

Направления подготовки:	Авионика Аэронавигация Системная инженерия
Дисциплина:	Бортовые системы управления
Курс, семестр, уч. год:	3, весенний, 2011/2012
Кафедра:	301 – СУЛА
Руководитель обучения:	ассистент Копысов Олег Эдуардович

## ЛЕКЦИЯ № 11

### ТЕМА: МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ И АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

#### Общие сведения про микромеханические датчики

Применяемые при производстве ММА, ММГ технологии современной твердотельной микроэлектроники, а также используемые материалы позволяют обеспечить малые габариты, вес и энергопотребление, высокую надежность и устойчивость к внешним воздействиям, низкую стоимость микромеханических датчиков. Технологическая совместимость механической части датчика и сервисной электроники позволяют создавать практически в единых технологических процессах интегральные модули — чипы — гироскопы и акселерометры, а также сборки инерциальных элементов объемом 0,5-10 см<sup>3</sup> с потребляемой мощностью 0,5-1 Вт. Выбор кремниевой технологии определяется возможностями микроэлектронной промышленности, а также уникальными свойствами кремния как конструкционного материала.

В упругих подвесах ММГ и ММА в основном используются два типа механических структур и им соответствуют два типа технологических процессов обработки кремния — объемная (bulk-micromachined) и поверхностная (surface-micromachined). При использовании объемной обработки происходит удаление материала путем химического вытравливания в соответствии с кристаллографической структурой материала. В этом случае возможно изготовление структур с толщиной до нескольких сотен микрометров.

В случае поверхностной обработки на планарной поверхности кремниевой пластины с использованием диффузии, фотолитографии и анизотропного травления формируется рельеф осциллятора. После операции анодного сращивания со стек-

Лекция № 11. Микромеханические гироскопы и акселерометры.

лянной подложкой производится удаление «жертвенного» слоя кремния до вскрытия рельефа осциллятора. Толщина полученных пластин осцилляторов ограничена величинами порядка 10-20 мкм.

## Микромеханические гироскопы

Известно большое количество разнообразных схем ММГ. Общим конструктивным признаком ММГ — вибрационных датчиков угловой скорости, является использование в них различных по конфигурации двухстепенных упругих подвесов чувствительного элемента (ЧЭ). Принцип работы ММГ заключается в создании относительно корпуса знакопеременного поступательного либо вращательного движения ЧЭ по одной из степеней свободы и измерении перемещений по другой степени свободы, возникающих под действием кориолисовых сил или гироскопических моментов при наличии переносной угловой скорости корпуса. На рис. 11.1 (а) этот принцип поясняется на примере ММГ с двухстепенным упругим подвесом и поступательными перемещениями ЧЭ. При наличии знакопеременной относительной линейной скорости  $V$  вдоль оси  $OX$  и переносной измеряемой угловой скорости  $\Omega$  вокруг оси  $OZ$  появляются знакопеременное ускорение Кориолиса  $W_k$  и соответствующая ему сила  $F_k$  вдоль оси  $OY$ .

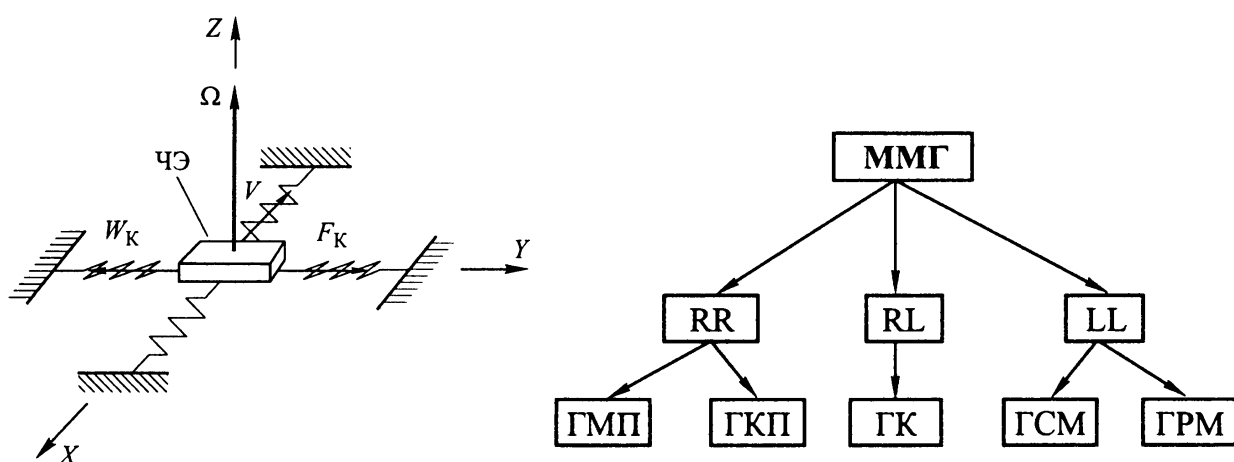


Рисунок 11.1 – Принцип работы микромеханического гироскопа

Амплитуда перемещения  $y$  при равенстве собственных частот по обеим степеням свободы для случая резонанса определится следующим соотношением:

Лекция № 11. Микромеханические гироскопы и акселерометры.

$$y = \frac{F_k}{C} Q\Omega = \frac{2mV}{C} Q\Omega, \quad (11.1)$$

где  $C$  — жесткость упругого подвеса;

$m$  — масса ЧЭ;

$Q$  — добротность подвеса.

Эта амплитуда является мерой угловой скорости  $\Omega$ .

По принципу построения упругого подвеса все известные типы ММГ можно классифицировать в соответствии со схемой на рис. 11.1 (б).

В зависимости от типа движения ЧЭ в подвесе, ММГ можно разделить на три группы: ММГ RR-типа — с вращательным движением ЧЭ по обеим степеням свободы; ММГ RL-типа — с вращательным движением по одной степени свободы и с поступательным — по другой; ММГ LL-типа — с поступательными движениями по обеим степеням свободы. В каждой из выделенных групп количество возможных вариантов схем ММГ может быть весьма велико. На схеме в каждой из групп указаны наиболее известные и в той или иной степени реализованные варианты ММГ: ГМП — гироскоп с маятниковым подвесом; ГКП — гироскоп с карданным подвесом; ГК — гироскоп камертонный; ГСМ — гироскоп с сосредоточенной массой; ГРМ — гироскоп с распределенной массой. Рассмотрим кратко принципы построения и типовые конструктивные схемы ММГ.

*ММГ RL-типа (гироскоп камертонный, ГК).*

Конструкция ММГ камертонного типа представлена на рис. 11.2. В этом гироскопе вынужденное движение ЧЭ, обеспечиваемое вибрационным двигателем, является поступательным; другое движение, являющееся информационным — вращательное. Конструкция выполнена из монокристаллического кремния и представляет собой камертон, реализованный в виде двух инерционных масс **1**, закрепленных с помощью упругих элементов **2** во внешней рамке **3**. Рамка связана с основанием также через упругие элементы **4**, обеспечивающие ей вращательное движение вокруг оси **2**.

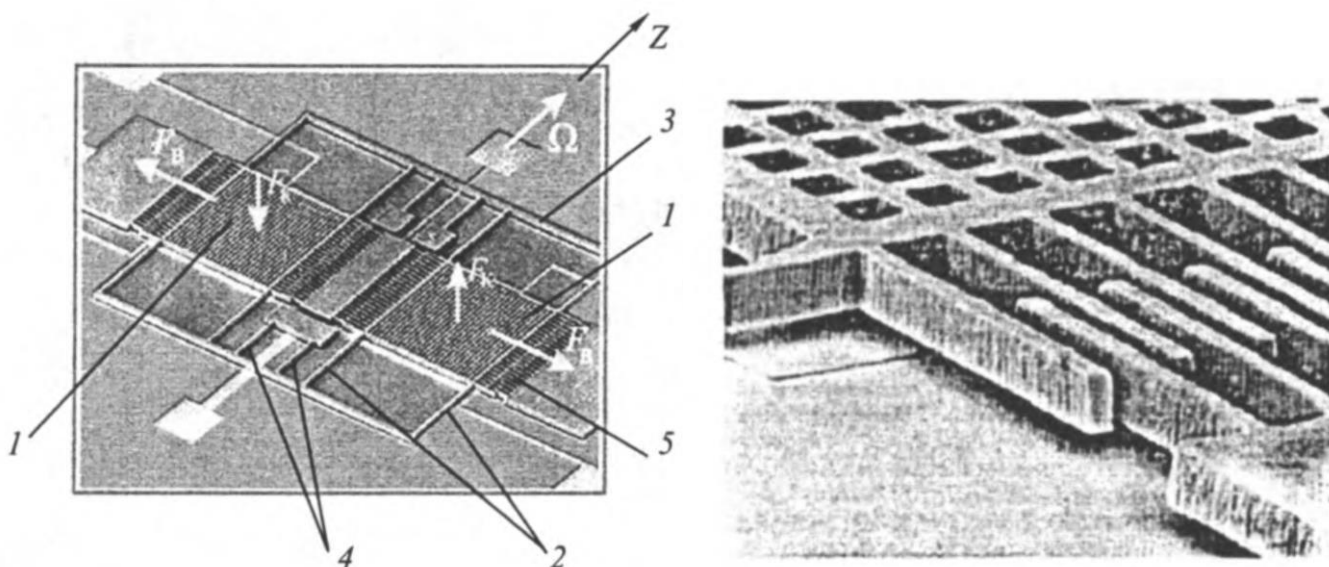


Рисунок 11.2 – Конструкция микромеханического гироскопа RL-типа

С помощью электростатического вибрационного двигателя, выполненного в виде «гребенчатой» структуры (рис. 11.2), силами возбуждаются противофазные поступательные колебания масс. При наличии угловой скорости основания  $\Omega$ , вектор которой совпадает с измерительной осью 2 вращения рамки, возникают силы Кориолиса создающие переменный момент, приводящий к угловым колебаниям рамки вокруг оси 2 с частотой, равной частоте двигателя. Амплитуда колебаний рамки является мерой измеряемой угловой скорости. Измерение колебаний рамки осуществляется с помощью емкостного датчика, электроды которого расположены на подложке под инерционными массами. Номинальная величина емкостей между электродами и инерционной массой  $\sim 1$  пФ. Характерный размер инерционной массы в плане  $\sim 1$  мм. Толщина подвеса с целью увеличения жесткости его конструкции и увеличения чувствительности ММГ доведена до 400 мкм. Одна из основных погрешностей ММГ — квадратурная, порождаемая вибрационным двигателем вследствие неперпендикулярности оси возбуждения и измерительной оси.

*ММГ RR-типа (гироскоп с карданным подвесом, ГКП).*

В конструкциях ММГ ГКП реализован упругий карданный подвес ЧЭ. В первом варианте ММГ используется внешний упругий двухрамочный карданный подвес инерционной массы, расположенной симметрично относительно плоскости механической структуры. Вокруг оси внутренней рамки с помощью электростатиче-

ского вибрационного двигателя, реализованного в виде пары электродов, расположенных на диэлектрической подложке под внутренней рамкой, создается переменный кинетический момент. При появлении измеряемой угловой скорости, перпендикулярной плоскости механической структуры подвеса, возникает переменный гироскопический момент, приводящий к колебаниям внешней рамки. Амплитуда этих колебаний пропорциональна измеряемой угловой скорости. Съём колебаний осуществляется с помощью емкостного датчика, пара электродов которого расположена под внешней рамкой.

Достигнутая величина случайного дрейфа гироскопов ГК и ГКП составляет 5 град/ч.

*ММГ LL-типа (гироскопы с сосредоточенной массой, ГСМ).*

В основу конструктивной схемы ММГ положен выполненный из поликристаллического кремния упругий подвес ЧЭ с двумя поступательными степенями свободы в плоскости подвеса. В конструкции гироскопа используются два независимых упругих подвеса двух ЧЭ на одной подложке, возбуждаемых с помощью гребенчатого электростатического вибрационного двигателя и объединенных дифференциальной системой емкостного съема, образованной каждым из ЧЭ его системой гребенчатых электродов емкостного датчика и системой электродов, расположенных на подложке. Такая конструкция ММГ обеспечивает снижение погрешности гироскопа от линейных ускорений, а также от ударов и линейных вибраций основания. Толщина механической структуры подвеса — 6 мкм. Корпус ММГ не вакуумируется, поэтому, несмотря на невысокую жесткость подвеса из-за его малой толщины и относительно большой площади, устойчивость к воздействию ударов и вибраций в направлении, перпендикулярном плоскости подложки, обеспечивается воздушной «подушкой», возникающей в зазоре между подложкой и поверхностью ЧЭ. Прибор размещается в керамическом корпусе размером 7 x 7 x 3 мм и имеет массу менее 1 г.

Достоинством этого ММГ является его высокая защищенность от линейных перегрузок, вибраций и ударов, обеспечиваемая воздушным демпфированием в подвесе и дифференциальными структурами подвеса и системы съема. Другое важное

Лекция № 11. Микромеханические гироскопы и акселерометры.

достоинство — расположение сервисной электроники в интегральном исполнении на одной подложке с механической структурой в одном чипе, что существенно снижает уровень паразитных и шумовых сигналов в системе съема. В качестве достоинства ММГ следует также отметить отсутствие необходимости в обеспечении вакуума в корпусе гироскопа. Величина случайного дрейфа составляет  $\sim 0,3$  град/с.

*ММГ LL-типа (гироскоп с кольцевым резонатором, ГРМ).*

В этом гироскопе в ЧЭ используется кольцевой резонатор (КР). Достоинством подобных ММГ является их устойчивость к внешним механическим воздействиям, что обеспечивается симметрией конструкции КР и его подвеса. Конструкция обеспечивает минимизацию влияния паразитных степеней свободы, а также температурную стабильность собственной частоты резонатора и его добротности. В известных ММГ с КР, как правило, реализуется схема компенсационного типа.

Случайный дрейф гироскопа составляет величину порядка  $0,2$  град/с.

На рис. 11.3 представлен внешний вид варианта ММГ с КР.

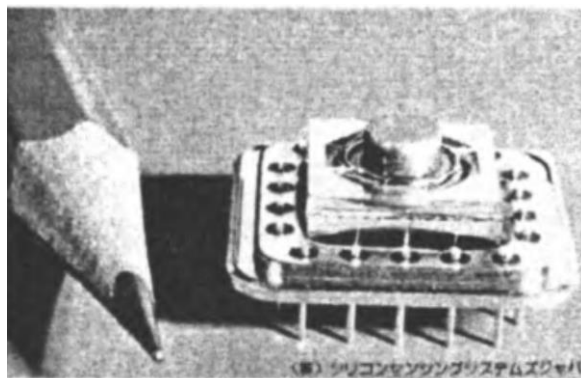


Рисунок 11.3 – Внешний вид ММГ с кольцевым резонатором

В другом варианте конструкции ММГ с КР фирмы BAЕ Systems применяется электростатическая система возбуждения и емкостная система съема сигнала.

Такой вариант конструкции существенно упрощает изготовление и сборку ММГ, обеспечивает возможность балансировки параметров КР с помощью электростатического привода, уменьшает габариты и массу, позволяет избавиться от проблем, связанных с нестабильностью его магнитных компонент, повысить его устойчивость по отношению к внешним механическим и температурным воздействиям и снизить стоимость ММГ.

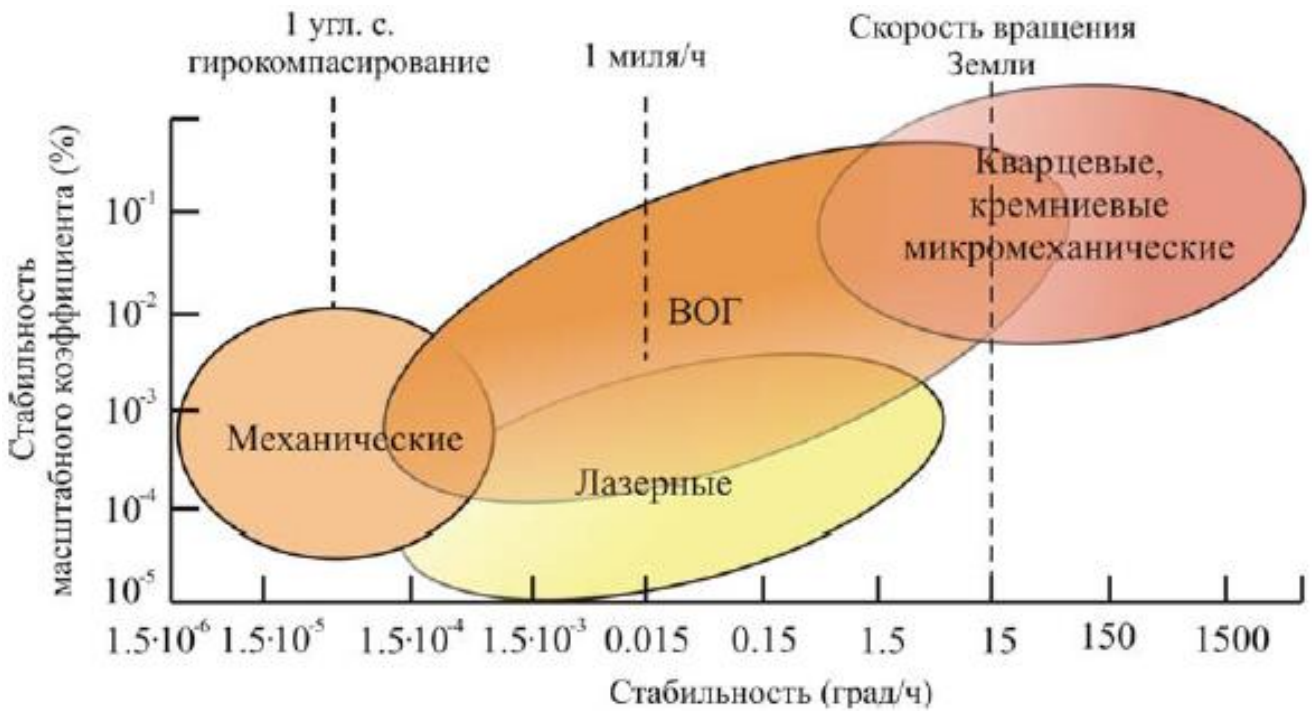


Рисунок 11.4 – Области распределения характеристик, определяющих класс точности гироскопов различного типа

### Микромеханические акселерометры

В микромеханическом исполнении реализуются в основном три схемы акселерометров с упругими повесами ЧЭ как прямого, так и компенсационного преобразования: ММА с поступательным перемещением ЧЭ; ММА с упругим подвесом маятникового типа; вибрационный ММА. В качестве датчиков перемещения ЧЭ используются емкостные, а также тензорезистивные и пьезоэлектрические датчики. Компенсация измеряемых инерционных сил и моментов осуществляется с помощью датчиков силы или момента магнитоэлектрического или электростатического типов. Диапазон максимальных ускорений, измеряемых с помощью ММА, может достигать величины порядка  $10^5 g$ .

На рис. 11.5 (а, б) показаны маятниковые ММА. Конструкция на рис. 11.5 (а) предназначена для использования в специальных боеприпасах, испытывающих очень высокие ударные перегрузки, и позволяет измерять ускорения до  $10^5 g$ . ММА, конструкция которого представлена на рис. 11.5 (б), предназначен для использова-

ния в системах ориентации и навигации разнообразных подвижных объектов; погрешность этого ММА составляет  $(10^{-4} - 10^{-3})g$ .

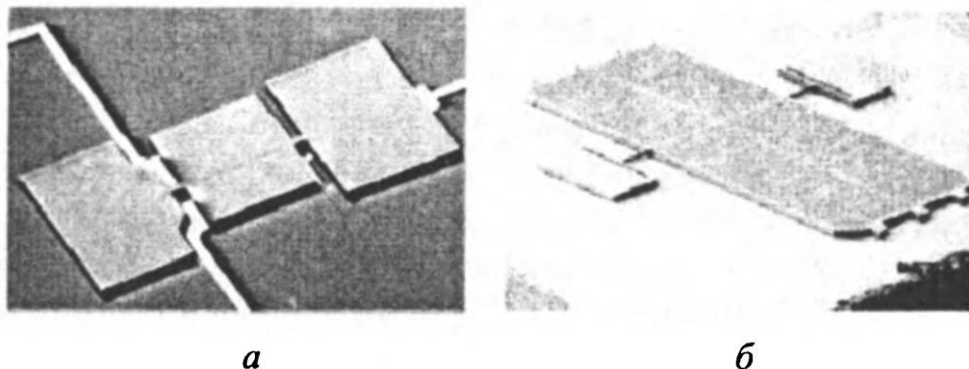


Рисунок 11.4 – ММА маятникового типа

Больших успехов в разработке ММА добилась компания Analog Devices, чьи ММА стали практически первыми массово выпускаемыми инерциальными МЭМС-датчиками. В основе ММА — одно — либо двухкомпонентный упругий подвес, поступательно перемещающийся в плоскости подложки ЧЭ. В качестве системы съема применяется емкостной датчик, выполненный в виде гребенчатой структуры. Подвес изготовлен методом поверхностной микромеханической обработки в поликремнии толщиной 2 мкм. В объеме кристалла кремния и в поверхностных поликремниевых слоях помимо ЧЭ размещены усилители сигналов с выхода первичного преобразователя информации, аналогово-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, демодулятор, источник опорного напряжения, схемы самодиагностики и термостабилизации параметров.

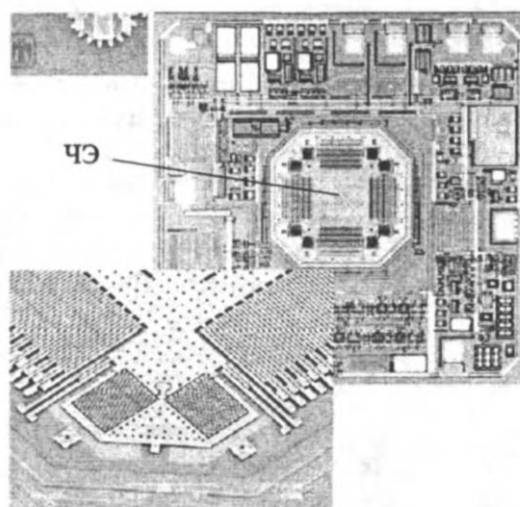


Рисунок 11.6 – ММА, разработанный компанией Analog Devices



На рис. 11.7 показаны области, образованные двумя важнейшими характеристиками акселерометров, определяющих их класс точности: чувствительность и стабильность масштабного коэффициента.

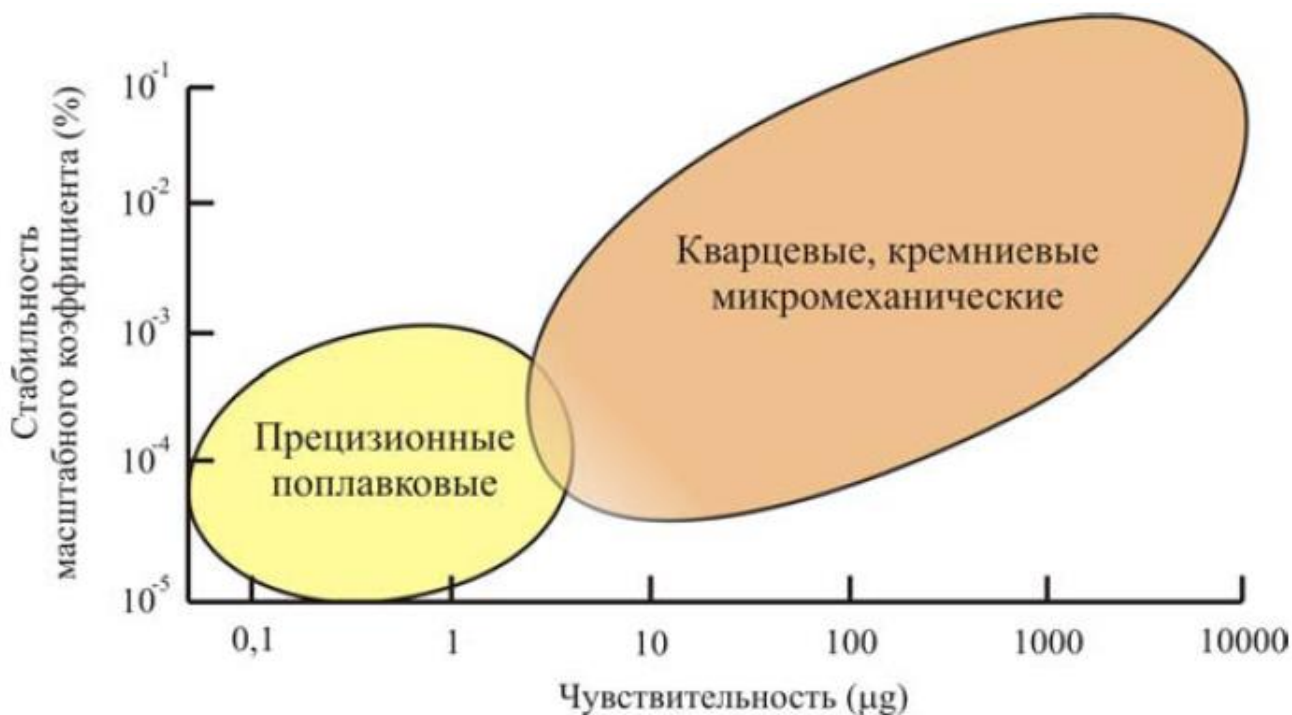


Рисунок 11.7 – Области распределения характеристик, определяющих класс точности акселерометров различного типа

### Уравнения движения и передаточные функции микромеханических гироскопов

Векторы сил, действующих в микромеханическом гироскопе LL-типа, показаны на рис. 11.8.

С корпусом ММГ связана система координат  $oxy$ , начало которой совмещено с геометрическим центром корпуса. Режим движения инерционной массы  $m$  вдоль оси  $x$  обеспечивается приводом, генерирующим силу  $F_x = F_0 \sin(pt)$  ( $F_0$ ,  $p$  – амплитуда и частота силы). Для начальной фазы движения вектор силы совпадает с положительным направлением оси  $ox$ . Под действием силы  $F_x$  масса  $m$  смещается на величину  $x$  и имеет скорость  $\dot{x} = V$  и ускорение  $\ddot{x}$ .

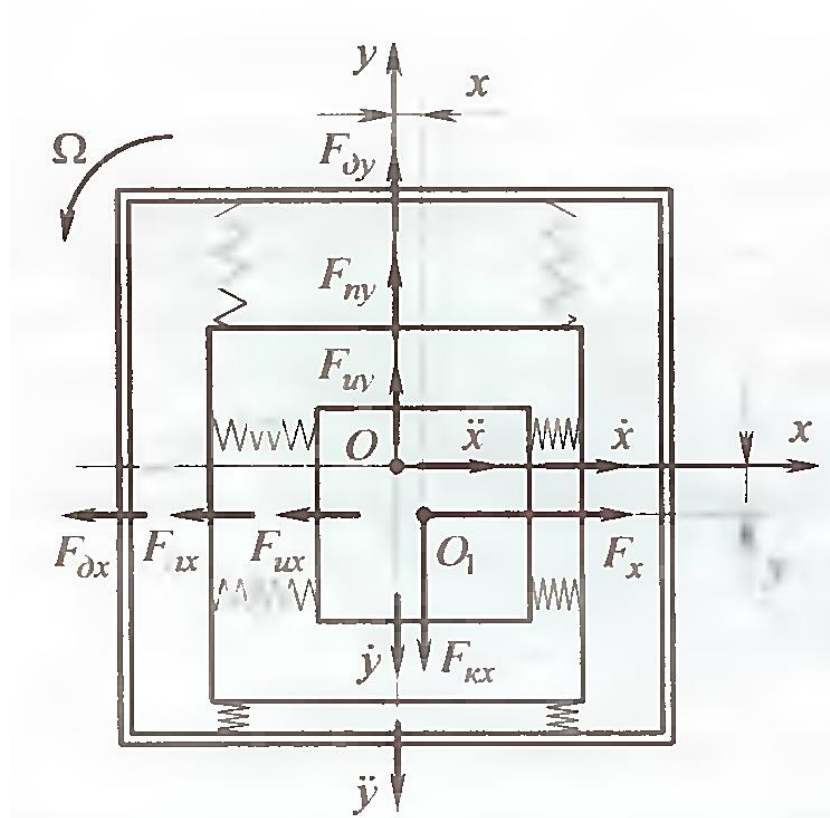


Рисунок 11.8 – Микромеханический гироскоп LL-типа

В силу этого в отрицательном направлении оси  $x$  возникают силы:

- ✓ инерции  $F_{ux} = m\ddot{x}$ ;
- ✓ жесткости пружин  $F_{mx} = G_x x$  ( $G_x$  – жесткость пружины в направлении оси  $x$ );
- ✓ демпфирования  $F_{dx} = k_{dx} \dot{x}$  ( $k_{dx}$  – коэффициент демпфирования в направлении оси  $x$ ).

При изменении фазы силы  $F_x$  направления векторов указанных сил меняются на обратные.

При появлении угловой скорости  $\Omega$  вращения ММГ вокруг оси  $z$ , перпендикулярной плоскости  $xu$ , возникает ускорение Кориолиса  $a_{ky} = 2\Omega V$  в положительном направлении оси  $y$  и соответствующая ему противоположно направленная сила  $F_{ky} = 2m\Omega V$ , приложенная к центру масс ИМ (т.  $O_1$ ). Под действием этой силы ИМ и рамка смещаются на величину  $y$ , приобретают скорость  $\dot{y}$  и ускорение  $\ddot{y}$ . Этим параметрам соответствуют силы:

- ✓ инерции  $F_{uy} = (m + m_1)\ddot{y}$  ( $m_1$  – масса рамки);
- ✓ жесткости пружин  $F_{ny} = G_y y$  ( $G_y$  – жесткость пружины в направлении оси  $y$ );
- ✓ демпфирования  $F_{oy} = k_{oy}\dot{y}$  ( $k_{oy}$  – коэффициент демпфирования в направлении оси  $y$ ).

При изменении фазы силы  $F_x$  направления векторов указанных сил поменяются на противоположное.

Очевидно, что в положительном направлении оси  $x$  будет действовать ускорение Кориолиса  $a_{kx} = 2\Omega V$  и соответствующая ему сила  $F_{kx} = 2m\Omega V$ , направленная в отрицательную сторону оси  $x$ , т.е. против силы  $F_x$ . Параметры привода должны обеспечить выполнение условия  $F_x \gg F_{kx}$ . На этом основании силу  $F_{kx}$  можно из дальнейшего рассмотрения исключить.

В соответствии с методом кинетостатики суммируем векторы сил со своими знаками, приравниваем их нулю и получаем уравнения движения гироскопа:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + k_{\partial x}\dot{x} + G_x x &= F_0 \sin pt; \\ (m + m_1)\ddot{y} + k_{\partial y}\dot{y} + G_y y &= 2mV\Omega. \end{aligned} \quad (11.2)$$

Из первого уравнения системы может быть найдена величина  $\dot{x}$ , амплитуду которой после завершения процесса раскачки инерционной массы  $m$  можно считать постоянной –  $V$ .

Второе уравнение системы (11.2) в этом случае может быть представлено в форме:

$$\ddot{y} + 2\xi_y \omega_{y0} \dot{y} + \omega_{y0}^2 y = \frac{2mV}{m + m_1} \Omega, \quad (11.3)$$

где  $\omega_{y0} = \sqrt{\frac{G_y}{m + m_1}}$  – собственная частота колебаний ИМ с рамкой в направлении

оси  $y$ ;

$\xi_y = \frac{k_{\partial y}}{2\omega_{y0}(m + m_1)}$  – относительный коэффициент демпфирования ИМ с рамкой в направлении оси  $y$ .

В соответствии с (11.3) передаточная функция ММГ по отношению к измеряемой угловой скорости имеет вид:

$$W_y(s) = \frac{y(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_y}{T_y^2 s^2 + 2\xi_y T_y s + 1}, \quad (11.4)$$

где  $K_y = \frac{2mV}{G_y}$ ;

$$T_y = \frac{1}{\omega_{y0}}.$$

В соответствии с (11.4) ММГ является колебательным звеном и в установившемся режиме колебаний координата  $y$  перемещения рамки имеет амплитуду, пропорциональную скорости вращения основания  $y = K_y \Omega$ . Следовательно, ММГ LL-типа является датчиком угловой скорости.

Векторы сил, действующих в ММГ RR-типа показаны на рис. 11.9.

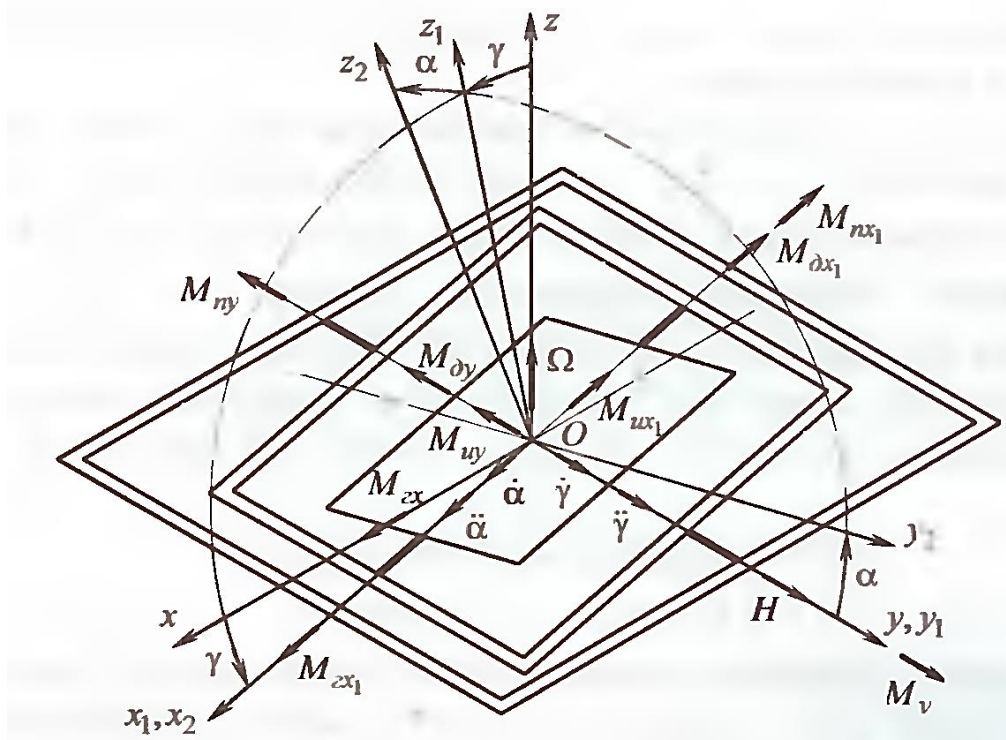


Рисунок 11.9 – К выводу уравнения движения ММГ RR-типа

С корпусом связана система координат  $oxyz$ , начало которой совмещено с его геометрическим центром. С наружной рамкой связана система координат  $ox_1y_1z_1$ , положение которой относительно системы координат  $oxyz$  определяется углом  $\gamma$ . Колебания рамок с угловыми скоростью  $\dot{\gamma}$  и ускорением  $\ddot{\gamma}$  соответствует режиму движения и обеспечиваются приводом, развивающим момент  $M_y = M_0 \sin pt$  ( $M_0$ ,  $p$  – амплитуда и частота момента) относительно оси  $oy$ . Начальной фазе движения рамок по координате  $\gamma$  соответствует разворот против часовой стрелки. Начальной фазе движения соответствует кинетический момент  $H = J_{\gamma\epsilon} \dot{\gamma}$  ( $J_{\gamma\epsilon}$  – момент инерции внутренней рамки относительно оси  $oy$ ), направленный в положительную сторону оси  $oy$ . В отрицательную сторону оси  $oy$  направлены моменты:

- ✓ сил инерции рамок  $M_{uy} = (J_{\gamma\epsilon} + J_{\gamma\eta}) \ddot{\gamma}$  ( $J_{\gamma\epsilon}$  – момент инерции наружной рамки относительно оси  $oy$ );
- ✓ сил демпфирования  $M_{\partial y} = b_\gamma \dot{\gamma}$  ( $b_\gamma$  – коэффициент демпфирования вокруг оси  $oy$ );
- ✓ упругих сил элементов подвеса  $M_{ny} = G_\gamma \gamma$  ( $G_\gamma$  – жесткость упругих элементов подвеса наружной рамки на кручение относительно оси  $y$ ).

При появлении угловой скорости вращения корпуса ММГ вокруг оси  $oz$  возникает гироскопический момент  $M_{zx} = H\Omega = J_{\gamma\epsilon} \dot{\gamma} \Omega$ . Этот момент имеет проекцию на ось  $ox_1$ :  $M_{zx1} = M_{zx} \cos \gamma \approx H\Omega$ . Момент  $M_{zx1}$  вызывает разворот внутренней рамки относительно наружной на угол  $\alpha$ . На рис. 11.9 положение системы координат  $ox_2y_2z_2$ , связанной с внутренней рамкой, соответствует начальной фазе движения внутренней рамки с угловыми скоростью  $\dot{\alpha}$  и ускорением  $\ddot{\alpha}$ . В отрицательную сторону оси  $ox_1$  направлены моменты:

- ✓ сил инерции  $M_{ux_1} = J_\alpha \ddot{\alpha}$  ( $J_\alpha$  – момент инерции внутренней рамки относительно оси  $ox_1$ );
- ✓ сил демпфирования  $M_{\partial x_1} = b_\alpha \dot{\alpha}$  ( $b_\alpha$  – коэффициент демпфирования внутренней рамки относительно оси  $ox_1$ );

Лекция № 11. Микромеханические гироскопы и акселерометры.

- ✓ упругих сил элементов подвеса  $M_{nx_1} = G_\alpha \alpha$  ( $G_\alpha$  – жесткость упругих элементов подвеса внутренней рамки на кручение относительно оси  $ox_1$ ).

В следующий полупериод работы привода вектор момента  $M_y$  будет направлен в отрицательную сторону оси  $oy$  и, соответственно, все векторные величины по осям  $oy$  и  $ox_1$  изменят свои знаки на противоположные. Таким образом, в режимах движения и чувствительности (первичные колебания называю режимом движения, или движением по координате возбуждения, а вторичные – режимом чувствительности, или движением по координате выходного сигнала) рамки будут совершать колебательные движения.

В соответствие с методом кинетостатики суммируем векторы моментов сил со своими знаками, приравниваем их нулю и получаем уравнения движения гироскопа:

$$\begin{aligned} (J_{\gamma_в} + J_{\gamma_н})\ddot{\gamma} + b_\gamma \dot{\gamma} + G_\gamma \gamma &= M_0 \sin pt; \\ J_\alpha \ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + G_\alpha \alpha &= H\Omega. \end{aligned} \quad (11.5)$$

Из первого уравнения системы (11.5) может быть найдена величина  $\dot{\gamma}$ , амплитуду которой после окончания переходного процесса раскачки рамок можно считать постоянной. Второе уравнение системы (11.5), имея в виду постоянство величины  $\dot{\gamma}$ , может быть записано в виде:

$$\ddot{\alpha} + 2\xi_\alpha \omega_{\alpha 0} \dot{\alpha} + \omega_{\alpha 0}^2 \alpha = \frac{H}{J_\alpha} \Omega, \quad (11.6)$$

где  $\omega_{\alpha 0} = \sqrt{\frac{G_\alpha}{J_\alpha}}$  – собственная частота колебаний внутренней рамки относи-

тельно оси  $ox_1$ ;

$\xi_\alpha = \frac{b_\alpha}{2\omega_{\alpha 0} J_\alpha}$  – относительный коэффициент демпфирования внутренней рам-

ки относительно оси  $ox_1$ .

В соответствии с (11.6) передаточная функция ММГ по отношению к измеряемой угловой скорости имеет вид

$$W_{\alpha}(s) = \frac{\alpha(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_{\alpha}}{T_{\alpha}^2 s^2 + 2\xi_{\alpha} T_{\alpha} s + 1}, \quad (11.7)$$

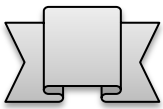
где  $K_{\alpha} = \frac{H}{G_{\alpha}}$ ;

$$T_{\alpha} = \frac{1}{\omega_{\alpha 0}}.$$

В соответствии с (11.7) ММГ описывается колебательным звеном и в установившемся режиме амплитуда колебаний внутренней рамки пропорциональна скорости вращения основания, на котором он установлен:

$$\alpha = K_{\alpha} \Omega = H \Omega / G_{\alpha}. \quad (11.8)$$

Следовательно, ММГ RR-типа, называемый обычно рамочным, является датчиком угловой скорости.



*Привести технические характеристики рассмотренных типов микромеханических датчиков на примере трех – четырех распространенных моделей.*

**Термины для занесения в тезаурус:** микромеханический гироскоп, микромеханический акселерометр, случайный дрейф гироскопа, инерционная масса, внутренняя рамка, наружная рамка.