

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются вопросы разработки микромеханических инерциальных датчиков, работающих в режиме автоколебаний. Показаны пути анализа параметров таких датчиков на основе анализа информационно-энергетических характеристик, а также возможности реализации микромеханических приборов с использованием новой элементной базы: оптоэлектронных датчиков положения и магнитоэлектрических компенсирующих преобразователей. Описаны преимущества таких приборов.

Введение

В настоящее время имеет место тенденция быстрого роста задач измерений практически во всех сферах деятельности человека. Исследованиям в обеспечение решения этих задач развитые страны уделяют большое значение. Датчики становятся основными элементами, определяющими общее качество и стоимость информационно-измерительных и управляющих систем. Поэтому общие требования к датчикам могут быть сформулированы следующим образом. Помимо высоких метрологических характеристик приборы должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации. Для реализации указанных требований при создании новых датчиков внедряются новые технологии, новые конструкционные, функциональные и интеллектуальные материалы, электронные, радиотехнические, электротехнические и другие компоненты. При этом по-прежнему очевидна тенденция к созданию приборов компенсационного типа, поскольку компенсационный метод измерения обеспечивает высокую точность измерений. В первую очередь сказанное относится к инерциальным датчикам систем управления и навигации для подвижных объектов.

Несмотря на достигнутые значительные результаты в плане создания инерциальных датчиков, дальнейшее улучшение их характеристик традиционными методами с использованием известных конструктивных решений, материалов и технологий весьма ограничены. Существенное уменьшение массы и габаритов микромеханических устройств приводит к появлению новых свойств объектов. На первый план выходят тепловые факторы, влияющие на плотность, размер и коэффициенты упругости, температурные деформации и напряжения; особые механические свойства материала, которые проявляются в анизотропии упругих свойств, квазиупругости, ползучести; эффекты демпфирования, сжимаемости и объемной упругости газа; неньютоновские эффекты; зависимость характеристик от тепловых градиентов и градиентов плотности.

Скалон Анатолий Иванович. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», профессор СПбГУАП (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

По результатам многочисленных разработок микромеханических инерциальных датчиков стали очевидны их принципиальные недостатки.

Во-первых, чрезмерное увлечение минимизацией габаритов приборов привело к существенной потере их чувствительности к входному воздействию, увеличению влияния помех разного рода и, соответственно, к снижению точности измерения.

Во-вторых, использование емкостных силовых преобразователей, имеющих исключительно малые силовые характеристики, приводит к необходимости использования резонансных режимов работы приборов, а также требует уменьшения массы чувствительных элементов. Более того, для обеспечения высокой добротности колебательной системы прибора необходимо осуществлять вакуумирование и герметизацию внутреннего объема датчика, что само по себе является достаточно сложной технологической операцией.

В-третьих, малость геометрических размеров подвижных чувствительных элементов приборов и их реакция на воздействия измеряемых физических величин в виде микро- и наноперемещений приводят к проблеме сверхточных измерений емкостей и их приращений. Перемещения характеризуются единицами или долями нанометров, а вариации емкости – единицами фемтофарада. Причем достоверность этих оценок представляется некорректной, поскольку эти величины получены не прямыми измерениями, а путем пересчета выходного сигнала к входному воздействию.

В настоящее время говорить об измерениях таких величин с возможной оценкой погрешности измерений не имеет смысла. Можно говорить лишь о порядке измеряемой величины, понимая при этом, что погрешность измерений может достигать 100%. Фактически речь идет об оценке чувствительности преобразователей перемещений. При этом ограничения чувствительности связаны с флуктуационными процессами как в самом преобразователе, так и в электрических цепях электронных блоков [1].

В-четвертых, емкостные преобразователи перемещений и компенсирующие силовые преобразователи (КП) имеют нелинейные характеристики преобразования, что требует введения дополнительных корректирующих устройств в контурах приборов для линеаризации их характеристик.

Отмеченные обстоятельства оказывают негативное влияние на характеристики микромеханических датчиков (ММД) и неизбежно приводят к поиску новых решений в рамках технологий микромеханики.

Для прорыва в области создания высокоточных и высокочувствительных микромеханических инерциальных датчиков необходим поиск принципиально новых схмотехнических и конструктивных решений.

Особенно это очевидно, если говорить о создании микромеханических приборов, способных по своим характеристикам конкурировать с лазерными или волоконно-оптическими датчиками. В значительной степени разрешить указанные проблемы при создании прецизионных и высокочувствительных микроминиатюрных и микромеханических инерциальных датчиков с цифровым выходом позволяет использование в приборах компенсационного типа режима автоколебаний, реализующих принцип динамического уравнивания.

Первоначально предлагаемые схемные решения были обоснованы теоретически, а затем подтверждены экспериментальными исследованиями на созданных макетах и опытных образцах приборов. Результаты исследований были опубликованы в период с 1983 по 2012 гг. в журналах [2–5] монографии [6],

а также в отчетах по ОКР «Разработка и изготовление трехкоординатного малогабаритного акселерометрического модуля для систем ориентации подвижных объектов» (программа «Функциональная электроника» постановление Исполкома Союза Белоруссии и России № 4 от 10 июля 1998 г.). В ходе указанной ОКР были проведены исследования на штатных акселерометрах АЛЕ-048 (НИИФИ, г. Пенза) в режиме автоколебаний, а также сконструирован и изготовлен во МНИИРМ (г. Минск) опытный образец микромеханического акселерометра [7].

Особенность предлагаемой концепции построения приборов, например акселерометра или датчика угловой скорости (ДУС), работающих в режиме автоколебаний, заключается в том, что они представляют собой измерительные устройства компенсационного типа, в которых подвижный узел (ПУ) прибора совершает колебания (автоколебания) с некоторыми постоянными амплитудой и частотой. Наличие входного воздействия приводит к смещению центра колебаний ПУ и соответствующей временной (частотной) модуляции управляющего сигнала, величина которой пропорциональна измеряемому воздействию.

Здесь следует сразу же расставить точки над «i» в части классификации автоколебательных измерительных систем, поскольку многие авторы относят к классу автоколебательных практически все системы, в которых тем или иным способом возбуждаются колебания. Особенно это касается измерительных преобразователей и датчиков, например микрогироскопов и микроакселерометров, в которых за счет положительной обратной связи возбуждаются резонансные колебания [7].

Классификация на структурном уровне определяет автоколебательные системы как системы, в которых осуществляется преобразование энергии постоянного источника в энергию колебаний. Необходимыми элементами таких систем являются собственно колебательный узел (КУ); источник постоянной энергии (ИПЭ); элемент, управляющий поступлением энергии в колебательный узел – ключ, клапан (КЛ); цепь обратной связи между колебательным узлом и ключом (УОС). Структурно эти элементы представляют собой замкнутую систему, являющуюся принципиально нелинейной (рис. 1).

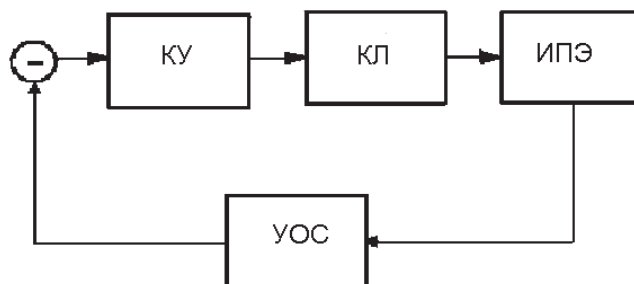


Рис. 1. Обобщенная структурная схема автоколебательной системы

При построении электромеханических инерциальных датчиков, работающих в режиме автоколебаний, общая структура, сохраняя функции элементов, несколько меняет смысловую нагрузку. В этом случае колебательной системой становится подвижный узел (ПУ) прибора, а обратная связь приобретает силовой характер (рис. 2).

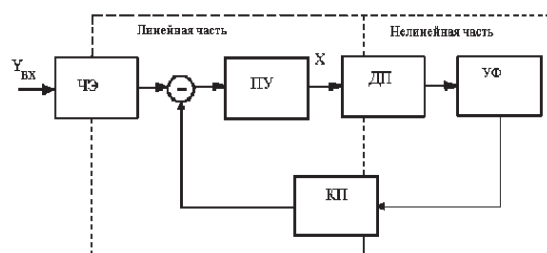
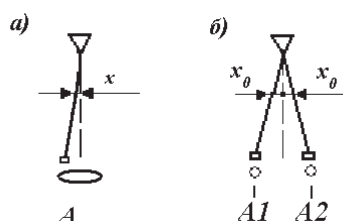


Рис. 2. Структурная схема автоколебательного датчика

Чувствительный элемент (ЧЭ) обеспечивает взаимодействие датчика с измеряемой физической величиной $Y_{вх}$ (процессом) и формирует входное воздействие $F_{вх}$, прикладываемое к ПУ. Силовая обратная связь формирует компенсирующее воздействие $F_{КП}$, которое из-за наличия релейного элемента, формируемого на основе датчика положения (ДП) и усилителя-формирователя (УФ), имеет импульсную форму. Автоколебания ПУ поддерживаются поступлением энергии от некоторого источника, которое регулируется движением самой системы. При этом силы, создаваемые компенсирующим преобразователем (КП), будут иметь знакопеременный характер, вызывающий колебания ПУ. Такой режим работы приборов приводит к принципиальным изменениям процесса измерения.

В датчиках, работающих в режиме автоколебаний, вследствие периодического движения ЧЭ процесс измерения происходит иначе, поскольку регистрируемой величиной становится время, а не амплитуда перемещения. Пояснить это можно на примере маятникового компенсационного акселерометра. На рис. 3 показано, что в приборах, построенных по «обычной» схеме, наличие входного воздействия приводит к отклонению подвижного узла на некоторую малую величину, которая измеряется датчиком угла (рис. 3, а), а в автоколебательной схеме при колебательном движении ПУ фиксируются лишь моменты прохождения последним некоторых фиксированных относительно корпуса точек А и А' (рис. 3, б).

Рис. 3. Принципы регистрации входного воздействия:
а) в приборах с аналоговым контуром, б) в автоколебательных приборах

Для пояснения особенностей работы прибора на рис. 4 приведены статическая характеристика ключевого элемента; диаграмма движения ПУ; диаграмма сигнала управления, поступающего в цепь обратной связи. Из приведенных диаграмм видно, что переключение управляющего сигнала в цепи обратной связи происходит в точках 1, 2, 3 и т.д. При этом наличие входного воздействия приводит к смещению центра колебаний ПУ и соответствующей временной модуляции управляющего сигнала в контуре прибора.

Таким образом, использование автоколебательного режима работы дает возможность более естественным образом осуществить широтно- или частотно-импульсную модуляцию выходного сигнала, поскольку датчики, работающие в таком режиме, представляют собой пространственно-временной модулятор, осуществляющий преобразование входной величины, воздействующей на ЧЭ, в модулированный биполярный выходной сигнал. При этом, как уже отмечалось, регистрируемым параметром становится время, поскольку глубина модуляции выходного сигнала пропорциональна входному воздействию. Диаграмма движения ПУ и вид формируемых сигналов показаны на рис. 4, где в качестве измеряемых отрезков времени следует рассматривать отрезки τ_1 и τ_2 между моментами пересечения кривой процесса движения ПУ условных осей ОТ1 и ОТ2 срабатывания компараторов датчика положения, например точки 4 и 5. Влияние шума в этих условиях проявляется в разбросе моментов пересечения кривых конкретных реализаций процесса и оси ОТ1.

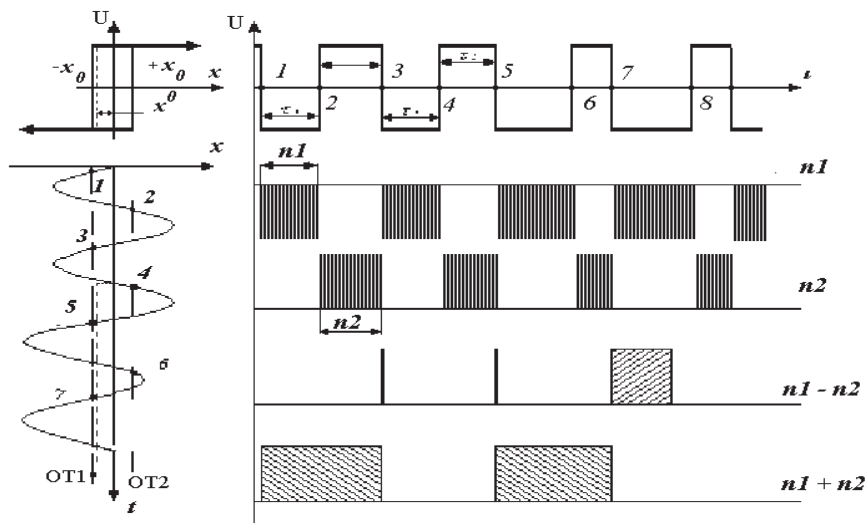


Рис. 4. Диаграммы движения ПУ и выходных сигналов

Вид модуляции сигнала определяется физической природой измеряемого процесса. В случае если измеряемая величина по физической сущности отличается от параметров, определяющих свойства датчика (инерция, демпфирование, жесткость), то осуществляется широтная модуляция выходного сигнала. При совпадении физической природы входного воздействия и параметров прибора, например при измерении сопротивления среды (сухого или вязкого трения), жесткости, инерционности и т.п., происходит изменение частоты автоколебаний системы, пропорциональное измеряемой величине.

При этом соотношение сигнал/шум у приборов, работающих в режиме автоколебаний, существенно лучше, чем у приборов, построенных по традиционным схемам, поскольку отсечка времени производится в точках, где сигнал датчика положения ПУ уже имеет существенную величину и отпадает необходимость измерять сверхмалые величины перемещений ПУ, избежать влияния квадратурных и синфазных помех и тем самым существенно улучшить чувствительность приборов.

Следует отметить, что зарубежные разработчики ММД также пришли к пониманию того, что для уменьшения погрешности измерений (шумовых составляющих) необходимо переходить от амплитудной модуляции к временной и измерять временные характеристики выходного сигнала ММД.

В частности, в работе [8] предложен альтернативный метод для измерения силы инерции (ускорения), который основан на измерении времени прохождения осциллятором (инерционной массой) фиксированных точек (плоскостей) переключения при гармоническом движении. Концепция, которая названа «время переключения фиксированных плоскостей (TDS)», позволяет реализовать новый способ в инерциальных измерениях, который однозначно и постоянно соотносит точность с разрешением и стабильностью. Потенциально метод TDS имеет более высокую точность, низкий дрейф и меньший уровень шума, чем традиционные методы MEMS.

Смысл метода заключается в восстановлении полного движения гармонического осциллятора (в том числе смещений из-за приложенных сил) путем измерения интервалов времени при пересечении гармоническим осциллятором фиксированных точек (плоскостей). Вычисленное значение смещения является эквивалентом смещения, которое измеряется в инерциальных датчиках, построенных по традиционным схемам.

По приведенным оценкам переход к измерению временных характеристик позволил довести уровень шума микроакселерометра до минус 178 дБ при частоте колебаний осциллятора 1 кГц.

Однако описанный метод TDS существенно отличается от методов измерения, которые использованы при разработках автоколебательных микромеханических приборов. Разница заключается в том, что метод TDS реализуется в рамках достаточно традиционных конструктивно-технологических решений построения микроакселерометра на основе электростатических элементов. При этом прибор построен по разомкнутой схеме и работает в режиме вынужденных колебаний. Приведенные в работе [8] результаты моделирования вызывают сомнения, поскольку задача точного восстановления синусоидального сигнала по четырем точкам на периоде колебаний в реальных приборах представляется не весьма корректной.

Реализация режима автоколебаний и концепции динамического уравнивания дает возможность решить целый ряд «тупиковых» проблем:

- существенно упростить структуру приборов, используя схемы, работающие на постоянном токе;
- использовать для формирования контура приборов новые для микромеханики элементы: магнитоэлектрические компенсирующие преобразователи и фотоэлектрические датчики перемещения [9];
- разорвать однозначную связь между полосой пропускания контура и точностью датчика положения, существующую в приборах с линейным контуром управления. Зависимость погрешности измерительного устройства от полосы пропускания для линейной системы определяется соотношением $\|\Delta Y_{\text{вх}}\| = \|\Delta X\| \varpi$, а для частоты автоколебательной системы, определяющей период колебаний и косвенным образом моменты переключения сигнала в КП $\Omega = \sqrt{K_n} \omega_0$, где $\Delta Y_{\text{вх}}$ – входное воздействие, ΔX – реакция (перемещение) подвижного узла системы, ϖ – частота линейной системы, Ω – частота автоколебаний, K_n – коэффициент преобразования нелинейной системы [10];

- минимизировать вид и время переходного процесса, доведя его при оптимальном законе управления до одного периода автоколебаний [11];
- работать в дорезонансном режиме;
- отказаться от вакуумирования внутреннего объема ММД.

Отсутствие необходимости регистрировать сверхмалые величины перемещений ПУ позволяет по-новому подойти к выбору элементной базы приборов при сохранении технологии их изготовления и использовать фотоэлектрический датчик перемещений, а в качестве компенсирующего преобразователя магнитоэлектрический датчик силы (ДС).

Для датчика положения наиболее перспективным является использование фотоэлектрических преобразователей, построенных на основе бескорпусных элементов. В таких ДП подвижная пластина модулирует световой поток, что приводит к соответствующему изменению сигнала фотоприемника. Как правило, фотоэлектрические оптоэлектронные ДП не требуют применения опорных сигналов, что существенно упрощает схему ММД.

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 [12].

Схема магнитоэлектрического ДС представлена на рис. 5.

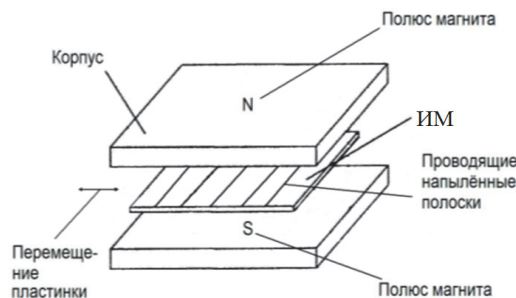


Рис. 5. Магнитоэлектрический ДС

Изложенная концепция реализована в автоколебательном микромеханическом гироскопе (АММГ) [13], конструктивная схема которого представлена на рис. 6. Датчик представляет собой двухмассовый ДУС LL-типа и выполняется по кремниевой технологии с применением магнитоэлектрических и оптоэлектронных преобразователей. Две подвижные инерционные массы (ИМ) 1 и 10 закреплены на упругих элементах подвеса 16 и 11 в несущей раме в зазоре между двумя постоянными магнитами с возможностью линейного перемещения по двум взаимно перпендикулярным (продольной и поперечной) осям. ИМ представляют собой пластины из монокристаллического кремния с прямоугольными оптическими щелями 4 и 7.

В качестве ДП использованы оптоэлектронные преобразователи, состоящие из пар излучателей 3, 5, 6, 8 и фотоприемников 15, 14, 13, 12, построенные на основе бескорпусных элементов. Компенсирующие преобразователи магнитоэлектрического типа представляют собой линейные двигатели с постоянными магнитами, закрепленными на крышках датчика, и токопроводящими элементами, реализованными путем напыления на поверхности каждой ИМ токопроводящих полосок 2 и 9.

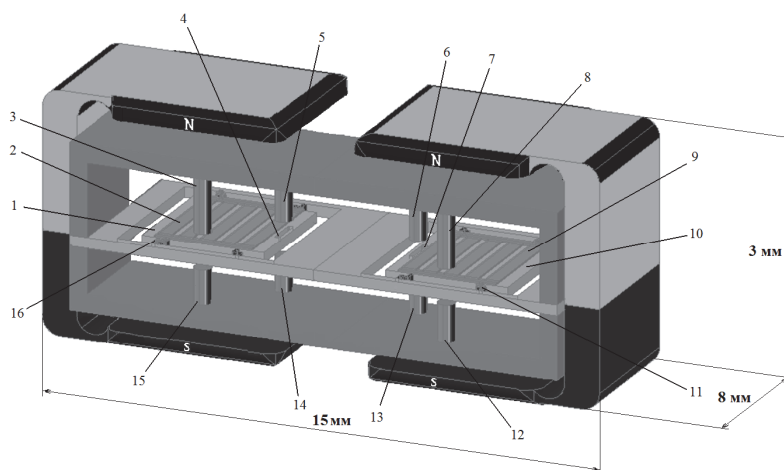


Рис. 6. Конструктивная схема АММГ
(в целях наглядности указанные на рисунке пропорции отличаются от реальных)

Реализация автоколебательного режима работы осуществляется за счет введения в контур прибора нелинейного звена (компаратора и ключа) (рис. 7).



Рис. 7. Характеристика нелинейного звена

В автоколебательном ММГ использован магнитоэлектрический ДС, постоянная времени которого $T_2 = 10^{-8}$ с.

Динамика системы была исследована с использованием модели системы в программной среде Simulink. При выбранных параметрах получены следующие значения частоты автоколебаний механической системы: 503 Гц (постоянная времени колебательного звена $1.99 \cdot 10^{-3}$ с).

Упрощённые схемы канала возбуждения и выходного канала ММГ представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

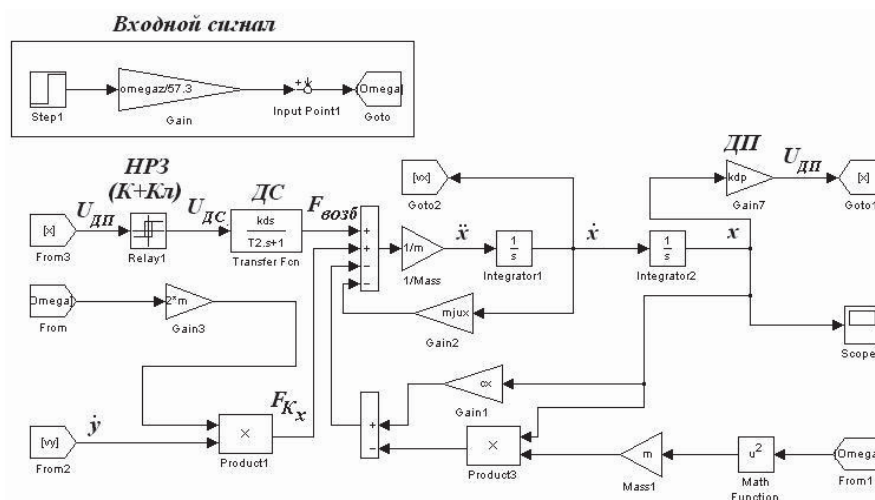


Рис. 8. Схема канала возбуждения автоколебательного ММГ

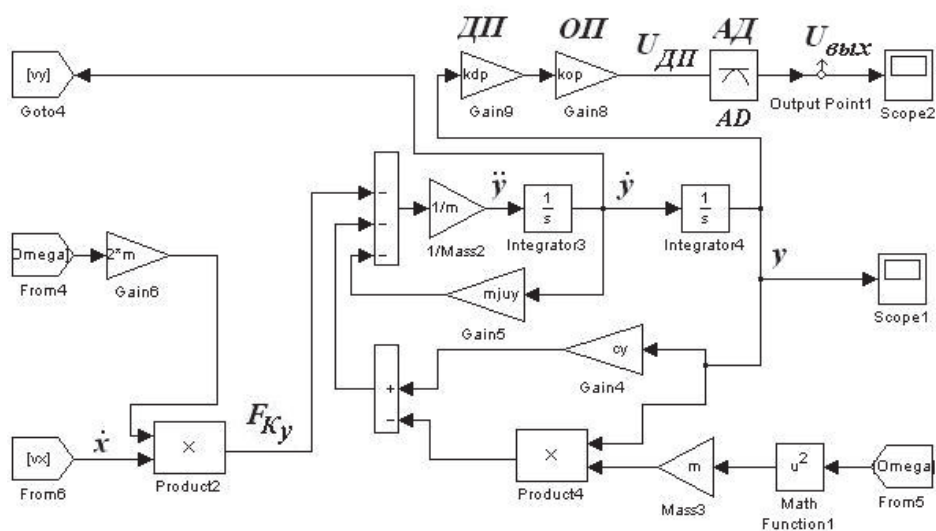
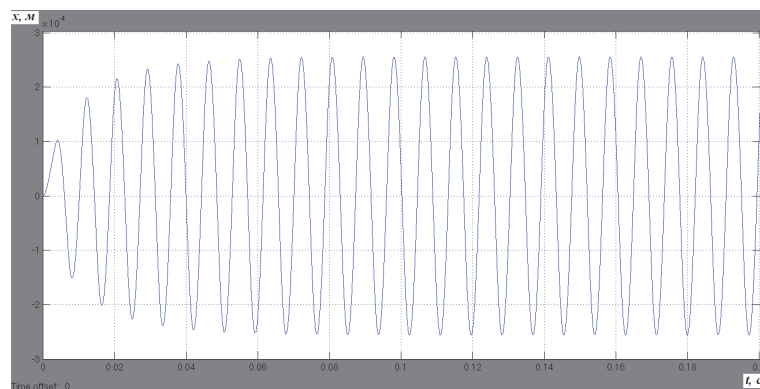


Рис. 9. Схема выходного канала автоколебательного ММГ

Результаты моделирования движения канала возбуждения и выходного канала приведены на рис. 10.

а)



б)

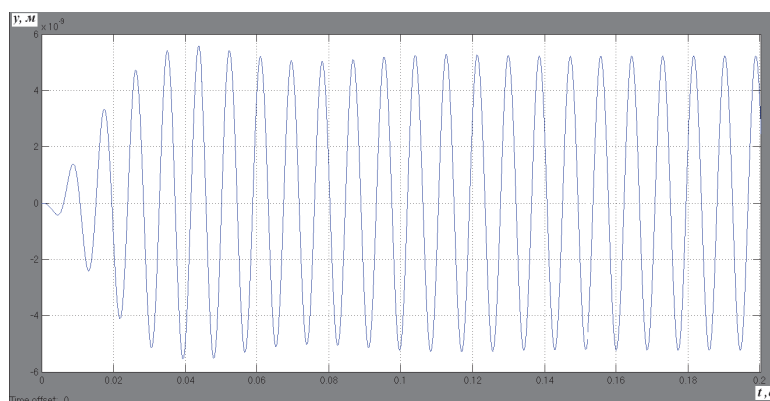


Рис. 10. Результаты моделирования движения ИМ по каналу возбуждения (а) по выходной оси (б)

По результатам моделирования движения ИМ получены следующие параметры:

по каналу возбуждения

частота колебаний $\Omega = 503$ Гц, амплитуда колебаний $A = 2,6 \cdot 10^{-4}$ м;

по выходному каналу

частота колебаний $\Omega = 503$ Гц, амплитуда установившихся колебаний $5 \cdot 10^{-6}$ м, время выхода на режим 0,05 с, коэффициент преобразования $K=0,59$ мВ/°/с [8].

Зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от угловой скорости ω_z представлена на рис. 11.

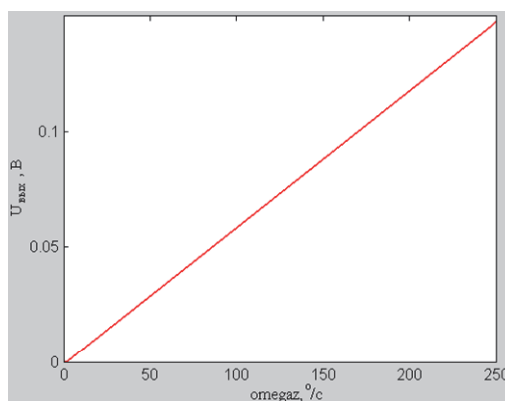


Рис. 11. Характеристика преобразования

Оценки шумовых характеристик показывают, что в рабочей полосе частот (до 70 Гц) уровень шума АММГ по СКО измеряемой угловой скорости равен $1,29 \cdot 10^{-7}$ °/с/√Гц.

На основе описанной концепции построения микромеханических инерциальных датчиков были также разработаны конструктивные схемы углового и двухмассового линейного акселерометров [14, 15].

Таким образом, проведенные исследования показали, что изменение принципа построения и работы приборов приводит к изменению физической сущности как процесса измерения, так и реализации компенсирующего воздействия, которое осуществляется в непрерывном динамическом режиме интегрально за период колебаний. Наличие периодического движения подвижного узла приводит к тому, что ММД, работающие в режиме автоколебаний, приобретают свойства пространственно-временного модулятора, осуществляющего преобразование измеряемой физической величины в пропорционально модулированный биполярный электрический сигнал. При этом введение режима автоколебаний дает возможность повысить их чувствительность на порядок, а также существенно снизить их погрешности. Это дает основание считать, что, базируясь на описанных решениях, можно создать микромеханические датчики, характеристики которых будут существенно лучше, чем у существующих приборов.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00190-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В.А., Скалон А.И. Метрологическая проблема микроэлектромеханических систем и методологические основы ее решения // Измерения, контроль, автоматизация.- 2006.- №8.
2. Скалон А.И. Пути повышения чувствительности микроминиатюрных датчиков первичной информации систем управления подвижных объектов //Измерительная техника.1998.-№3.
3. Скалон А.И., Рыбаков В.И., Жуков В.Н. и др. Принципы построения и конструкции микро-механических измерителей параметров движения.//Малые космические аппараты. Выпуск
4. Скалон А.И. Общность проектирования и расчета элементов микроминиатюрных и микро-механических датчиков // Датчики и системы. 2002, № 9. С.13 – 16.
5. Скалон А.И. Разработка принципов построения микромеханических датчиков первичной информации интегрального уравнивания с использованием оптоэлектронных и электромагнитных элементов//Микросистемная техника 2004, №4
6. Инфраструктура малых космических аппаратов / Под ред. В.Ф. Фатеева.- М.: Радиотехника, 2011.
7. Распопов В.Я. Микромеханические приборы.- М. Машиностроение, 2007.
8. Richard L. Waters*, Mark Fralick, David Jacobs, Sherry Abassi, Ricardo Dao, Dave Carbonari, Greg Maurer. Factors Influencing the Noise Floor and Stability of a Time Domain Switched Inertial Device* Senior Member IEEE Lumedyne Technologies Inc. 2012.
9. Скалон А.И. Разработка принципов построения микромеханических датчиков первичной информации интегрального уравнивания с использованием оптоэлектронных и электромагнитных элементов // Микросистемная техника.- 2004.- № 4.
10. Вольфсон Г.Б Скалон А.И. О классе точности элементной базы в автокомпенсационных схемах гравитационных вариометров // Судостроительная промышленность. Сер. Навигация и гироскопия.- 1991.-Вып. 1.
11. Скалон А.И. Особенности динамических процессов в измерительных устройствах, работающих в режиме автоколебаний // Измерительная техника.- 1994.-N 8.
12. Скалон А.И. Тыртычный А.А. Анализ характеристик компенсирующих преобразователей микромеханических инерциальных датчиков // Датчики и системы.- 2009. -№ 2.
13. Скалон А.И.,Тыртычный А.А. Микромеханический датчик угловой скорости. Патент на изобретение №2410701 МКП G01P 9/04, G01P 15/00. Зарегистрировано в Госреестре РФ27.01.2011.
14. Скалон А.И., Орлов А.С., Завиновский Л.А. Угловой акселерометр. Патент на изобретение №2399915 G01P 15/00. Зарегистрировано в Госреестре РФ 27.01.2011.
15. Скалон А.И., Калаурный Я.Н., Григорьев А. В. Линейный микроакселерометр / Патент на изобретение № 2410703. Зарегистрировано в Госреестре РФ27.01.2011.

Abstract. The issues of development of micromechanical inertial sensors operating in the mode of self-oscillation are considered.. The ways of the analysis of parameters of such sensors based on the analysis of information and energy characteristics, as well as the feasibility of micromechanical devices using the new element base: optoelectronic position sensors and magnetoelectric compensating converters. The advantages of such devices are described.

Key words: micromechanical sensors, analysis of parameters, new element base

Материал поступил 15.02.14