразуются в напряжения U_1 и U_2 соответственно, которые также состоят из двух компонент $U(C_0)$ и $U(\Delta C)$.

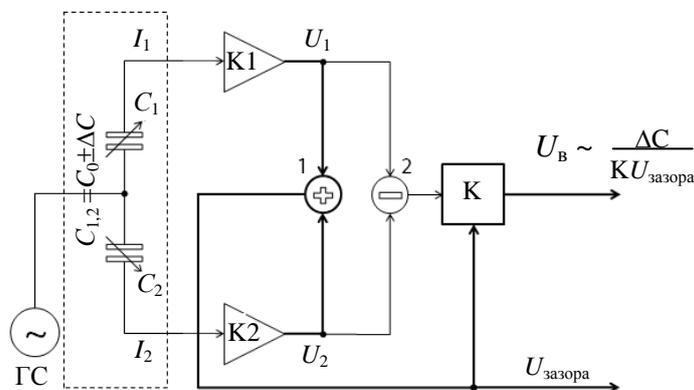


Рис. 4. Структурная схема дифференциального емкостного датчика

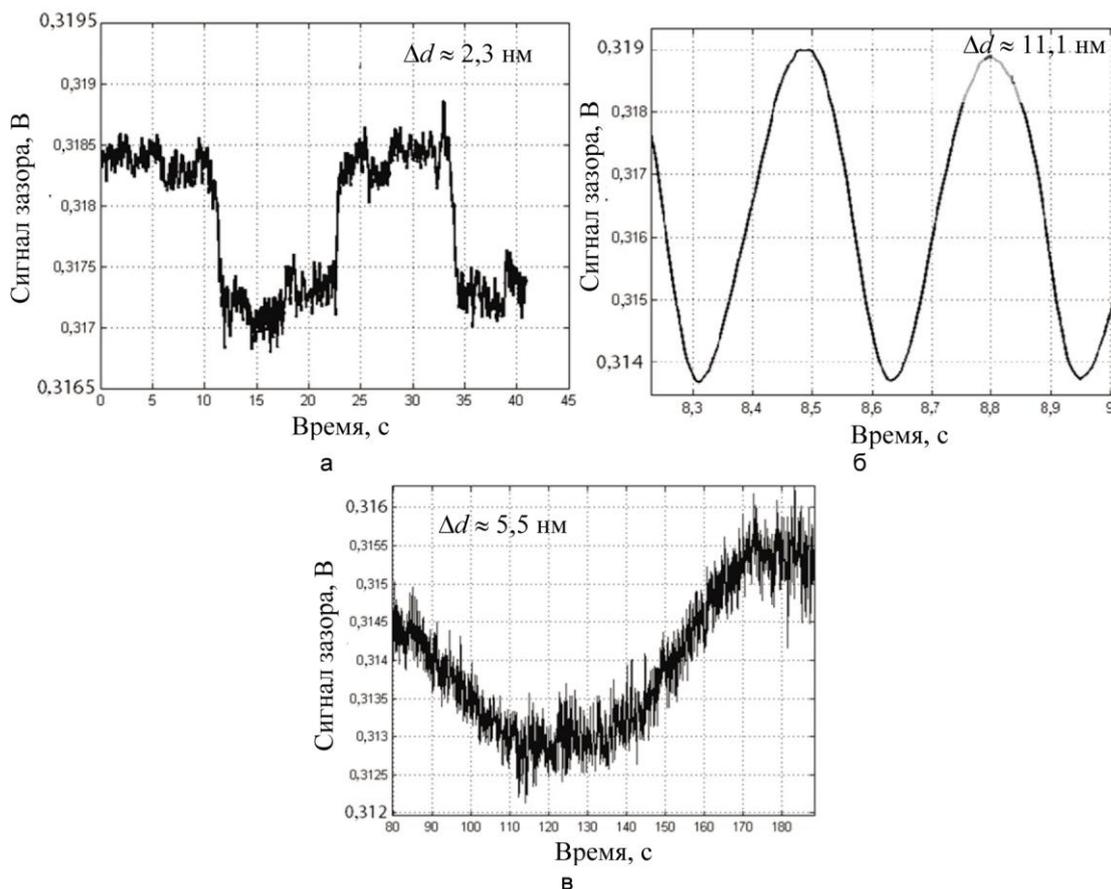


Рис. 5. Зависимость сигнала об изменении зазора при влиянии: ускорения $\pm g$ (а); вибрации $\pm 2,5 g$ с частотой 3 Гц (б); изменения температуры на 30°C (в)

После вычитания в точке 2 напряжение будет равно

$$U_1 - U_2 = (U(C_0) + U(\Delta C)) - (U(C_0) - U(\Delta C)) = 2U(\Delta C).$$

Но, так как при изменении зазора изменяется коэффициент преобразования датчика угла, то разность напряжений будет зависеть и от величины зазора, которую можно определить, если сложить напряжения U_1 и U_2 в точке 1:

$$U_1 + U_2 = 2U(C_0).$$

Полученное напряжение зависит только от компоненты, пропорциональной величине зазора. Выходной сигнал дифференциального емкостного датчика определяется отношением сигнала в точке 2 к сигналу на выходе сумматора 1 (блок компенсации К). При этом полученный выходной сигнал не зависит от зазора.

Экспериментальные исследования емкостного датчика подтвердили эффективность предложенного решения. На рис. 5 показаны сигналы, пропорциональные изменению зазора при воздействии вибраций и температуры. При изменении действующего ускорения вдоль оси Z с $+g$ на $-g$ зазор изменился примерно на 2,3 нм; при действии вибрации с частотой 3 Гц и амплитудной 2,5 g изменение составило 11,1 нм; при непосредственном нагреве чувствительного элемента на 30°C изменение составило 5,5 нм.

Использование информации об изменении зазора в устройствах компенсационного типа

В случае, когда микромеханические датчики работают по принципу компенсации входного воздействия, необходимо предпринимать дополнительные меры, так как при изменении зазора изменяются коэффициенты передачи силовых электродов.

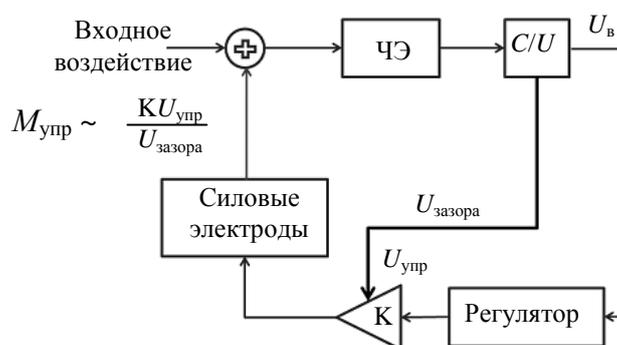


Рис. 6. Использование сигнала в датчиках компенсационного типа

На рис. 6 приведена структурная схема датчика с обратной связью [3], включающая: чувствительный элемент ЧЭ, датчик перемещений с дополнительным выходом об изменении зазора, регулятор и силовые электроды, на которых создается момент управления $M_{упр}$.

Изменение коэффициентов передачи силовых электродов при постоянном входном воздействии приводит к изменению сигнала управления $U_{упр}$, который является информационным, и появлению ошибки измерения.

С помощью дополнительного сигнала, пропорционального изменению зазора, и блока компенсации К в обратной связи датчика поддерживается постоянный коэффициент передачи силовых электродов. В этом случае масштабный коэффициент датчика не зависит от зазора.

Заключение

В работе экспериментально была получена численная оценка влияния линейных ускорений, вибраций и температуры на изменение величины зазора и масштабного коэффициента гироскопа. Предложенная структурная схема дифференциального емкостного датчика перемещений позволяет выделить информацию об изменении зазора и использовать ее для коррекции масштабного коэффициента датчиков разомкнутого типа и датчиков компенсационного типа.

Литература

1. Патент РФ № 2289789, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Устройство измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси первичных колебаний / Некрасов Я.А.; заявитель ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2005130466/28; заявл. 23.09.05; опубл. 20.12.06, Бюл. № 35. – 8 с.
2. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
3. Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4(68). – С. 46–50.
4. Патент РФ № 2393428, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Микромеханический гироскоп компенсационного типа / Некрасов Я.А., Моисеев Н.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2008143288/28; заявл. 28.10.08; опубл. 27.06.10, Бюл. № 18. – 8 с.

Люшкинков Роман Геннадьевич – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер, lukroma@yandex.ru
Моисеев Николай Владимирович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ведущий инженер, elmon@nwgsn.ru