

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.781.2

В.Д. Вавилов, И.В. Вавилов, В.И. Поздяев

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ДАТЧИКОВ ЗА СЧЕТ ДВОЙНОГО СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

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

Рассмотрена возможность повышения точности кремниевых датчиков по пути схемного решения – применением двойного синхронного детектирования – на примере микрогироскопа. Даются конструктивная и принципиальная схемы микрогироскопа, математическая модель, теоретическая оценка характеристик.

Ключевые слова: кремниевый датчик, микрогироскоп, синхронное детектирование, повышение точности.

В настоящее время кремниевые датчики получили широкое распространение во многих областях науки и техники. Тем не менее, точность кремниевых датчиков является еще не достаточной, например, с точки зрения применения их в навигационных системах летательных аппаратов. Известны частные случаи решения повышения точности за счет аппаратной или алгоритмической коррекции [1]. Данная статья посвящена одному из таких вопросов, повышению точности кремниевых датчиков схемным решением, а именно за счет двойного синхронного детектирования. Рассмотрим принцип повышения точности на примере микрогироскопа дрейперовской схемы.

Вначале опишем его конструктивные особенности. Микрогироскоп включает в свой состав ЧЭ в виде слоистой структуры стекло-кремний-стекло (рис. 1). На кремниевой несущей пластине 1 посредством микроэлектронной технологии по специально спроектированным фотошаблонам изготовлены следующие элементы: консольная пластина 2, в прямоугольном окне которой размещена рамка привода 3, подвешенная в консольной пластине на двух торсионах, работающих на изгиб. Внутри консольной пластины на таких же торсионах 5 подвешена чувствительная масса 6. Торсионы имеют сечение, близкое к крестообразному, получаемому при анизотропном травлении кремния в плоскости (100) щелочным травителем и последующим изотропным полированием.

Чувствительная масса выполнена из проводящего монокремния и является одновременно подвижным электродом емкостного преобразователя перемещений и подвижным электродом силового электростатического преобразователя. Подвижный электрод соединен с общей точкой питания «землей». Характерной особенностью чувствительного элемента является простота конструктивного решения, выливающаяся в схему “чувствительная масса в вибрирующей рамке”. Вибрирующая рамка и чувствительная масса имеют по одной степени свободы – это угловые колебания во взаимно перпендикулярных осях. Подвесы (торсионы) вибрирующей рамки и чувствительной массы могут работать как на кручение, так и на изгиб.

На рис. 1 кристаллографические направления для всех граней находятся в семействе направлений [110], а верхняя и нижняя плоскости - в семействе направлений [100], что соот-

ветствует максимальной прочности при минимальной жесткости торсиона. Чувствительная масса 6 вместе с дополнительным грузом 7 в данной конструкции выполняют роль гирочувствительного узла, а рамка привода 3 – функции гиromотора, и приводится в принудительные колебания относительно оси x с помощью электростатического преобразователя. Межэлектродные емкости преобразователя перемещений для смежных плеч моста изменяются при этом одинаково, в результате схема является нечувствительной к таким перемещениям. Для соединения с неподвижным основанием служит площадка 4 , а для энергетической развязки между основанием и подвижными рамками служит консоль 9 .

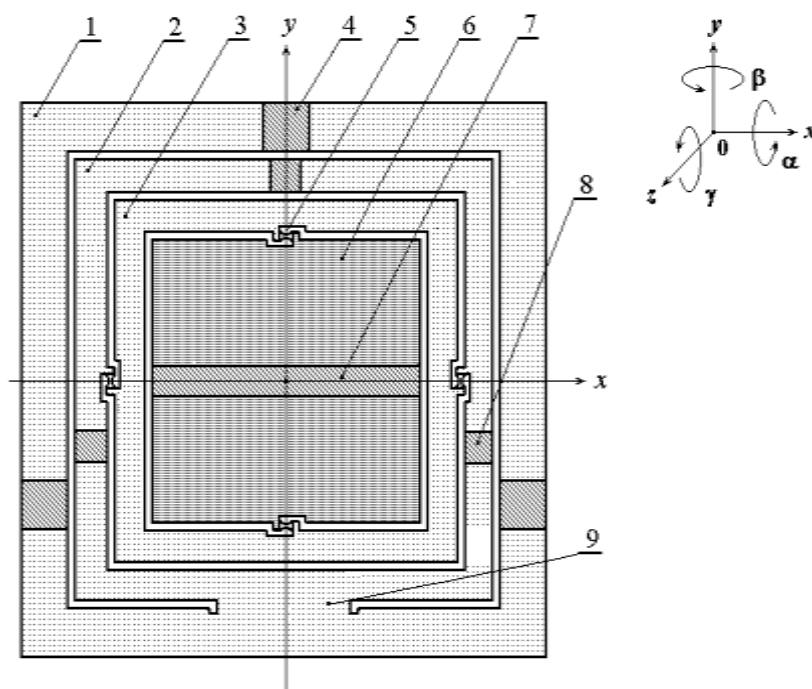


Рис. 1. Кристалл чувствительного элемента ДУС:

1 – несущая пластина; 2 – консольная пластина; 3 – рамка привода; 4 – площадка крепления несущей пластины к корпусу; 5 – упругий подвес; 6 – чувствительная масса; 7 – дополнительный груз; 8 – площадка соединения с обкладкой 9 – опора консоли пластины (хвостовик)

Под рамкой привода (она же внешняя рамка) на стеклянной крышке расположены электроды 3 (рис. 2), возбуждающие резонансные колебания, а под внутренней рамкой – силовые электроды 4 и электроды емкостного преобразователя угловых перемещений 5 . При отсутствии угловой скорости Ω чувствительная масса совершает вместе с внешней рамкой колебательные движения относительно оси x и не имеет их относительно оси y .

Пересечение всех осей: измерительной, возбуждающей и оси воздействия угловой скорости – в данной конструкции совмещено в одной точке, а именно в центре тяжести чувствительной массы, в свою очередь выполненной внутри рамки привода 3 .

При наличии поворотной скорости Ω_z на лепестках внутренней рамки возникает знакопеременная кориолисова сила, направленная по оси x и возбуждающая во внутренней рамке колебания относительно оси y . Частота этих колебаний совпадает с частотой вынужденных колебаний внешней рамки, а амплитуда колебаний пропорциональна поворотной скорости. Для повышения чувствительности микрогироскопа масса внутренней рамки может быть увеличена за счет дополнительного груза 7 . Однако такое конструктивное решение не является приемлемым по двум причинам: во-первых, при неразъемном соединении кремния с большинством металлов имеет место несовпадение температурных коэффициентов, а, во-вторых, дополнительный груз требует выделения площади на подвижном электроде, что приводит к снижению электроста-

тической силы обработки. Удачным решением является вакуумное напыление металла с близким температурным коэффициентом линейных расширений на поверхность кремниевого маятника, например, нержавеющей сталью типа ковара.

Оптимальным режимом работы гироскопа является случай, когда собственная частота внутренней рамки совпадает с частотой возбуждения внешней рамки. Принципиально, без учета воздействия внешней среды, условием динамической настройки являются следующие соотношения:

$$G_{y1}/J_1 = G_{y2}/J_2, \quad \omega_{\text{возб}} = \sqrt{G_{y2}/J_2}, \quad (1)$$

где $J_1 = m_1(a_1^2/3 + c_1^2/12)$ и $J_2 = m_2(a_2^2/3 + c_2^2/12)$ – моменты инерции внешней и внутренней рамок; $G_{y1} = E_{[100]}b_{п1}c_{п1}^3/16a_{п1}$ и $G_{y2} = E_{[100]}b_{п2}c_{п2}^3/16a_{п2}$ – жесткости подвесов внешней и внутренней рамок при работе на изгиб; $a_{п1}$, $a_{п2}$, $b_{п1}$, $b_{п2}$, $c_{п1}$, $c_{п2}$ – соответственно размеры подвесов внешней и внутренней рамок; $E_{[100]}$ – модуль упругости кремния в направлении [100]; γ – коэффициент Пуассона для кремния. В практических конструкциях микрогироскопов собственные частоты рамки привода и чувствительной массы определяются значительно сложнее, чем в соотношении (1), так как на подвижные узлы кроме сил инерции и упругости могут воздействовать силы демпфирования и компенсации перемещений.

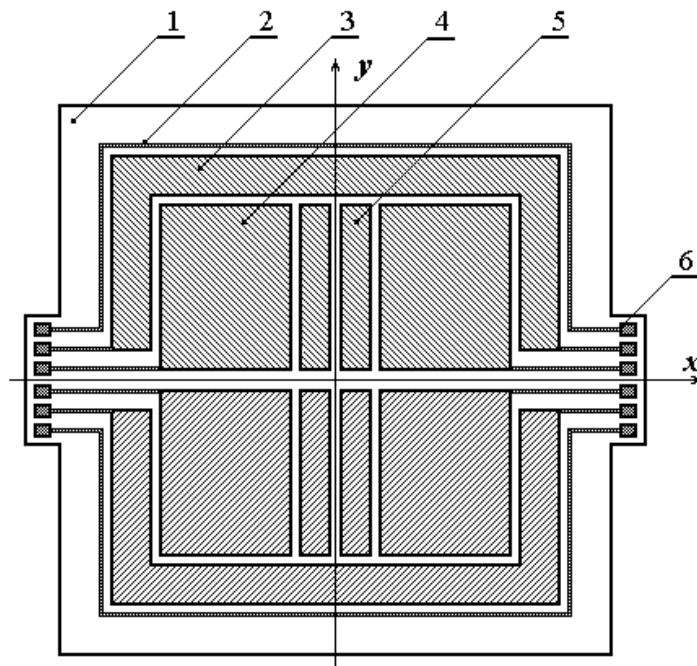


Рис. 2. Обкладка с неподвижными электродами:

- 1 – стеклянная пластина (или пластина из непроводящего кремния);
- 2 – охранный контур; 3 – электрод возбуждения вынужденных колебаний; 4 – электрод силового датчика; 5 – электрод датчика перемещений;
- 6 – контактная площадка

В соответствии с гипотезой Буссенеска с целью снижения контактных напряжений необходимо увеличивать расстояния от контактных площадок до мест, чутко реагирующих на изменения напряжений (например, от точек жесткого треугольника, т.е. мест соединения несущей пластины с корпусом до упругих подвесов). Система из двух элементов, колеблющихся относительно взаимно перпендикулярных осей и расположенных на дополнительной консольной пластине, в свою очередь неразъемно соединенной с несущей пластиной с помощью консоли (хвостовика), развязана с корпусом.

Короткие подвесы с криволинейными обводами по ширине и толщине получены за счет комбинированного травления кремния (анизотропного и изотропного) с применением специальных маскирующих корректоров; они идеально подходят для работы на изгиб.

Внешняя рамка является виброприводом, частота ее колебаний выбирается равной собственной частоте подвешенной в ней чувствительной массы. Внешняя рамка осуществляет угловые колебания относительно оси y , возбуждение которых задается резонансным генератором со стабилизированной амплитудой и фазой.

Модуль полного углового ускорения внешней рамки

$$\varepsilon = \omega\Omega \sin(\omega, \Omega), \quad (2)$$

где ω - переносная угловая скорость; Ω - относительная угловая скорость (измеряемая). В проекциях на прямоугольные оси координат уравнение (2) запишется так:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \omega_y \Omega_z - \omega_z \Omega_y, \\ \varepsilon_y &= \omega_x \Omega_z - \omega_z \Omega_x, \\ \varepsilon_z &= \omega_y \Omega_x - \omega_x \Omega_y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - проекции углового ускорения на координатные оси; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - проекции переносной угловой скорости; $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ - проекции относительной угловой скорости.

Учтем, что в рассматриваемой кинематической схеме имеется всего две степени свободы, по которым возможны перемещения.

Произведение углового ускорения ε_x на момент инерции относительно той же оси создает момент кориолисовой силы

$$M_{\text{кор}} = J_y \omega_y \Omega_z, \quad (4)$$

где J_y - момент инерции внутренней рамки вместе с чувствительным грузом относительно оси y .

Поскольку момент кориолисовой силы является знакопеременным, то он приводит во вторичные колебания внутреннюю рамку с той же частотой и осью колебаний, ортогональной двум другим. Других движений в кинематической схеме нет. Мерой, определяющей величину поворотной скорости, является амплитуда колебаний внутренней рамки, на которую ее смещает момент кориолисовой силы.

С целью математического описания характеристик интегрального ДУС запишем уравнения Лагранжа второго рода для кинематической схемы по рис. 1

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} = Q_\beta, \quad (5)$$

где $T = J_x \dot{\alpha}^2 / 2 + J_y \dot{\beta}^2 / 2$ - кинематическая энергия системы; $Q_\alpha = J_y \omega_0 \Omega - K_{d\alpha} \dot{\alpha} - G_\alpha \alpha$ - обобщенная сила относительно угловой координаты α ; $Q_\beta = M_{\text{эл}} - K_{d\beta} \dot{\beta} - G_\beta \beta$ - обобщенная сила относительно угловой координаты β ; $M_{\text{эл}}$ - момент электрической силы привода; $K_{d\alpha}$ и $K_{d\beta}$ - абсолютные коэффициенты газодинамического демпфирования относительно угловых координат α и β ; G_α и G_β - жесткости упругих подвесов относительно осей α и β . В развернутой форме уравнение (5) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} J_x \ddot{\alpha} + K_{d\alpha} \dot{\alpha} + G_\alpha \alpha &= J_x \omega_0 \Omega, \\ J_y \ddot{\beta} + K_{d\beta} \dot{\beta} + G_\beta \beta &= M_{\text{эл}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Первое уравнение в (6) характеризует внутреннюю рамку, а второе – внешнюю. Между собой они связаны только частотой колебаний, причем колебания во внутреннюю рамку передаются от внешней посредством момента кориолисовых сил. Внутренняя же рамка никак не влияет на внешнюю. Используем первое уравнение для формирования характеристик измерительного канала, а второе для возбуждения стабильных колебаний внешней рамки.

Полный электронный блок ДУС должен выполнять следующие функции: 1) преобразовывать угловую скорость чувствительного элемента в пропорциональный электрический сигнал по напряжению; 2) выделять знак измеряемой угловой скорости; 3) обеспечивать оптимальное демпфирование подвижному узлу посредством электрического контура совместно с корректирующим устройством; 4) отфильтровывать шумовые составляющие в измерительном сигнале. Для реализации отмеченных функций электронный блок (рис. 3) включает следующие узлы: 1) емкостный широтно-импульсный преобразователь перемещений чувствительной массы, выполненный на двух симметричных мультивибраторах (ключи Кл1 и Кл2, триггеры Шмидта Тл1-Тл4, и измерительные емкости C_1 и C_2); 2) первый синхронный детектор (ключи Кл3 и Кл4 и емкость C_5); 3) первый фильтр нижних частот (пассивный – резистор R_7 и емкость C_6); 4) корректирующее устройство (дифференциатор на ОУ1, интегратор на ОУ2, пропорциональное звено на ОУ3 и сумматор управляющих сигналов на ОУ4); 5) второй синхронный детектор (ключи Кл5 и Кл6 и емкость C_9); 6) второй фильтр нижних частот (активный) на ОУ5.

Первый и второй синхронные детекторы тактируются импульсными последовательностями разной частоты. Первый синхронный детектор предназначен для выделения полезного сигнала и знака в зашумленном сигнале емкостного преобразователя перемещений, а первый фильтр нижних частот – для очистки сигнала от несущей высокочастотной составляющей. Далее очищенный сигнал в виде переменного напряжения с частотой возбуждения принудительных колебаний чувствительной массы и с амплитудой, пропорциональной измеряемой угловой скорости, смешивается с корректирующим сигналом и с обратным знаком подается по цепи отрицательной обратной связи на силовую обработку.

Вторичные колебания чувствительной массы – это колебания относительно оси y . Они возникают от действия кориолисовой силы, т.е. при наличии угловой скорости относительно оси z . Сигнал обратной связи стремится свести к нулю амплитуду вторичных колебаний. Второй синхронный детектор предназначен для выделения знака в выходном сигнале и тактируется частотой, на два порядка меньшей по сравнению с первым, причем его частоту выбирают равной собственной частоте механического узла. Первая и вторая тактирующие частоты должны быть кратными, т.е. в период второй импульсной последовательности должно укладываться целое число периодов первой импульсной последовательности.

Выберем корректирующее устройство таким образом, чтобы его передаточная функция совместно с электронным блоком представляла собой ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный), как наиболее оптимальный:

$$W_{\text{кор}}(s) = a_0 + a_1 s + \frac{1}{a_2 s}, \quad (7)$$

где a_0 , a_1 , a_2 - параметры корректирующего устройства.

Для определения параметров корректирующего устройства используем следующие допущения и ограничения: 1) в статике корректирующее устройство не должно оказывать влияния на измерительный процесс, поэтому $\alpha_0 = 1$; 2) с целью обеспечения синхронной работы интегратора и корректирующего устройства как единого целого их постоянные времени должны быть равны, при этом имеем $\alpha_1 = T$; 3) выполним конструктивно равенство постоянных времени микромеханического узла и электронного блока (за исключением постоянной времени фильтра нижних частот емкостного преобразователя перемещений), т.е.

$J_x/G_\alpha = T^2$. Более гибкое определение коэффициентов корректирующего устройства возможно при постановке задачи оптимизации, например, переходного процесса.

Электронный усилитель в соответствии с принципиальной схемой представляет собой фильтр нижних частот первого порядка (апериодическое звено), это участок схемы на ОУ1 с внешними цепями обратных связей. Соответственно его передаточная функция имеет вид:

$$W_{yc}(s) = \frac{K_{yc}}{1 + \tau s},$$

где $K_{yc} = R_8/R_7$ – коэффициент усиления; $\tau = R_7 C_6$ – постоянная времени фильтра. Здесь следует заметить, что порядок фильтра нижних частот может быть иным в зависимости от требований к фильтрации помех, следовательно, и его передаточная функция.

В замкнутом контуре с силовой электростатической обратной связью передаточная функция интегрального ДУС с учетом описания отдельных звеньев имеет вид

$$W_{акс}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (8)$$

где

$$K = K_{чз} K_{пп} K_{yc}, \alpha_4 = JT\tau; \alpha_3 = K_{дy} T\tau + JT; \alpha_2 = G_y T\tau + K_{дy} T + K_{oc} K_{пп} K_{yc} T^2; \\ \alpha_1 = (G_y + K_{oc} K_{пп} K_{yc}) T; \alpha_0 = K_{oc} K_{пп} K_{yc}; \beta_2 = T^2; \beta_1 = T; \beta_0 = 1.$$

В (8) входят параметры структурной схемы, имеющие следующий смысл: $K_{чз} = J_y \omega_0$ – коэффициент передачи чувствительного элемента; $W_{пу}(s) = 1/J_x s^2 + K_{дy} s + G_\alpha$ – передаточная функция подвижного узла; $K_{oc} = 2\varepsilon \varepsilon_0 U_{оп} Fl_{ц} / h^2$ – коэффициент передачи электростатического преобразователя момента; $K_{пп} = U_{оп} l_{ц} Q / h$ – коэффициент передачи преобразователя перемещений; $l_{ц}$ – плечо качания внутренней рамки; h – зазор между проводящей внутренней рамкой и неподвижным электродом; Q – добротность механического узла. Соответственно, чем выше добротность, тем выше амплитуда колебаний и, следовательно, чувствительность механического узла. Добротность оценивается следующим образом:

$$Q = \frac{1}{2\xi + \eta}, \quad (9)$$

где ξ – относительный коэффициент скоростного демпфирования (газодинамического, магнитоэлектрического, контурного и др.); η – коэффициент потерь на внутреннее трение в кристаллической решетке материала упругих подвесов.

Проверка ДУС на устойчивость по критерию Гурвица дает следующие соотношения:

$$\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_0 \alpha_3 > 0; \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1^2 \alpha_4 - \alpha_3^2 \alpha_0 > 0, \quad (10)$$

которые должны выполняться при условии положительности всех остальных миноров определителя Гурвица. При допущении $K_{дy} = 0$, $\tau \ll T$ соотношения (10) критерия Гурвица преобразуются в одно простое неравенство:

$$(G + K_{oc} K_{пп} K_{yc}) T^2 > J. \quad (11)$$

Учитывая равенство постоянных времени микромеханического подвижного узла и электронного корректирующего устройства, из (11) видим, что исследуемый ДУС устойчив.

Полная передаточная функция ДУС с учетом второго синхронного детектора и второго фильтра нижних частот имеет следующий вид:

$$W_{\text{дус}}(s) = \frac{K_{\text{чз}} K_{\text{пп}} K_{\text{yc}} (b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}{a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a_6 &= T^3 J\tau; \quad a_5 = (K_{\text{дy}}\tau + J)T^3 + 2T^2 J\tau; \quad a_4 = JT\tau + 2T^2(K_{\text{дy}}\tau + J) + T^3(G_y\tau + K_{\text{дy}} + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}T); \\ a_3 &= (K_{\text{дy}}\tau + J)T + 2T^2(G_y\tau + K_{\text{дy}} + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}T) + T^3(G_y + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}); \\ a_2 &= (G_y\tau + K_{\text{дy}} + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}T)T + 2(G_y + 2K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}})T^2; \\ a_1 &= (G_y + 3K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}})T; \quad a_0 = K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}; \quad b_2 = T^2; \quad b_1 = T; \quad b_0 = 1. \end{aligned}$$

Рассмотрим далее влияние добротности колебательной системы на характеристики ДУС. При возбуждении на резонансной частоте внешней рамки ее амплитуда прямо пропорциональна добротности.

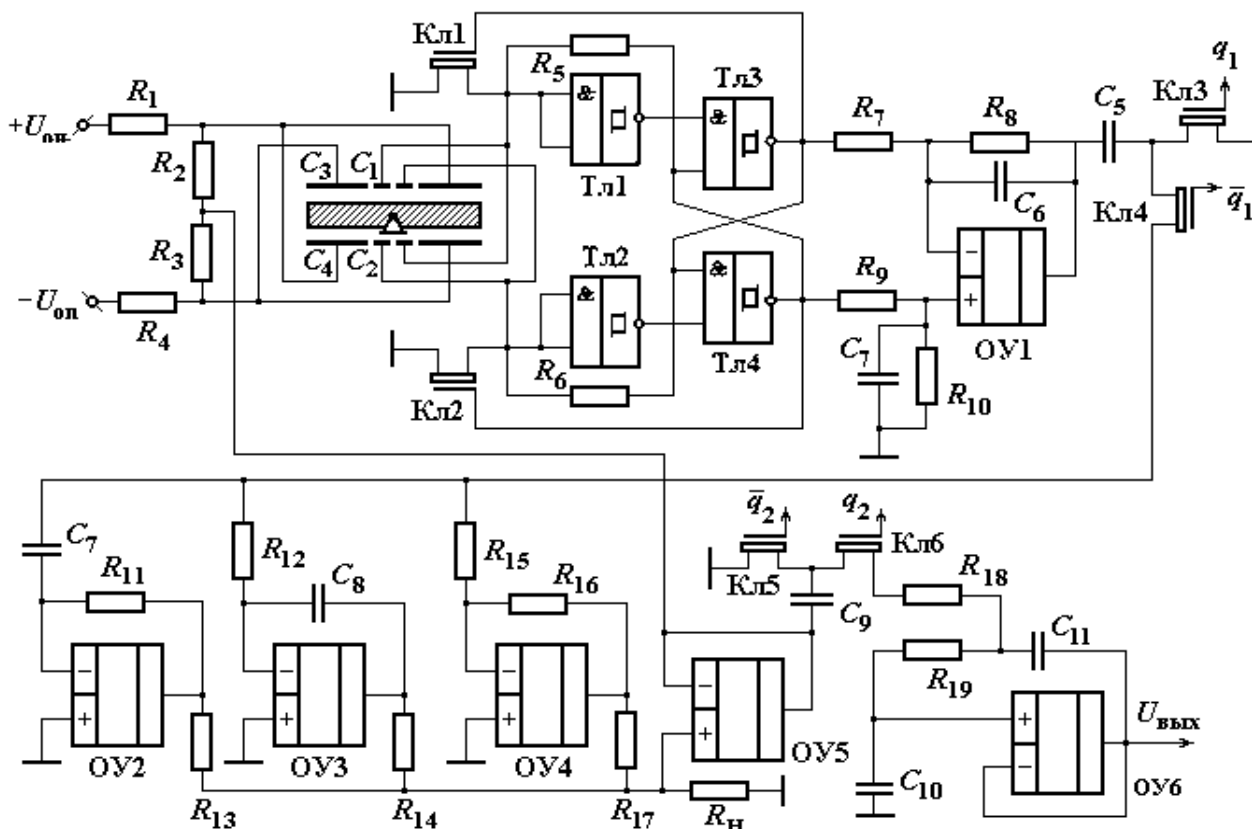


Рис. 3. Принципиальная схема микросистемного ДУС типа «угловой вибратор» с двойным синхронным детектированием

Относительный коэффициент скоростного демпфирования, например, газодинамический зависит от конструкции чувствительного элемента и свойств среды, в которой осуществляются колебания. Для увеличения добротности колебательной системы чувствительный элемент вакуумируют. При этом коэффициенты скоростного демпфирования обращаются в нуль, т.е. $K_{\text{дх}} = K_{\text{дх}} = 0$, а необходимые динамические свойства измерительному каналу задают введением в него корректирующих устройств. Коэффициент потерь на внутреннее тре-

ние зависит от свойств кристаллической решетки материала упругих подвесов и от их геометрических размеров. Он более чем на два порядка меньше коэффициента скоростного демпфирования. Следовательно, при вакуумировании добротность повышается во столько же раз. Дальнейшее повышение добротности возможно за счет применения для упругих подвесов материалов с малым внутренним трением, таких как кварцевое стекло, монокремний и другие полупроводниковые соединения.

Подгонку частот, как правило, осуществляют лазерным испарением материала с внутренней рамки непосредственно через стеклянную крышку. При подгонке частот влиять на жесткости торсионов внешней и внутренней рамок нежелательно, поскольку все характеристики гироскопа зависят от точности изготовления торсионов. Масса внутренней рамки может быть увеличена с помощью дополнительного груза.

Газодинамическое демпфирование используется преимущественно со схемами прямого измерения. При повышенных требованиях к характеристикам микрогироскопа применяют компенсационные схемы с силовой обработкой перемещений подвижного узла, а сам подвижный узел вакуумируют.

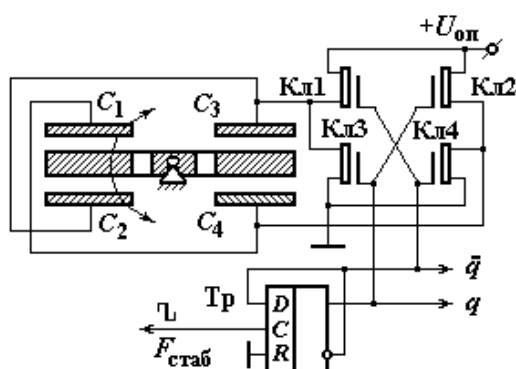


Рис. 4. Схема возбуждения колебаний внешней рамки ЧЭ

Абсолютный коэффициент газодинамического демпфирования при этом равен нулю, так как динамическая вязкость вакуума равна нулю. Демпфирование подвижного узла обеспечивают введением корректирующего устройства в электрический контур микрогироскопа. На рис. 4 приведена принципиальная схема возбуждения колебаний внешней рамки ЧЭ. Неподвижные электроды внешней рамки перекрестно соединены для выполнения функций силового преобразователя (емкости C_1 и C_4 , а также C_2 и C_3). Схема возбуждения включает в свой состав ключевое устройство Кл1-Кл4, управляемое счетным триггером Тр и переключающее опорное напряжение между неподвижными электродами силового преобразователя.

Противодействие моменту от кориолисовых сил на чувствительную массу осуществляется линеаризованным по напряжению электростатическим преобразователем. Линеаризаторы выполнены на резистивных делителях $R_1 - R_4$ (рис. 3). Применение в прямой цепи в составе корректирующего устройства интегратора обеспечивает линеаризацию электростатического преобразователя по перемещению.

С целью обеспечения максимальной чувствительности микрогироскопа конструктивные параметры внутренней рамки должны быть выбраны так, чтобы ее резонансная частота совпадала с частотой колебаний, вынуждаемых знакопеременной кориолисовой силой. Резонансные частоты могут быть найдены как полюсы передаточной функции (8). Так, для первого резонансного пика имеем

$$\omega_p = \sqrt{a_1/a_3}.$$

Приравнявая резонансную частоту к частоте возбуждения внешней рамки, получим расчетное соотношение для динамической настройки микрогироскопа:

$$\sqrt{G_1/J_1} = 2\pi C_1 R_1. \quad (13)$$

Реализация соотношения (13) осуществляется технологическим путем. Причем подгонку возможно осуществлять подстройкой и механических, и электронных компонентов.

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Рассмотренная конструктивная схема с двумя синхронными детекторами позволяет выполнить микрогироскоп на любой желаемый диапазон измерений. При этом для повыше-

ния чувствительности на нижних пределах момент инерции внутренней рамки можно увеличить вакуумным наращиванием слоя металлизации.

2. Точность микрогирокопа с двумя синхронными детекторами ограничивается точностью электростатического силового преобразователя, включенного в цепь отрицательной обратной связи.

3. Компьютерное моделирование рассмотренной схемы показало существенное снижение (до двух порядков) уровня шумов, обусловленное применением двойного синхронного детектирования.

Библиографический список

1. **Мокров, Е.А.** Акселерометры НИИ физических измерений - элементы микросистемотехники / Е.А. Мокров, А.А. Папко // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 3–9.
2. **Былинкин, С.Ф.** Интегральные акселерометры прямого измерения / С.Ф. Былинкин [и др.] // Датчики и системы. № 6. 2000. С. 30–33
3. **Паршин, В.А.** Особенности технологии мультисенсорных датчиков с нелегированными упругими подвесами / В.А. Паршин, В.И. Харитонов // Датчики и системы. 2002. № 2. С. 22–24.

*Дата поступления
в редакцию 16.02.2010*

V.D. Vavilov, I.V. Vavilov, V.I. Pozdyaev

PRECISION ENHANCEMENT OF SILICON SENSORS BY MEANS OF DOUBLE SYNCHRONOUS DETECTION

We discuss possibility of increasing precision of silicon sensors via circuit solutions – by applying double synchronous detection – using a microgyroscope as a case study. We give construction and circuit diagrams of a microgyroscope, a mathematical model, and a theoretical estimation of characteristics.

Key words: silicon sensor, microgyroscope, synchronous detection, precision enhancement