

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.781.2

В.Д. Вавилов, И.В. Вавилов

### РАЗРАБОТКА МИКРОСИСТЕМНОГО ДУС С РЕЗОНИРУЮЩИМ КОЛЬЦОМ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Приводятся материалы разработки микросистемного ДУС в качестве чувствительного элемента в котором используется резонирующее кольцо из кристаллического кремния. Особенностью разработки является то, что в качестве привода в ДУС используется электростатический преобразователь.

*Ключевые слова:* резонирующее кольцо, микросистемный ДУС, кристаллический кремний, переходный процесс, добротность упругого элемента.

Упругие круговые кольца, выполненные из кремния и обработанные методом электронной технологии, применяются для построения ЧЭ волновых микрогироскопов. В плоскости кольца могут быть возбуждены различные виды колебаний: радиальные, изгибные и изгибно-крутильные. При построении узлов, чувствительных к кориолисовым ускорениям, чаще всего возбуждаются изгибные колебания на основной моде. При вращении вибрирующего кольца в результате действия кориолисовых сил происходит расщепление частот основной моды колебаний, приводящее к прецессии стоячей волны как относительно резонатора, так и относительно инерциального пространства. В специальной литературе это свойство вибрирующего резонатора называют эффектом Г.Х. Брайена.

Подвесы кольца выполняют так, чтобы они не оказывали влияния на основные информационные характеристики: собственную частоту, добротность, температурную инвариантность и др. Размещают резонирующие кольца в вакуумированных герметичных корпусах. Применяют два типа приводов для возбуждения колебаний: магнитоэлектрический и электростатический, а для съема вторичного сигнала – емкостный и индукционный с отрицательной обратной связью. Характеристики микрогироскопов с обоими типами приводов примерно одинаковы. Описание ДУС с магнитоэлектрическим приводом приведено в [1]. Здесь рассмотрим математическую модель резонирующего кольца с электростатическим приводом.

Система уравнений Лагранжа применительно к кинематической схеме на рис. 1 без учета влияния упругих подвесов имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{u}} \right) - \frac{\partial T}{\partial u} = Q_u, \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{v}} \right) - \frac{\partial T}{\partial v} = Q_v, \quad (1)$$

где  $T$  - кинетическая энергия колеблющегося кольца;  $u$  и  $v$  - радиальное и тангенциальное смещения произвольной точки на кольце;  $Q_u$  и  $Q_v$  - обобщенные внешние силы.

В общем виде кинетическая энергия колеблющегося кольца определяется следующим выражением:

$$T = \frac{\rho F}{2r^2} \int_0^{2\pi} (\dot{u}^2 + \dot{v}^2) r d\theta, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность материала кольца;  $F$  - площадь поперечного сечения кольца.

Для определения радиального перемещения при изгибных колебаниях какой-либо точки представим его в виде тригонометрического ряда

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos i\theta + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \sin i\theta, \quad (3)$$

где постоянные коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  есть функции времени, которые имеют смысл виброперемещений, а их первые производные по времени имеют смысл и размерность виброскоростей.

Для определения тангенциальных составляющих перемещений воспользуемся соотношением Буссенеска [3] для изменений кривизны деформированного кольца:

$$\frac{1}{r + \Delta r} - \frac{1}{r} = -\frac{\partial^2 u}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{u}{r^2}, \quad (4)$$

где  $r$  - текущее значение радиуса кольца.

Относительное удлинение кольца в произвольной точке можно определить исходя из геометрических соображений:

$$e = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}.$$

При изгибных колебаниях без растяжения  $e = 0$ , тогда из совместного решения (3) и (4) следует

$$v = -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i \sin i\theta}{i} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{b_i \cos i\theta}{i}. \quad (5)$$

Подставляя (3) и (4) в (5), найдем выражение для кинетической энергии колеблющегося кольца, в котором вместо радиального и тангенциального перемещений в явном виде участвуют коэффициенты тригонометрических рядов (4) и (5):

$$T = \frac{\pi r \rho F}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \left( 1 + \frac{1}{i^2} \right) (\dot{a}_i^2 + \dot{b}_i^2). \quad (6)$$

С целью определения обобщенных сил для правых частей уравнений Лагранжа (1) найдем потенциальную энергию изгиба кольца через момент сил упругости и кориолисовых сил в виде

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left( \frac{M^2}{E_{[100]} I} - F_d + F_k + F_u \right) r d\theta, \quad (7)$$

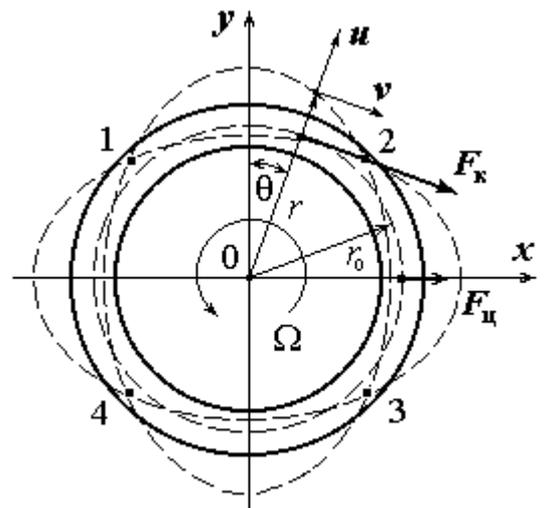


Рис. 1. Основная мода колебаний кремниевое кольцо

где  $M = -\frac{E_{[100]}I}{r^2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + u \right)$  - изгибающий момент в произвольном поперечном сечении кольца;  $E_{[100]}$  - модуль упругости кремния в кристаллографическом направлении [100];  $I = c_k b_k^3 / 12$  - момент инерции поперечного сечения кольца;  $c_k$  - толщина кольца;  $b_k$  - ширина кольца (разность между максимальным и минимальным радиусами);  $F_d = K_\Gamma \dot{a}_i$  - сила демпфирования;  $K_\Gamma = G\eta/\omega_b$  - коэффициент гистерезисного демпфирования ( $\eta = 1/Q$  - безразмерный коэффициент потерь;  $Q$  - добротность материала кольца;  $\omega_b$  - частота принудительного возбуждения колебаний кольца);  $F_c = 2\rho F \dot{u} \Omega v$  - мгновенная интенсивность кориолисовой силы;  $\Omega$  - угловая скорость вращения кольца;  $F_{\text{ц}} = \rho F r^2 \Omega^2$  - центробежная сила.

Численный анализ сил, входящих в соотношение (7), показывает, что произведение добротности на частоту возбуждения составляет  $Q\omega_b \approx 10^{11} \dots 10^{12}$  Гц. Следовательно, демпфирующая сила на несколько порядков меньше по сравнению с другими, и это дает основание ею пренебречь. Ввиду малости угловой скорости вращения кольца центробежной силой также можно пренебречь.

Используя для (7) тригонометрические ряды (3), (5) и интегральные соотношения

$$\int_0^{2\pi} \cos m\theta \cos n\theta d\theta = 0, \quad \int_0^{2\pi} \sin m\theta \sin n\theta d\theta = 0 \quad \text{при } m \neq n,$$

$$\int_0^{2\pi} \cos m\theta \sin n\theta d\theta = 0, \quad \int_0^{2\pi} \cos^2 m\theta = \int_0^{2\pi} \sin^2 m\theta = \pi,$$

получим

$$V = \pi \left[ \frac{E_{[100]}I}{2r^3} \sum_{i=1}^{\infty} (1-i^2)^2 (a_i^2 + b_i^2) + \frac{\rho F \Omega r}{i} \sum_{i=1}^{\infty} (\dot{a}_i b_i - a_i \dot{b}_i) \right]. \quad (8)$$

В общем виде обобщенные силы через потенциальную энергию выражаются следующим образом:

$$Q_u = -\frac{dV}{da_i}, \quad Q_v = -\frac{dV}{db_i}. \quad (9)$$

Задать виброперемещение можно по амплитуде проводящего контура при электрическом возбуждении колебаний. Если возбуждение колебаний осуществляется на резонансной частоте  $\omega_i = \omega_b$ , то величину виброперемещения необходимо домножить на коэффициент добротности материала кольца, т.е.  $\dot{b}_i = \omega_b \delta_i Q$ .

Решая совместно (1) - (9) и учитывая гистерезисные потери, получим дифференциальное уравнение относительно виброперемещений:

$$2\pi\rho Fr_0(1+i^2)\ddot{a}_i + K_\Sigma \dot{a}_i + Ga_i = \frac{\rho Fr_0 \dot{b}_i}{i} \Omega, \quad (10)$$

где  $r_0$  - радиус кольца по средней линии;  $G = \frac{E_{[100]}I(1-i^2)^2 i^2}{(2\pi r_0)^3}$  - жесткость кольца на радиальный изгиб.

Передаточную функцию для резонирующего кольца можно записать на основании дифференциального уравнения (10) в следующем виде:

$$W_{\kappa}(s) = \frac{a_i(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_{\text{чз}}}{\rho F r_0 (1+i^2) s^2 + K_{\Sigma} s + G}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{чз}} = \frac{2\pi \rho F r_0 \omega_b \delta_i Q}{i}$  - коэффициент передачи чувствительного элемента;

$T = \frac{(2\pi r_0)^2}{i} \sqrt{\frac{\rho F (1+i^2)}{E_{[100]} I (1-i^2)^2}}$  - постоянная времени резонирующего кольца.

Для обобщенной координаты  $v$  (соответственно для коэффициента  $b_i$ ) может быть получено дифференциальное уравнение, аналогичное (1), и соответственно передаточная функция, аналогичная (11). Значение производной от коэффициента  $b_i$  зависит от частоты и амплитуды принудительного возбуждения колебаний в кольце, т.е.  $\dot{b}_i = \omega_b \delta_i$ , где  $\delta_i$  - амплитуда виброперемещения для  $i$ -й моды. Решение уравнения (10) дает следующее выражение для собственной частоты колебаний по  $i$ -й моде:

$$\omega_i = \frac{i}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{E_{[100]} I (1-i^2)^2}{\rho F r_0^4 (1+i^2)}}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что на собственную частоту кольца влияют упругие свойства материала, геометрические характеристики и мода колебаний. Скорость вращения кольца на собственную частоту влияния не оказывает. Рассмотрим частные случаи колебаний упругого кольца: 1) при  $i = 1$  имеет место первая мода, возбуждение колебаний в кольце отсутствует ( $\omega_1 = 0$ ), а движение его представляет собой движение абсолютно твердого тела с составляющими перемещений  $u = a_1 \cos \theta$ ,  $v = b_1 \sin \theta$ ; 2) при  $i = 2$  имеет место вторая мода колебаний кольца.

Эта мода является основной, при ней  $a_1 = b_1 = 0$ . Условно вторая мода обозначается как  $\cos 2\theta$  и называется эллиптической. Название это появилось по той причине, что в деформированном состоянии средняя линия кольца представляет собой некоторый эллипс.

Расположение подвесов кольца, а также электродов возбуждения колебаний и съема

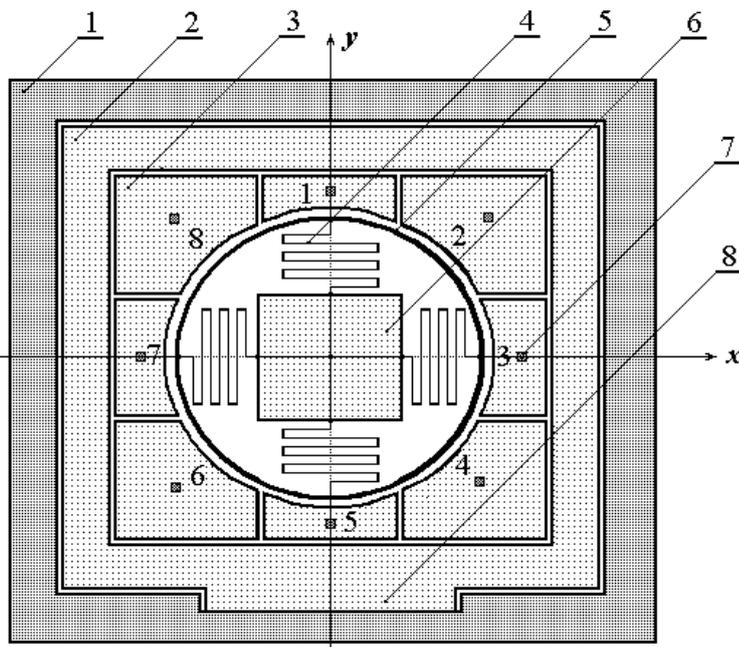


Рис. 2. Чувствительный элемент кольцевого резонатора с электростатической обратной связью

вторичных сигналов выбирают в узловых точках. Например, на основной моде колебаний участки кольца, находящиеся под углами  $\theta = 45, 135, 225$  и  $315$ , являются неподвижными, так как при них  $\cos 2\theta = 0$ . Это узловые точки 2, 4, 6 и 8 на рис. 2. В точках пересечения кольца с координатными осями  $x$  и  $y$ , называемых пучностями, сечения не имеют угловых перемещений, поэтому в данных точках также могут быть размещены упругие подвесы.

В связи с анизотропией кремниевого материала и конструктивными особенностями ЧЭ собственные частоты в кольце адекватны направлению. Условно ось с минимальным значением собственной частоты  $\omega_{\min}$  называется осью “тяжелого” возбуждения, а

ось с максимальным значением  $\omega_{\max}$  - осью “легкого” возбуждения. Собственные частоты по осям “тяжелого” и “легкого” возбуждения не совпадают, а их разница называется частотой расщепления:

$$\Delta\omega = \omega_{\max} - \omega_{\min}. \quad (13)$$

Учет наложения на основную форму изгибных колебаний тонкого кругового кольца колебаний крутильной формы, возникающих от влияния внешних сил, например, в результате вращения резонирующего кольца в неинформационных направлениях, приводит к незначительному изменению собственной частоты ( $\approx 1\%$  при угловой скорости вращения  $\Omega = 300$  °/с). Поскольку колеблющееся кольцо размещено в вакуумированном пространстве, то его собственная частота является резонансной. По классификации микрогироскопы с резонирующим кольцом относятся к третьей категории. Кольцевая конструкция обладает значительными преимуществами по сравнению с простыми и уравновешенными осцилляторами.

При полом резонаторе становится возможным преодолеть проблемы, характерные для первых двух категорий. Например, проблемы, связанные с систематической погрешностью установки гироскопа на объект, чувствительностью к перекрестным воздействиям, ударам и вибрации.

Конструкция резонатора полностью использует преимущества путем вытравливания механического элемента из кристаллического материала. Это гарантирует, что свойства резонатора будут стабильны в течение службы и в окружающей среде. В дополнение к этому описанная планарная кольцевая структура выигрывает от того, что вся виброэнергия у нее находится в одной плоскости. По существу, при воздействии угловой скорости не происходит передачи вибрации из одной кристаллической плоскости в другую, и поэтому такие параметры, как частота, модовое разделение частот и добротность, очень стабильны в диапазоне температур.

Чувствительный элемент схематично показан на рис. 2. Выполнен он элемент на кремниевой пластине 1 с размерами 10x10 мм. Внутри пластины 1 размещена монтажная консольная пластина 2 с помощью лестничного упора 9. Резонатор содержит 6 - миллиметровое кремниевое кольцо 5, поддерживаемое четырьмя упругими подвесами 4 меандрового типа, которые с другой стороны прикреплены к центральной опоре 6. Технологические особенности изготовления кольцевого резонатора в основном заключаются в изотропном травлении кристаллического кремния направленным потоком плазмы. Упругие подвесы 4 одновременно являются токопроводящими проводниками, соединяющими кольцевой резонатор с «землей».

Имеются восемь идентичных проводящих электродов, каждый из которых следует с зазором вокруг 1/8 сегмента кольца. Величина зазора составляет порядка четырех микрометров. Корпусная пластина 1, восемь проводящих электродов 3 и центральный упор 6 жестко соединены между собой стеклянной пластиной с помощью молекулярной сварки. Между торцом кольцевого резонатора и стеклянной пластиной имеется технологический зазор, образованный стравливанием кольца по торцу в процессе изготовления.

Представляющая интерес основная мода вибрации - это  $\cos 2\theta$ , частота которой 14,5 кГц. В действительности это пара мод с угловым разделением  $45^\circ$ . Конструкция гироскопа резонансного типа, поэтому частотное разделение между этими взаимно дополняющими модами должно быть минимизировано, обычно менее чем до  $f_n/2Q$  Гц. Здесь опять же помогает кристаллическая симметрия кремния, причем материал не вносит воздействия в частотное разделение. Самый большой вклад в это вносят производственные отклонения, но они минимизируются за счет использования технологии микрообработки. Требования дополнительной подстройки удовлетворяются за счет использования лазера для удаления массы из системы.

Вибромоды низкого порядка, представляющая собой вертикальное движение всего

кольца по отношению к опоре, имеет частоту, превышающую 5 кГц. В результате этого датчик нечувствителен к обычным вибрационным воздействиям. При воздействии ударного ускорения порядка 10000 g минимальное напряжение более, чем на порядок ниже, предела разрушения материала. Таким образом, ЧЭ исключительно устойчив к ударам и вибрации и не нуждается в каких-либо защитных креплениях или демпфировании.

Силовая обратная связь микрогироскопа с резонирующим кольцом может быть магнитоэлектрической или электростатической. Рассмотрим общие вопросы конструкции микрогироскопа с резонирующим кольцом, не зависящие от типа преобразователя силовой обработки, а особенности расчетов с тем или иным силовым преобразователем выделим соответственно.

Кремниевый ЧЭ в виде резонирующего кольца является сердцем микрогироскопа. Очевидно, что для получения конструктивно законченного датчика он должен комплексоваться с управляющей электроникой. Микрогироскоп может работать как в режиме разомкнутого контура, так и в режиме замкнутого. При работе в режиме замкнутого контура получают значительные преимущества по рабочим характеристикам.

Режим возбуждения колебаний контролируется интегральной схемой (рис. 3), которая содержит для удержания вибрации в резонансе контур генератора управляемого напряжением ГУН и контур автоматической регулировки усиления АРУ, который поддерживает постоянную амплитуду колебаний. При воздействии вращения энергия преобразуется из первичной моды во вторичную. Становится возможным измерить величину вибрации на вторичном преобразователе как меру скорости вращения. Вторичный контур реализован по компенсационной схеме и используется для поддержания вторичной вибрации на нуле, а величина приводной энергии, необходимая для этого, является мерой воздействия угловой скорости. Путем поддержания постоянной амплитуды колебаний резонатора улучшаются линейность и систематическая погрешность системы.

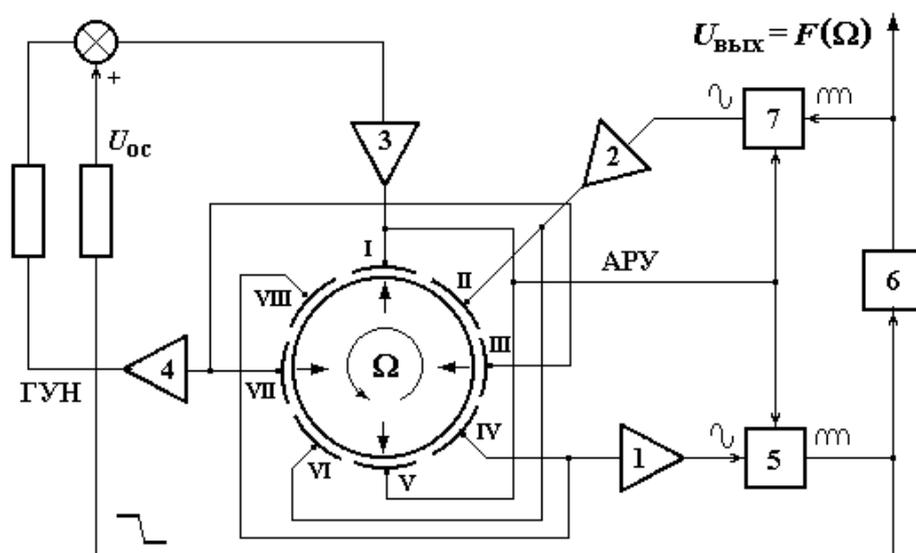


Рис. 3. Функциональная схема микрогироскопа

Сочетание контура АРУ и вторичного контура также служит для исключения из масштабного коэффициента зависимости от добротности резонатора. Система с полностью разомкнутым контуром обладает зависимостью от добротности, которая, в свою очередь, определяется потерями в материале и особенностями конструкции резонатора. Вторичный контур имеет две части: прямую цепь, включающую синхронный детектор 5, корректирующее уст-

ройство 6 и модулятор 7 в цепи обратной связи. Корректирующее устройство в простом случае представляет интегрирующий усилитель, однако практически реализуется по схеме ПИД-регулятора. Использование интегрирующего усилителя значительно снижает ошибки, вызванные частотной разницей между первичным и вторичным контурами.

В свою очередь с использованием дифференцирующего усилителя эффективно решается вопрос демпфирования и устойчивости колебательной системы в замкнутом контуре. Реализация эллиптической моды колебаний в кольце осуществляется специальным генератором, возбуждаемым на частоте механического резонанса. При этом в магнитоэлектрическом преобразователе силы всегда задействованы четыре проводящих сектора. За один период колебаний деформации принудительно создаются следующим образом. В первый полупериод два сектора I и V создают растяжения кольца, а III и VII в это время сжимают кольцо. Во втором полупериоде картина деформаций меняется на противоположную.

Амплитуда виброперемещения, развиваемая приводом при условии использования четырех проводящих секторов, может быть определена из задачи деформации кругового кольца, изгибаемого сосредоточенными силами, действующими по осям  $x$  и  $y$ :

$$\delta_i = \frac{F_3 r^3}{E_{[100]} I} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right). \quad (14)$$

Соответственно величина электростатической силы, развиваемая между проводящим кольцом и проводящими электродами, определяется в следующем виде:

$$F_{эс} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a_3 c_3 U_{оп} U_{пр}}{2h^2}, \quad (15)$$

где  $a_3, c_3$  - длина проводящего сектора и высота кольца;  $h$  - зазор между проводящим сектором и кольцом.

Измерение перемещений деформированных участков кольца осуществляется индукционным методом. Для этой цели используются секторы VI и VIII, а секторы II и IV применяются для силовой обратной связи, стремящейся свести деформационные смещения к нулю. Выполняемые функции измерительных секторов и секторов силовой отработки меняются ролями с каждым полупериодом. Величина напряжения для электростатического преобразователя соответственно определяется в виде

$$U_{пз} = \frac{U_{оп} \delta_i}{h}. \quad (16)$$

Далее напряжение с преобразователя перемещений поступает на вход синхронного детектора, затем усиливается интегрирующим усилителем и подается на выход устройства и через модулятор в цепь отрицательной обратной связи. Синхронный детектор и модулятор тактируются собственной частотой возбуждения кольца.

На структурной схеме микрогирискапа (рис. 4) приняты следующие обозначения:  $K_{чэ} = 2\rho F \omega_B \delta_i Q_i r$  - коэффициент передачи ЧЭ;  $W_{пу}$  - передаточная функция подвижного узла (2);  $K_{пм} = \pi \omega_i Br/4$  - коэффициент передачи преобразователя перемещений для магнитоэлектрического преобразователя;  $K_{пс} = U_{оп}/h$  - коэффициент передачи преобразователя перемещений для электростатического преобразователя;  $K_{осм} = \pi Br/(4R_n)$  - коэффициент передачи звена обратной связи с магнитоэлектрическим преобразователем;  $K_{осз} = 2\varepsilon \varepsilon_0 a_3 c_3 U_{оп}/h^2$  - коэффициент передачи звена обратной связи с электростатическим преобразователем;  $W_{кор}$  - искомая передаточная функция корректирующего устройства.

Структура микрогирокопа в зависимости от применений может быть выполнена в двух возможных вариантах: 1) без применения корректирующего устройства, предназначенного для решения вопросов демпфирования; 2) с применением электронных устройств, включаемых в цепь отрицательной обратной связи и преобразующих общую передаточную функцию к минимальной форме. Использование первого варианта возможно для объектов, заведомо не зашумленных различными вибрациями, например, работой двигательных установок, пусковых устройств или аэродинамическими нагрузками. При этом используется низкочастотный участок АЧХ без резонансов, а проявление резонансов смещено на высокочастотный участок, явно не встречающийся при эксплуатации микрогирокопа.

Построение микрогирокопа по второму варианту требует дополнительных аппаратных затрат на реализацию корректирующего звена, но при этом снимается один из недостатков, характерный для всех типов виброгирокопов, в виде ошибки от вибропомех.

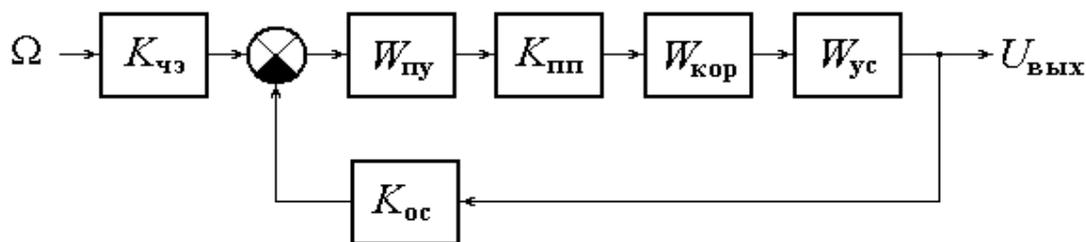


Рис. 4. Структурная схема микрогирокопа с резонирующим кольцом

Из формулы (11) видно, что передаточная функция механического узла микрогирокопа описывается минимальной формой в виде колебательного звена второго порядка. Выбор схемы электронного блока должен осуществляться на основе следующих требований:

1) информационный сигнал снимается с секторов VI и VIII (рис. 3), подается на вход синхронного детектора (ключи Кл5 и Кл6) и далее фильтруется пассивным фильтром ( $R_1-C_3$ );

2) с фильтра нижних частот переменная составляющая, очищенная от высокочастотных шумов, поступает на корректирующее устройство, состоящее из дифференцирующего усилителя на ОУ1, интегрирующего усилителя на ОУ2 и масштабного усилителя на ОУ3 сигналы, с которых суммируются на ОУ4;

3) с выхода суммирующего усилителя сигнал с противоположным знаком подается по цепи обратной связи на силовые электроды II и IV;

4) напряжение обратной связи создает электростатическую силу, стремящуюся свести к нулю вторичные колебания резонирующего кольца, вызванные кориолисовым ускорением.

Рассмотрим подробнее передаточную функцию в замкнутом контуре по напряжению при входном воздействии в виде угловой скорости с корректирующим звеном (рис. 4). При этом учтем передаточную функцию механической части и передаточные коэффициенты всех звеньев, охваченных обратной связью. Учтем также, что во вторичном контуре для создания силовой обратной связи используются два проводящих сектора, подключенных к выходу усилителя мощности.

Учитывая отмеченные требования, описание корректирующего звена совместно с фильтром нижних частот должно иметь следующую структуру:

$$W_{\text{кор}}(s) = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 s + \alpha_3 s^2}{(1 + \tau s) \alpha_4 s}, \quad (17)$$

где  $\tau = R_1 C_3$  - постоянная времени фильтра нижних частот, необходимая для требуемой полосы пропускания микрогироскопа;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  - коэффициенты, определяемые при оптимизации характеристик микрогироскопа.

Реализация электронного корректирующего звена с передаточной функцией (19) возможна с помощью схем на ОУ с  $R$ - $C$  цепями в прямой ветви контура регулирования микрогироскопа (рис. 5). Статический коэффициент передачи схемы выбирается равным единице посредством масштабирующих резисторов  $K_{yc} = R_7/R_6 = 1$ . Эти резисторы должны быть выполнены в одном технологическом цикле и расположены на подложке рядом, для того чтобы обеспечить одинаковые температурные условия. Постоянные времени дифференциатора и интегратора корректирующего устройства определяются  $RC$ -цепями. Они должны быть равны между собой и согласованы с постоянной времени  $T$  резонирующего кольца.

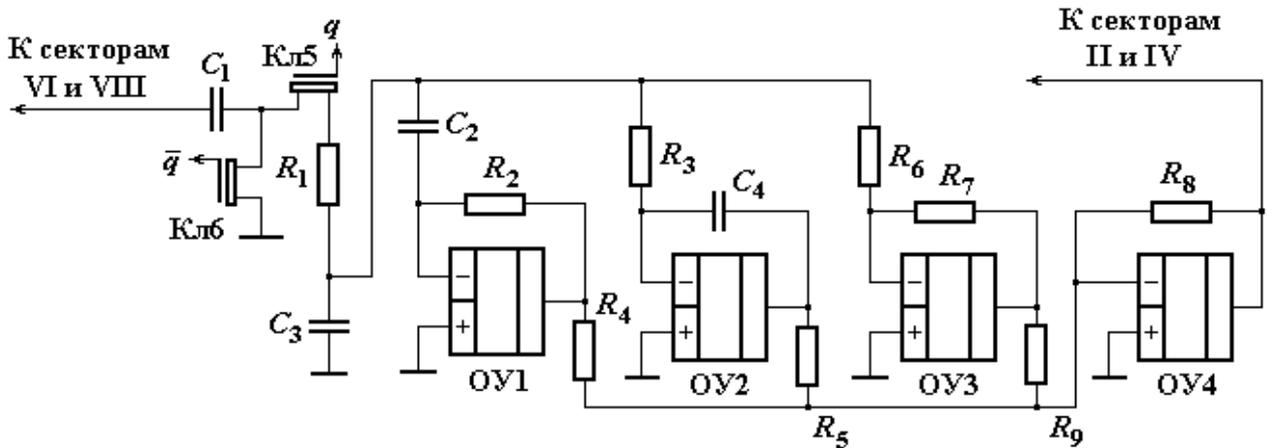


Рис. 5. Принципиальная схема корректирующего устройства

Рассмотренная электрическая схема корректирующего устройства влияния на крутизну статической характеристики микрогироскопа не оказывает. Величины емкостей, используемых в схеме, составляют десятки пикофард, а резисторов - десятки килоом, поэтому при микросборке корректирующее устройство имеет малые габаритные размеры, не приводящие к существенному увеличению общих габаритных размеров микрогироскопа.

Применяя типовые методики работы со структурными схемами, полную передаточную функцию микрогироскопа можно представить в следующей форме:

$$W_{\Omega}(s) = \frac{M(b_2 s^2 + b_1 s + 1)}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (18)$$

где  $M = K_{\text{чз}} K_{\text{пп}} K_{\text{yc}}$  - коэффициент крутизны статической характеристики микрогироскопа в замкнутом контуре;  $N = K_{\text{oc}} K_{\text{пп}} K_{\text{yc}}$  - жесткость электрической пружины;  $b_0 = 1$ ;  $b_1 = T$ ;  $b_2 = T^2$  - коэффициенты числителя передаточной функции;  $a_0 = N$ ;  $a_1 = T(G + N)$ ;  $a_2 = K_{\Sigma} + G\tau + NT$ ;  $a_3 = K_{\Sigma}\tau + \rho F r_0(1 + i^2)$ ;  $a_4 = \rho F r_0(1 + i^2)\tau T$  - коэффициенты знаменателя передаточной функции. Коэффициент  $M$  охватывает все параметры резонатора: упругость материала кольца, добротность, геометрические размеры и форму колебаний, поэтому в результате определения имеет физический смысл коэффициента Брайена.

Поскольку кольцо выполняется из монокристаллического кремния со стабильными механическими характеристиками, то доминирующей погрешностью является всего лишь источник опорного напряжения.

Электроника замкнутого контура основана на математической модели, которая учитывает статические ошибки, например, расщепление частот, изменение добротности  $Q$ , смещение электродов и расстройку мод от рисунка электродов, наряду с ошибкой электронного усиления, фазовую ошибку и ошибку перекрестных помех. Динамические ошибки, связанные с отсутствием газодинамического демпфирования во вторичном контуре, такие, как несоответствие АЧХ, ФЧХ, полосы пропускания и переходных процессов требуемым с точки зрения конкретных измерительных систем, могут быть исключены только при условии построения оптимального корректирующего звена. Электрическое демпфирование во вторичном контуре не должно влиять на первичный контур возбуждения принудительных колебаний в кольце, т.е. в конечном итоге на добротность первичного ЧЭ.

Ниже приведена компьютерная программа определения необходимой добротности  $Q$  для получения оптимального переходного процесса.

```
function [Wopt,K,CKO]=CKOfun(Q);
clc
%DUS
%density of silicon
rho=2328;
%The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
%acceleration of gravitation
g=9.80665;
%length of a pendulum
bk=0.05e-3; ck=1e-3; r0=5e-3; i=2
%viscosity of nitrogen
%mu=17.9e-6;
mu=0
omega=3000;
%weight of a pendulum
m=pi*r0*rho*bk*ck/4
%the moment of inertia
I=(ck*bk^3)/12
%axial rigidity
G=((E100*I)*(1-i^2)^2)*i^2/(r0^3)
%backlash between a pendulum and an electrode
h=4e-6
%factor of transfer of a sensitive element
Q
Uop=5;
e0=8.85418782e-12;
eazota=1;
F=pi*r0*ck/4
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*e0*eazota*Uop*F/(h^2);
delta=(Koc*Uop*r0^3/(E100*I))*(pi/4-2/pi)
```

```

Kche=rho*F*r0*omega*delta/i;
  Kyc=1;
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Q/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
T=sqrt(m/G)
%((2*pi*r0)^2)/i)*sqrt((rho*F*(1+i^2)/(E100*I*(1-i^2)^2))
tau=0.0000001
%factors of numerator
b0=1; b1=T; b2=T^2
%factors of a denominator
a0=N; a1=(G+N)*T; a2=G*tau*T+N*T^2; a3=m*T; a4=m*tau*T;
%Not closed transfer function
W=tf(M*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])
K=dcgain(W)
Wopt=minreal(W);
dt=.00001;
t=[0:dt:2]';
u=1-dirac(t+1e-15);
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2);

clear
k=1;
rand('seed',0);
Q=1000
CKOmax=1e15;
while k<200
Q0=Q*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(Q0);
if CKO<CKOmax
CKOmax=CKO;
Q=Q0;
end
k=k+1;
end
clc
Q
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(Q)
step(Wopt/K),grid

```

### Выводы

По конструкции микрогироскопа с резонирующим кольцом можно сделать следующие выводы:

1. Особенностью микрогироскопа является то, что в его конструкции нет необходимости в выполнении малых зазоров между резонатором и окружающим материалом, поэтому исключается проблема, связанная с “прилипанием”.

2. Основное достоинство конструкции микрогироскопа с резонирующим кольцом в том, что кольцевой резонатор всю свою вибрацию имеет в одной плоскости, поэтому обработка кремния является планарной, при этом нет необходимости в многослойной обработке.

3. В сравнении с микрогироскопом камертонного типа микрогироскоп с резонирующим кольцом при одинаковых аппаратных затратах обладает примерно на порядок лучшими статическими и динамическими характеристиками.

---

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. –503 с.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2010*

**V.D. Vavilov, I.V. Vavilov**

### **DEVELOPING A MICROSYSTEM DAS WITH A RESONATING RING.**

The article considers development of a microsystem DAS as a sensitive element that includes a resonating ring of a crystalline silicon. A singular feature of the design is that an electrostatical converter is used as a DAS drive.

*Key words:* resonating ring, microsystem DAS, crystalline silicon, transient process, quality factor of a DAS.