

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

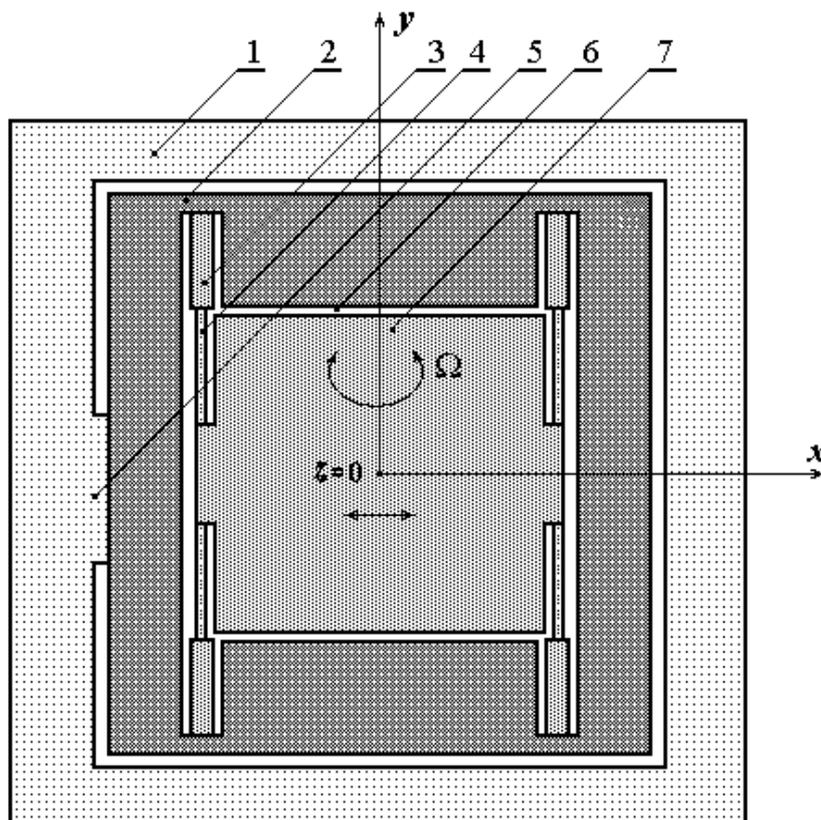
## РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ НЕСКОЛЬКИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПО ОДНОМУ КАНАЛУ

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

Приводятся материалы разработки микросистемного ДУС, в качестве чувствительного элемента в котором используется вибрирующая пластина из кристаллического кремния, подвешенная на двустороннем подвесе. Особенностью разработки является то, что с помощью двух одинаковых синхронных детекторов и дифференциального фильтра нижних частот осуществляется разделение сигналов двух физических величин, действующих по одному каналу.

*Ключевые слова:* вибрирующая пластина, микросистемный ДУС, кристаллический кремний, фильтр нижних частот, упругий элемент, синхронный детектор.

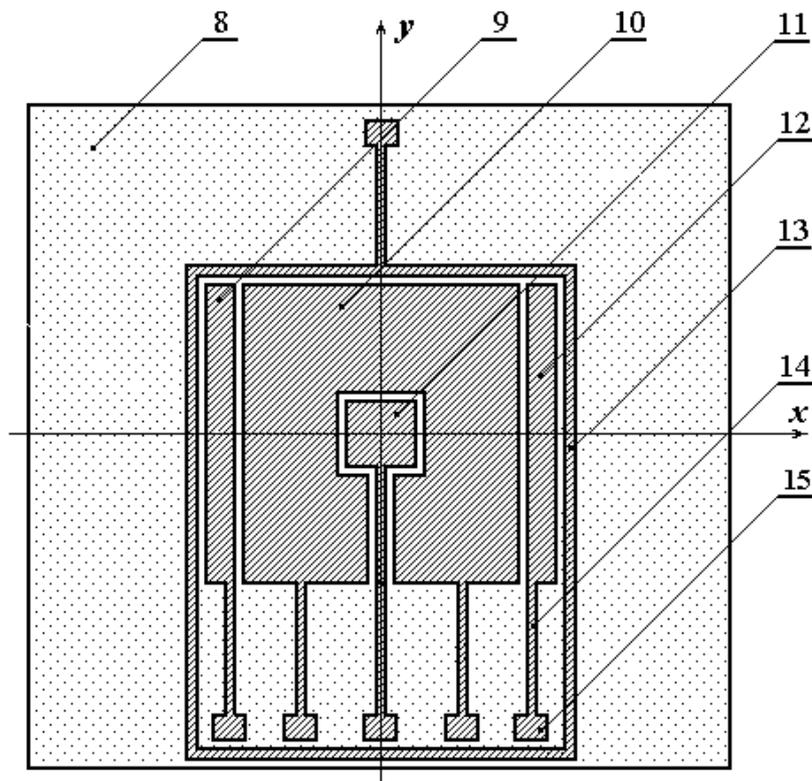
В микросистемной технике часто возникает необходимость измерений нескольких физических величин, действующих по одному каналу. Например, в датчике угловых скоростей с двусторонними подвесами (рис. 1) по оси  $z$  действует линейное ускорение и одновременно при колебании сосредоточенной массы  $7$  вдоль оси  $x$  и действии угловой скорости  $\Omega$  относительно оси  $y$ , возникает кориолисово ускорение.



**Рис. 1. Вид в плане ЧЭ:**

- 1 - корпусная пластина; 2 - монтажная пластина; 3 - упругий подвес по оси  $z$ ;  
4 - упругий подвес по оси  $x$ ; 5 - консольная балка;  
6 - сквозное травление; 7 - сосредоточенная масса

Величины этих сил соизмеримы. При этом работает упругий подвес 3, а упругий подвес 4 создает силу сопротивления по оси  $x$ . Сосредоточенная масса является чувствительной к обоим ускорениям и одновременно является подвижным электродом емкостной измерительной схемы. Для осуществления принудительных колебаний сосредоточенной массы по оси  $x$  и для измерения перемещений по оси  $z$  с обеих сторон кремниевого чувствительного элемента приварены молекулярной сваркой диэлектрические обкладки, на которых нанесены проводящие электроды (рис. 2).



**Рис. 2. Топология неподвижных электродов:**

8 - неподвижная обкладка; 9 и 12 - проводящие электроды возбуждения колебаний; 10 - обкладка силового преобразователя; 11 - обкладка емкостного преобразователя перемещений; 12 - электроды возбуждения колебаний; 13 - охранный контур заземления; 14 - проводящие дорожки соединения электродов с контактными площадками; 15 - контактные площадки

Принцип работы конструктивной схемы микросистемного ДУС с двусторонними подвесами аналогичен принципу работы конструктивной схемы с линейными подвесами. Совершенно очевидно, что и математические модели обеих этих схем, записанные в общем виде, являются идентичными.

При действии поворотной угловой скорости относительно оси  $y$ , параллельно к плоскости подвижного узла, возникает кориолисова сила, действующая по оси  $z$ :

$$F_k = 2m\Omega\dot{x}, \quad (1)$$

где  $m$  - масса подвижного узла;  $\Omega$  - угловая скорость относительно оси  $y$  (внешнее воздействие);  $\dot{x}$  - скорость колебательного процесса сосредоточенной массы вдоль оси  $x$ . Колебания эти являются принудительными на собственной частоте упругой системы.

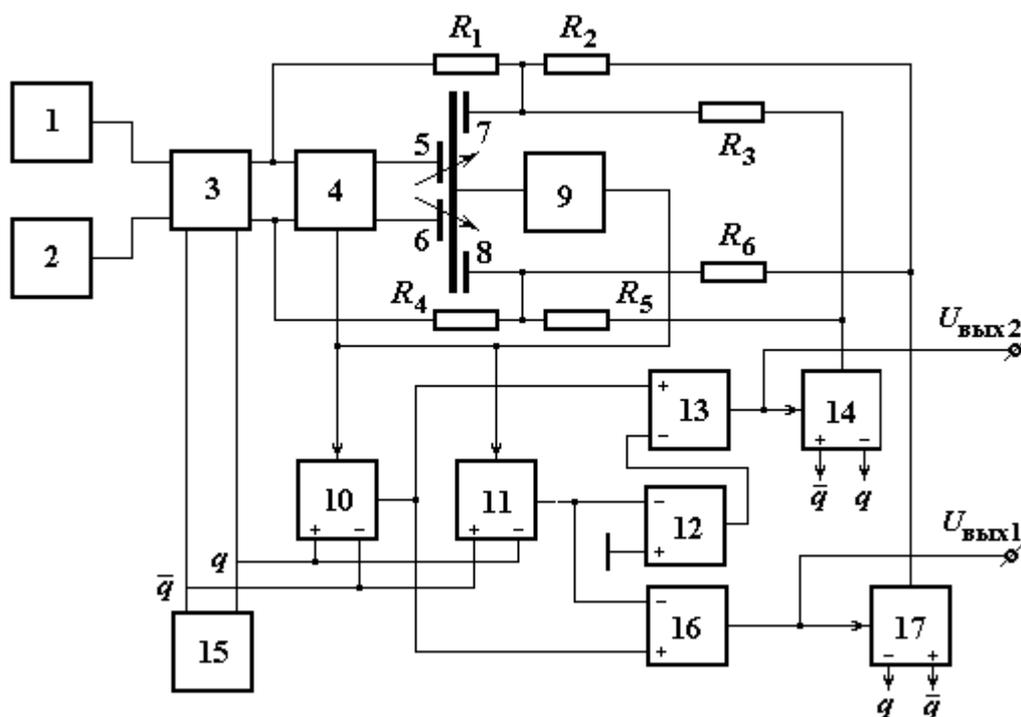
Осредненное значение линейной скорости можно оценить через угловую скорость возбуждения колебаний и амплитуду перемещения:

$$\dot{x} = \omega_g \delta, \quad (2)$$

где  $\omega_g$  - угловая скорость колебательного движения подвижного узла, возбуждаемая автогенератором;  $\delta$  - амплитуда колебаний.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Полный цикл работы устройства осуществляется за один период синхронизирующих импульсов. Импульсная последовательность на выходе генератора 15 синхронизирующих импульсов подает сигналы на устройство 3 переключения полярности опорных напряжений 1 и 2. Переменное напряжение с амплитудой, равной величине опорных напряжений, подводится к первому и второму входам сумматора обратной связи 4.

К третьему входу сумматора обратной связи подводится напряжение  $U_1$  с выхода первого операционного усилителя 9. Это напряжение алгебраически складывается с первым положительным опорным напряжением ( $+U_{он} \pm U_1$ ) и со вторым отрицательным опорным напряжением ( $-U_{он} \pm U_1$ ). С выходов сумматора обратной связи 4 алгебраические суммы напряжений подводятся к последовательной цепи из измерительных емкостей 5 и 6.



**Рис. 3. Электрическая схема микросистемного ДУС:**

- 1 и 2 - положительный и отрицательный источники опорных напряжений;  
 3 - схема переключения полярностей источников опорных напряжений; 4 - сумматор напряжений;  
 5, 6 - дифференциальные измерительные емкости; 7, 8 - силовые электроды; 9 - первый операционный усилитель; 10 - первый синхронный детектор; 11 - второй синхронный детектор; 12 - второй операционный усилитель; 13 - второй фильтр нижних частот; 14 - третий синхронный детектор;  
 15 - генератор синхронизирующих импульсов; 16 - первый фильтр нижних частот;  
 17 - четвертый синхронный детектор

Преобразование амплитудно-модулированного сигнала после первого операционного усилителя 9 осуществляется с помощью логотрической схемы, состоящей из первого 10 и второго 11 синхронных детекторов и первого фильтра нижних частот 14, где амплитудно-модулированное напряжение преобразуется в изменение постоянного напряжения. Демодуляция и фильтрация от несущей частоты в устройстве является двухполупериодной, что способствует сглаживанию.

Рассмотрим работу электрической схемы по диаграммам, приведенным на рис. 4. Пусть в течении цикла кориолисова сила изменяется по знакопеременной кривой, например, синусоиде. Учитывая, что синхронные детекторы входных сигналов не инвертируют, а только запоминают выбранные значения до конца цикла. Соответственно для кориолисовой силы на выходах первого и второго детекторов имеют место равные по абсолютной величине сигналы, но с противоположными знаками. Поступив на входы дифференциального фильтра нижних частот *1б* эти сигналы складываются.

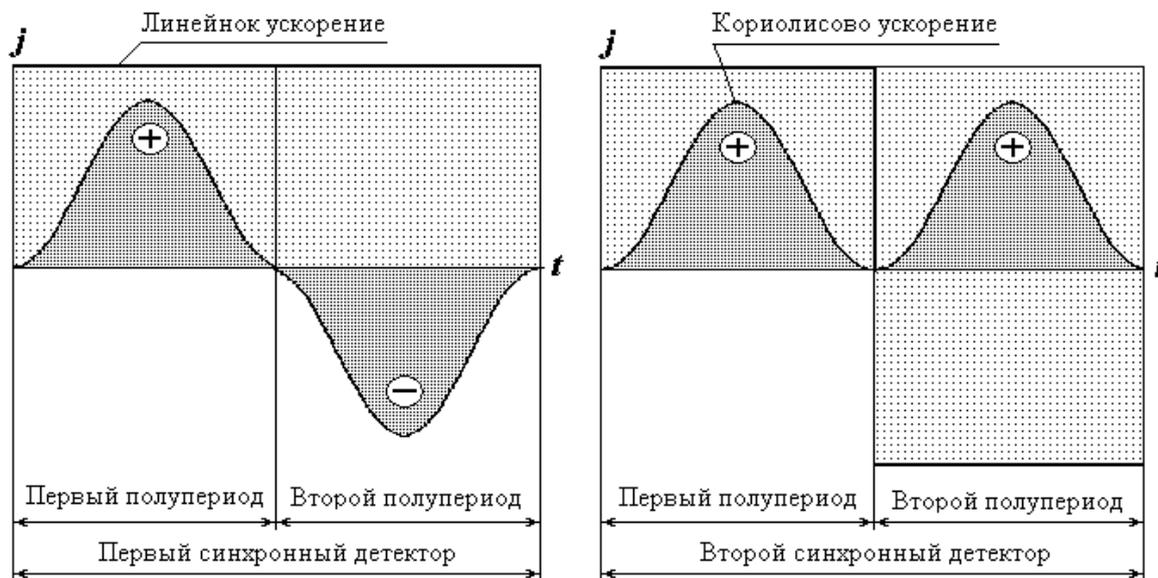


Рис. 4. Диаграмма сигналов на выходах синхронных детекторов

Таким образом, первый фильтр нижних частот *1б* выдает на выходе сигнал, пропорциональный величине перемещения подвижного электрода измерительных емкостей под действием кориолисовых сил:

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{оп}} K \frac{y}{h}, \quad (3)$$

где  $K$  - коэффициент передачи первого фильтра нижних частот;  $y$  - измеряемое перемещение;  $h$  - начальный зазор между подвижным и неподвижными электродами измерительных емкостей.

Особый случай – сигнал от линейного ускорения, действующего по той же оси. Для линейного ускорения на выходах первого и второго детекторов имеют место одинаковые сигналы по величине и знаку. Соответственно эти сигналы дифференциальным фильтром нижних частот *1б* вычитаются.

С целью получения электрического сигнала, пропорционального линейному ускорению, выходной сигнал после второго синхронного детектора *11* инвертируется вторым операционным усилителем *12*. Соответственно на входах второго фильтра нижних частот *13* присутствуют сигналы по линейному ускорению, равные по величине и противоположные по знаку, а сигналы по кориолисовому ускорению – с одинаковыми знаками. При этом первые складываются, а вторые вычитаются. Таким образом, на выходе второго фильтра нижних частот *13* осуществляется измерение сигнала по линейному ускорению.

Далее сигнал с выхода фильтра нижних частот *13* поступает через третий синхронный детектор *14* на резистивные линеаризирующие сумматоры  $R_1 - R_2 - R_3$  и  $R_4 - R_5 - R_6$  и далее на силовые электроды *7* и *8* на обработку действующего линейного ускорения. После силовой обработки доля перемещения, внесенная инерционной силой от линейного ускорения сводится к нулю, т.е. этот канал работает как обычный компенсационный акселерометр, а под-

вижный узел остается только под действием кориолисовой силы. Отсортированный сигнал, которой имеет место на выходе фильтра нижних частот 16, это есть сигнал об измеряемой угловой скорости  $\Omega$  по оси  $y$ . Канал измерения угловой скорости  $\Omega$  так же, как и канал по линейному ускорению, выполнен с силовой компенсацией. Для этой цели сигнал с выхода фильтра нижних частот 16 через четвертый фильтр нижних частот заведен в обратную связь на суммирующие линеаризаторы. Третий 14 и четвертый 17 синхронные детекторы предназначены для преобразования постоянных напряжений с выходов первого и второго фильтров нижних частот в переменные, что связано с исключением массопереноса между подвижным и неподвижными электродами.

Рассмотрим далее динамический процесс при измерении угловой скорости. Пусть по оси  $x$  подвижный узел приведен в принудительные колебания с помощью электростатического автогенератора, а по оси  $z$  действует две силы: кориолисова и ньютонова. Параллельно действию сил от кориолисова и линейного ускорений возможно действие шумовой помехи, приводящей к уходам нулевого уровня. Если принять, что в течении одного периода измерений шумовая помеха является постоянной, то по каналу измерения кориолисова ускорения она так же, как и сигнал от линейного ускорения, будет вычитаться. При измерении же линейного ускорения вычитание шумовой помехи не имеет места. Поэтому рассмотренное устройство желательно применять только для измерения угловых скоростей, а канал по линейному ускорению использовать только как корректирующий.

С целью определения математической модели ЧЭ микросистемного ДУС с допущением одной степени свободы подвижного узла, запишем уравнения Лагранжа для оси  $z$  в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} - \frac{\partial T}{\partial z} = Q_z, \quad (4)$$

где  $T$  - кинетическая энергия рассматриваемой системы;  $Q_z$  - проекции обобщенных сил по соответствующим направлениям.

Величину кинетической энергии для данной динамической системы можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{m\dot{z}^2}{2}. \quad (5)$$

В развернутом виде обобщенные силы запишутся:

$$Q_z = (F_k + mj + mj_{ш}) - k_z z - k_{dz} \dot{z}, \quad (6)$$

где  $j_{ш}$  - шумовая составляющая ускорения;  $k_z$  - жесткость упругого подвеса по оси чувствительности;  $k_{dz}$  - абсолютный коэффициент демпфирования.

Подставляя (3) и (4) в уравнений (2), получим:

$$m\ddot{z} + k_{dz}\dot{z} + k_z z = 2m\omega_b \delta\Omega + mj + mj_{ш}. \quad (7)$$

Учитывая предыдущие соотношения, а также независимость декартовых координат, принятых в уравнениях Лагранжа (2) за обобщенные, система уравнений (6) к операторной форме запишется:

$$(ms^2 + k_{dz}s + k_z)z = 2m\Omega v_x + mj + mj_{ш} / \quad (8)$$

В соответствии с уравнением (7) можно записать передаточные функции подвижного узла по угловой скорости в виде:

$$W_{\text{кор}}(s) = \frac{K_{\text{кор}}}{ms^2 + k_{dz}s + k_z}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{кор}} = 2m\delta\omega_e$  - коэффициент передачи чувствительного элемента по каналу угловой скорости;  $\omega_e = \sqrt{k_x/m}$  - переносная частота колебаний, задаваемая приводом.

С целью повышения точности измерений в замкнутом контуре регулирования по каналу угловой скорости возможно применение типовых корректирующих устройств, например, ПИД-регуляторов.

### Выводы

1. Разработана методика разделения двух информационных сигналов для физических величин, действующих по одной оси. При этом для одной из этих величин сигнал должен быть знакопеременным, а для второй постоянным.

2. Разработана методика корректирования погрешностей от влияния линейного и шумового ускорений при измерении угловой скорости с помощью микросистемного ДУС.

### Библиографический список

1. Северов, Л.А. «Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития.» / Л.А. Северов [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41. №1 2. С. 57–73.
2. Былинкин С.Ф., Вавилов В.Д., Миронов С.Г. Микромеханический гироскоп, Патент РФ №2209394, 7G01C 19/56, Бюл. №21, 27.07.2003.

*Дата поступления  
в редакцию 22.04.2011*

**V.D. Vavilov**

### **DIVISION SIGNAL SEVERAL PHYSICAL VALUES, ACTING ON ONE CHANNEL**

The material of the development microsystems DUS happen to In article as detector element in which is used vibrating plate from crystalline flint under-hung on double-sided spring up. Particularity of the development is that by means of two alike synchronous detectors and differential filter of the lower frequencies osuschestvlyaetsya. division signal two physical values, acting on one channel

*Key words:* vibrating plate, microsystems DUS, crystalline silicon, filter of the lower frequencies, springy element, synchronous detector.