

УДК 621.3.049.779.

Выбор элементов конструкции микромеханических автоколебательных инерциальных датчиков

А. А. Тыртычный

Аннотация

В статье рассмотрены основные принципы разработки микромеханических автоколебательных инерциальных датчиков, произведена подготовка теоретической базы, и разработаны методики анализа параметров оптоэлектронного датчика положения, рассмотрены преимущества использования электромагнитных компенсирующих преобразователей. Установлено, что применение автоколебательных механических систем в различных инерциальных датчиках позволит добиться повышения как их чувствительности, так и точности измерения, что делает их изучение крайне перспективным направлением.

Ключевые слова

Автоколебания; инерциальный датчик; микромеханика; оптоэлектронный датчик положения; магнитоэлектрический, электромагнитный и электростатические компенсирующие преобразователи.

Введение

При создании приборов, предназначенных для измерения параметров движения летательного аппарата, например, микромеханических акселерометров и гироскопов, одной из наиболее острых является проблема повышения чувствительности. Сегодня приборостроители часто решают эту задачу путем уменьшения жёсткости подвеса подвижных частей прибора, что, как правило, влечет за собой сокращение диапазона измерений и увеличение погрешности.

Для решения этой проблемы разработчики используют создание резонансных режимов колебаний с амплитудной модуляцией сигнала. Однако изучение построенных на этом принципе приборов, а также теоретическое и экспериментальное исследование таких режи-

мов показывают, что существенного успеха в достижении повышения точности высокочувствительных приборов достигнуто не было. Частотная или временная модуляция сигнала, обеспечивают большее количество информации, полученной в процессе измерения, а значит, - большую точность прибора. Одним из вариантов перехода к частотной или временной модуляции является режим автоколебаний. [1].

При создании датчиков, работающих в режиме автоколебаний, колебательной системой становится подвижный узел прибора, а обратная связь приобретает силовой характер. Чувствительный элемент обеспечивает взаимодействие датчика с измеряемой физической величиной и формирует входное воздействие, прикладываемое к подвижному узлу. Автоколебания подвижного узла поддерживаются поступлением энергии от некоторого источника, которое регулируется движением самой системы. При этом силы, создаваемые компенсирующим преобразователем (КП), будут иметь знакопеременный характер, вызывающий колебания подвижного узла. Кроме того, автоколебательные системы имеют значительно более высокие характеристики преобразования энергии, позволяющие при значительно меньшем потреблении энергии получить большее количество информации. [2]

Реализация автоколебательных режимов накладывает особые требования на выбор конструктивных схем датчиков положения (ДП) и КП.

Поиск новых решений привел к выводам о том, что для ДП наиболее перспективным является использование оптоэлектронных преобразователей, построенных на основе бескорпусных элементов. [3] В таких ДП подвижная пластина модулирует световой поток, что приводит к соответствующему изменению сигнала фотоприемника. Как правило, оптоэлектронные ДП не требуют применения опорных сигналов, что существенно упрощает схему прибора. Одним из способов реализации оптоэлектронного ДП является использование волоконно-оптических элементов.

Учитывая конструктивные особенности микромеханических ДПИ в них целесообразно использовать волоконно-оптические ДП с вынесенными излучателем и приемником сигнала. Существенной особенностью световодов в волоконно-оптических ДП является симметризация пучка лучей и усреднение освещенности по выходному торцу световода. Симметризация лучей внутри жилы приводит к усреднению распределения света по выходному торцу и его равномерной освещенности. Эти свойства световодов являются одной из предпосылок линейности характеристик волоконно-оптических преобразователей перемещения непрозрачного тела. Весьма ценно и еще одно свойство световодов - их способность к светопередаче через сильно изогнутые участки. При радиусе изгиба световода R , не превышающем 6-7

диаметров световода d_c , относительное (по сравнению с прямым световодом) светопропускание γ составляет около 60%. [4]

В микромеханических приборах ДП может представлять собой систему из двух коаксиальных световодов, в зазор Δ между параллельными торцами которых помещено непрозрачное тело – подвижный узел. Если осветительный световод соединен с источником света, а приёмный световод (радиусом $r_{п.с.}$) — с фотоприемником, то сигнал последнего и будет связан с перемещением Δr непрозрачного тела в направлении, перпендикулярном оптической оси системы. Эта связь будет однозначной при выполнении условия $d_c \geq r_{п.с.}$. Если яркость света постоянна по сечению луча, достигающего приемного световода, то световой поток, поступающий в фотоприемник, будет пропорционален площади перекрываемой части сечения приемного световода. При этом сигнал фотоприемника пропорционален световому потоку и значение безразмерного сигнала определяется соотношением

$$\bar{u} = \frac{u}{u_{max}} = \frac{1}{\pi} [\arccos(1 - \overline{\Delta r}) - (1 - \overline{\Delta r})\sqrt{(2\overline{\Delta r} - \overline{\Delta r}^2)}], \quad (1)$$

где u_{max} - максимальное значение u ,

$$\overline{\Delta r} = \frac{\Delta r_0 + \Delta r}{r_{п.с.}}.$$

Характерной особенностью зависимости $\bar{u}(\overline{\Delta r})$, рассчитанной по (1), является наличие участка, близкого к линейному в диапазоне $0.5 \leq \overline{\Delta r} \leq 1.3$.

Эта зависимость при принятых допущениях относительно однородности луча света и линейности фотоприемника принимает вид:

$$\bar{u} = \frac{\arccos(1 - \overline{\Delta r_0} - \Delta r) - (1 - \overline{\Delta r_0} - \Delta r)\sqrt{2(\overline{\Delta r_0} + \Delta r) - (\overline{\Delta r_0} + \Delta r)^2}}{\arccos(1 - \overline{\Delta r_0}) - (1 - \overline{\Delta r_0})\sqrt{2\overline{\Delta r_0} - \overline{\Delta r_0}^2}}.$$

Величина диаметра приемных световодов варьируется в пределах от 15 до 150 мкм. Чувствительность к перемещению, определенная расчетным путем по выходной характеристике скорость – сигнал, достигает 0,1 мкм. [5]

Из теории построения приборов с обратной связью известно, что наибольшее влияние на точностные параметры инерциальных датчиков оказывают характеристики КП. Поэтому необходим тщательный анализ характеристик электростатических КП для последующего сравнения их с характеристиками электромагнитных КП. Такой сравнительный анализ был проведён в работе [6].

Метрологические характеристики электростатических КП существенным образом зависят от неравенства опорных напряжений на неподвижных обкладках, различий начальных

ёмкостных зазоров и глубины модуляции зазора. Кроме того, для электростатических КП критичными являются поверхностные дефекты и частицы пыли, а также малые вертикальные размеры, поскольку при этом трудно обеспечить требуемое изменение ёмкости. Отмеченные обстоятельства оказывают негативное влияние на характеристики микромеханических инерциальных датчиков. Для электромагнитных КП вышеуказанные недостатки не так существенны.

С этой точки зрения представляет интерес анализ и сравнение силовых характеристик некоторых типов КП с подвижной центральной пластиной, реализация которых возможна в рамках технологий микромеханики. К таким КП можно отнести: а) электростатический, б) электромагнитный, в) магнитоэлектрический. Схемы КП приведены на рисунках 1...3, соответственно.

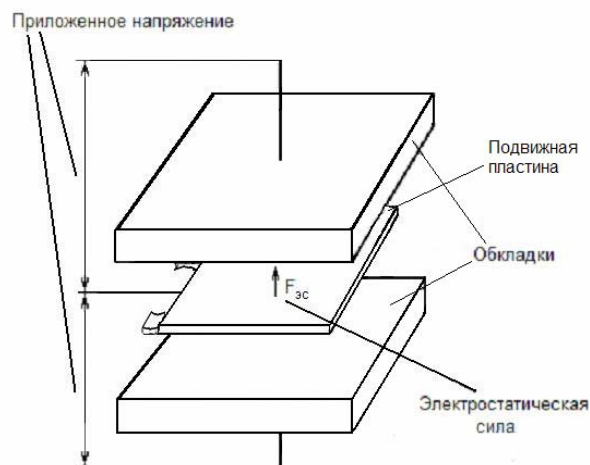


Рисунок 1 - Электростатический КП.

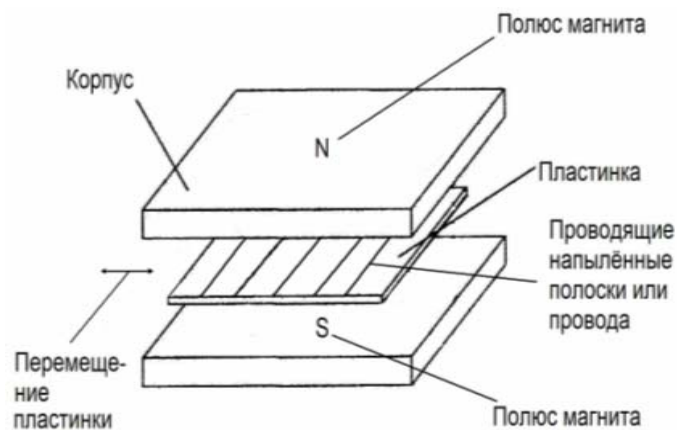


Рисунок 2 - Магнитоэлектрический КП

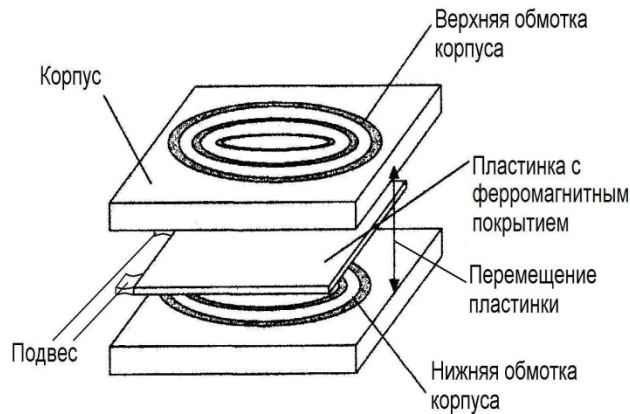


Рисунок 3 - Электромагнитный КП

В качестве примера рассматриваются преобразователи со следующими геометрическими характеристиками: размеры пластины 5мм×5мм, толщина 200мкм, зазор между пластинами $\delta=0,1$ мм.

При напряжении между пластинами электростатического преобразователя $U=30$ В значение электростатической силы составит

$$F = \frac{\xi S U^2}{(2\delta)^2} = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ Н},$$

где ξ – диэлектрическая проницаемость среды, S – площадь пластины [7].

Магнитоэлектрический КП фактически представляет собой линейный двигатель, в котором движение пластины происходит в горизонтальной плоскости под действием силы Ампера, пропорциональной величине тока, протекающего по проводящим полоскам.

Ограничим максимальный ток проводящей полоски тепловой мощностью, которую возможно отвести через корпус датчика при помощи естественной конвекции. Примем предположение, что тепловая энергия, выделяющаяся на проводящей полоске, мгновенно передаётся на корпус датчика. В соответствии с законом Ньютона-Рихмана, при теплопередаче через площадь S в окружающую среду без принудительной конвекции максимальная отведённая мощность Q будет равна

$$Q = \sigma \cdot S \cdot (T_0 - T_{cp}),$$

где σ – тепловая проводимость, T_0 – температура датчика, T_{cp} – температура окружающей среды [1].

Тогда максимальный ток проводящей полоски будет равен

$$I = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (T_0 - T_{cp})}{R}},$$

где R – сопротивление проводящей полоски.

В случае напыления полосок с одной стороны сила будет равна

$$F = I_{max} \cdot B \cdot n \cdot l.$$

При индукции $B = 1.8$ Тл оптимальным является напыление 150 полосок шириной 23,4 мкм на пластину. При подаче на каждую полоску тока 2 мА, суммарная сила Ампера будет максимальной и составит 300 мкН.

Электромагнитный преобразователь силы с использованием ферромагнитного слоя работает по принципу электромагнитного реле [8].

В данном случае сила будет равна

$$F = \frac{3 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot V \cdot z^2 \cdot I \cdot r}{8} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{n^2}{\left(\left(\frac{nz}{2}\right)^2 + r^2\right)^{\frac{5}{2}}},$$

где r – расстояние, на которое перемещается пластинка, V – объём ферромагнетика, μ – магнитная проницаемость ферромагнетика ($\mu=100000$) [6].

При заданных исходных данных значение силы составит $6,72 \cdot 10^{-6}$ Н.

Увеличение силы взаимодействия (примерно на порядок) возможно за счет создания многослойных катушек (два-три слоя) и напыления ферромагнетика большей толщины.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что реализация в инерциальных микромеханических ДС магнитоэлектрического принципа преобразования позволяет приблизительно в 30 раз увеличить его силовые характеристики по сравнению с характеристиками электростатических ДС. Поэтому, создание таких ДС дает возможность (при некотором усложнении технологии производства) расширить диапазон измерений и минимизировать погрешности датчиков, а также реализовать автоколебательные режимы. Кроме того, электромагнитный и магнитоэлектрический компенсирующие преобразователи являются более помехозащищенными.

Результаты анализа силовых характеристик различных типов ДС, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Вид ДС	Максимальное значение силы, мкН
Электростатический ДС	11,0
Электромагнитный ДС	6,7
Магнитоэлектрический ДС	300,0

Силовые характеристики магнитоэлектрического и электромагнитного ДС можно существенно увеличить за счёт использования современных ферромагнитных материалов, например, спечённых Nd – Fe - В, в том числе наноструктурных материалов [6].

Заключение

Таким образом, была рассмотрена возможность реализации автоколебательных инерциальных датчиков с использованием оптоэлектронных и магнитоэлектрических компонентов. На основе данного исследования установлено, что применение оптоэлектронного ДП позволяет упростить схему инерциального датчика, так как в данном случае не требуется использование опорных генераторов. Выявлен линейный участок работы оптоэлектронного ДП. Указаны преимущества силовых характеристик электромагнитного КП по отношению к электростатическому КП. Применение этих элементов позволит реализовать автоколебательные механические системы в различных инерциальных датчиках, что приведёт как к повышению их чувствительности, так и к расширению диапазона измерения.

Библиографический список

- [1] *Варадан В., Виной К., Джозе К.* ВЧ МЭМС и их применение. М: Техносфера, 2004. 528 с.
- [2] *Скалон А. И.* Физические основы и пути оптимизации характеристик электро-механических датчиков компенсационного типа. Ч. 1 // Датчики и системы. 2008. № 11. С. 2-4.
- [3] *Тыртычный А.А.* Построение измерительных устройств на основе автоколебательных механических систем. // Всероссийская Молодежная Научная Конференция Мавлютовские чтения: Сб. докл./ УГАТУ. Уфа, 2008. С. 49-51.
- [4] *Barbour N. et al.* Micro-Electromechanical Instrument and Systems Development at Draper Laboratory // 3rd Saint Peterburg International Conference of Integrated Navigation Systems. –SPb.: CSRI «Electropribor», 1996.-Part 1.-P.3-10.
- [5] *Мокров Е.А.* Проблемы и перспективы развития датчиковой аппаратуры. Микросистемная техника. № 9 . 2003. С.49-51.
- [6] *Tirtichny A.* The comparative analysis of characteristics of compensating converters of micromechanical inertial sensors // Information and communication technologies: problems, perspectives. 2008. P. 76-80.
- [7] Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М: ЛБЗ, 2004. 488 с.
- [8] Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Ленинград, Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

[9] *Тыртычный А., Скалон А.* Анализ характеристик компенсирующих преобразователей микромеханических инерциальных датчиков// Датчики и системы. 2009. № 2. С. 21–23.

Сведения об авторах

Тыртычный Алексей Анатольевич – ассистент Санкт-Петербургского Государственного Университета Аэрокосмического Приборостроения.

Почтовый адрес: 199048 Санкт-Петербург, Малый пр. В О, д. 37, кв. 2.

Тел. 8-905-262-09-96

E-mail: alekseyguar@mail.ru