

УДК 681.2

Унифицированные частотные преобразователи в акселерометрии

В.Е. Мельников

Аннотация: Рассмотрены вопросы повышения точности маятниковых акселерометров разомкнутой структуры при использовании в их составе унифицированных частотных преобразователей смещения маятника в поле инерционных сил. В сочетании с частотным выходным сигналом такие акселерометры имеют перспективу применения в среднем точностном диапазоне.

Ключевые слова: акселерометр маятниковый; кварцевый резонатор; частотный преобразователь; частото задающий элемент; автогенератор; погрешность

В настоящее время среди акселерометров высокого и среднего класса точности наибольшее распространение получили маятниковые компенсационные акселерометры с чувствительным элементом (ЧЭ) на упругом подвесе, ёмкостным или фотоэлектрическим съём сигнала и магнитоэлектрической обратной связью. Функционально необходимые механические узлы таких акселерометров выполняют преимущественно из кремния или из кварцевого стекла.

Акселерометры разомкнутой структуры в этой точностной нише практически не находят себе места из-за чрезвычайно высоких требований к стабильности параметров звеньев структуры, напрямую влияющих на выходные характеристики:

$$\frac{dK_A}{K_A} = \sum_{i=1}^n \frac{dK_i}{K_i}.$$

То есть, относительная погрешность $\frac{dK_A}{K_A}$ коэффициента передачи K_A акселерометра равна алгебраической сумме относительных погрешностей $\frac{dK_i}{K_i}$ составляющих звеньев K_i . Видно, что требования к стабильности коэффициентов передачи звеньев существенно выше требований к акселерометру в целом. Найти и реализовать такие звенья, например, датчики смещения ЧЭ не просто.

Требования к аналогичному узлу компенсационного акселерометра существенно ниже [1]:

$$\frac{dK_A}{K_A} = \sum_{j=1}^m \frac{dK_j}{K_j} + \frac{1}{1+K_{\Pi}K_{Oc}} \frac{dK_{\Pi}}{K_{\Pi}} - \frac{K_{\Pi}K_{Oc}}{1+K_{\Pi}K_{Oc}} \frac{dK_{Oc}}{K_{Oc}}.$$

Здесь K_j - коэффициенты передачи звеньев, не охваченных главной отрицательной обратной связью (ГООС); - K_{Π} совокупный коэффициент передачи прямой цепи; - K_{Oc} коэффициент передачи цепи обратной связи; - $K_{\Pi}K_{Oc}=K_k$ контурный коэффициент, который в компенсационных акселерометрах должен быть значительно больше единицы. Тогда видно, насколько требования к стабильности характеристик того же датчика смещения маятника в компенсационном акселерометре могут быть «прослаблены».

Вместе с тем акселерометры разомкнутой структуры привлекают своей простотой, надежностью, массогабаритными и энергетическими показателями.

В работе показано, что в некоторых случаях акселерометры разомкнутой структуры могут составить конкуренцию компенсационным акселерометрам и быть востребованными. В частности, акселерометры с частотным выходным сигналом и с управляемым кварцевым автогенератором в качестве датчика смещения маятника акселерометра [1,2]. На рис.1 представлена блок – схема такого акселерометра.

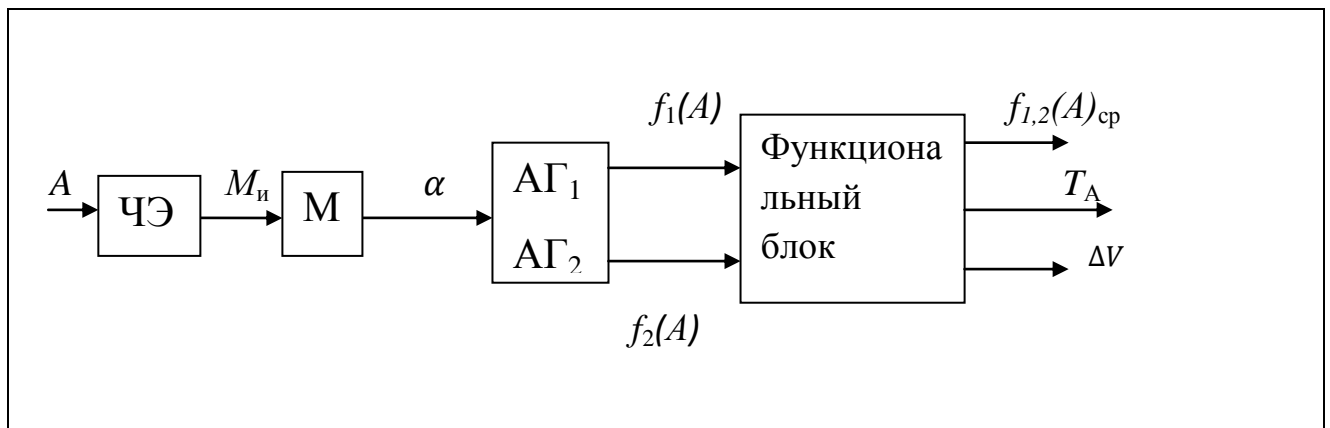


Рис.1 Блок-схема акселерометра разомкнутой структуры.

A – измеряемое ускорение; ЧЭ – чувствительный элемент; $M_{и}$ – инерционный момент; M – маятник; α - угол отклонения маятника в поле инерционных сил; $АГ_1$, $АГ_2$ – автогенераторы, один или два - для дифференциальной схемы съема сигнала об угловом смещении маятника; $f_1(A)$, $f_2(A)$ – частоты автогенераторов; функциональный блок, формирующий выходные сигналы акселерометра: $f_{1,2}(A)_{cp}$ – измеренная средняя разность частот автогенераторов, T_A – измеренный период разностной частоты автогенераторов, ΔV - приращение скорости за интервал времени счета.

ЧЭ преобразует ускорение в инерционный момент $M_{и}=mA_{и}$, приложенный к маятнику, представляющего собой звено второго порядка с передаточной функцией

$$W_M(s) = \frac{1}{J_ms^2 + K_d s + C_m};$$

угловое смещение α маятника трансформируется в смещение

управляемого элемента автогенератора (АГ), на выходе которого реализуются автоколебания на частоте механического резонанса частотоподающих элементов $f_1(A)$ и $f_2(A)$ в случае недифференциального АГ, и далее в функциональном блоке в необходимую по условиям применения информацию.

Частотная форма представления информации имеет определенные преимущества перед аналоговыми (амплитудными) сигналами. В том числе, по соображениям помехозащищенности, удобства преобразования частоты в цифровой эквивалент и сопряжения с ЦВМ. Применительно же к акселерометрам следует отметить уникальную возможность получения интеграла от входной величины практически без нарастания погрешностей во времени.

Среди известных вариантов частотных преобразователей выделим те, которые позволяют получить наибольшую стабильность, в основе работы которых естественным является автоколебательный режим. В первую очередь, это относится к кварцевым пьезокристаллическим резонаторам, которые нашли широчайшее применение в качестве эталонов частоты и времени, благодаря своим уникальным свойствам. В частности, высокой добротностью порядка (10^3-10^4), обеспечивающей устойчивость собственных частот к дестабилизирующим внутренним и внешним факторам. Например, относительный уход частоты даже негерметизированных резонаторов АТ и ВТ среза на частотах 5-20 МГц в среднем не превышает $(1-5)10^{-5}$ в год [4].

Кварцевые резонаторы в качестве измерителей механических величин

Известно применение кварцевых резонаторов в качестве преобразователей механических величин (сил, давлений, деформаций и др.) в изменение частоты автоколебаний [3,4]. Условия работы резонаторов в этом случае существенно хуже, так как требуется непосредственное воздействие на кристалл, что значительно понижает добротность, следовательно, стабильность характеристик. Такое применение кварцевых кристаллов, в частности в весоизмерительной технике позволяет снизить приведенную относительную погрешность до уровня $10^{-3}-10^{-4}$.

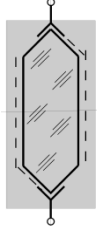
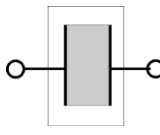
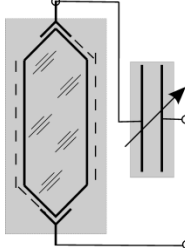
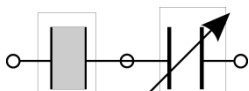
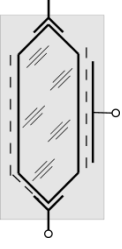
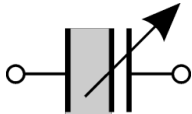
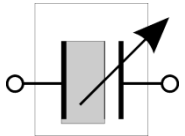
Нас интересуют возможности достижения более высокой точности преобразования, которую можно достичь, обеспечив управление частотой автоколебаний кварцевого резонатора, сохранив для него такие же условия работы, что и в кварцевых эталонах частоты. Это становится реальным, если управление частотой автоколебаний осуществлять с помощью присоединенной электрической ёмкости, параметры которой меняются под воздействием инерционных сил. В этом случае частотоподающим элементом является система, содержащая кристалл вместе с присоединенной ёмкостью, параметры которой должны соответствовать характеристикам резонатора и быть конструктивно совместимыми с ним.

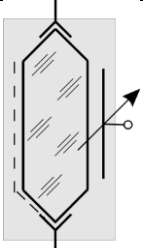
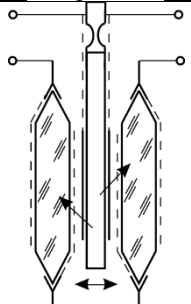
В Таблице представлены варианты компоновки кварцевых частотоподающих элементов, представляющих собой комбинацию кварцевых резонаторов и присоединяемой ёмкости, управляемой измеряемым ускорением. На их основе могут быть созданы как

базовые узлы акселерометров, так и датчиков других параметров (усилий, давлений, деформаций, смещений и др.).

Таблица

Узлы кварцевых частотозадающих элементов

№п/п	Краткая характеристика	Кинематика	Схема включения	Примечание
	2	3	4	5
1	Кварцевый резонатор, кристаллодержатель, металлизированные грани, точками подсоединения в контур автогенератора.			Частотозадающий элемент, эталон частоты
2	Узлы кварцевого резонатора по п.1 и присоединенной ёмкости .			Кварцевый резонатор и присоединённая ёмкость выполнены как конструктивно независимые узлы
3	Кварцевый резонатор по п.1. с присоединенным электродом			Токоотвод от одного кристаллодержателя. Последовательное соединение ёмкостей: заполненной диэлектриком и с воздушным зазором.
4	Кварцевый резонатор по п.1. с присоединенным электродом			Кварцевый резонатор без металлизации грани, прилегающей к электроду. Ёмкость, частично

			заполненная диэлектриком
5	Дифференциальный частото задающий узел		Вариант по п.п. 2-4, дифференциальное исполнение

В таблице представлены варианты сочетаний кварцевых резонаторов с управляющими ёмкостными элементами. За базовый взят вариант поз.1. Это классический представитель кварцевого резонатора, применяющегося в кварцевых эталонах частоты. Выполнен в данном случае в виде диска с фаской на цилиндрической образующей диска, в котором реализуются сдвиговые колебания по толщине. Диск имеет металлизацию на торцах, образующих обкладки конденсатора, к которым обеспечены токоподводы через кристаллодержатели.

На поз.2-4 представлены некоторые варианты сочетаний частото задающего элемента кварцевых автогенераторов, сочетающих кварцевый резонатор и управляющие ёмкости. В некоторых случаях кварцевый резонатор не претерпевает изменений (поз.2,3) и не отличается от поз.1. В варианте поз.4 Резонатор не имеет металлизации на одной из граней, но может не иметь металлизации и на второй грани (торце). Тогда такой «чистый» кристалл оказывается размещенным в зазоре конденсатора, частично заполненном диэлектриком. Степень заполнения диэлектриком (кварцем) меняется в процессе измерения. Такой вариант интересен тем, что кристалл кварца не «портится» посторонними включениями и может обладать улучшенными характеристиками.

Поз.5 дает представление о применении частото задающих элементов в дифференциальном исполнении.

Для всех вариантов используются типовые схемы возбуждения, к которым частото задающие элементы подсоединяются выводными концами. Конструктивные и технологические особенности здесь подробно не обсуждаются кроме одного условия. Для получения наилучших точностных показателей частото задающий элемент следует выполнять в виде функционально завершенного, монолитного узла, способного к самостоятельному применению в различных приложениях.

Специфика частотного сигнала

В соответствии с рис.1 выходной сигнал акселерометра может быть представлен в форме гармоничной функции $U_{\text{вых}} = U_m \sin(\omega t - \varphi_0)$, где $(\omega t - \varphi_0) = \varphi(t)$ – фаза гармонической величины, – непрерывная функция времени. Соответственно, мгновенная производная фазы по времени является круговой частотой $\frac{d\varphi}{dt} = \omega + \frac{d\varphi}{d\omega} \frac{d\omega}{dt}$. И фаза, и круговая частота, представленные в такой форме являются аналоговыми величинами, непрерывными функциями времени. Их легко трансформировать в дискретную форму в виде последовательности импульсов с частотой следования соответствующих моментам пересечения гармоничной функцией нулевого уровня.

- Измерение частоты

Процесс измерения выходной частоты акселерометра $f(A) = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T_A}$, по количеству дискретных импульсов $(N \pm 1)$ в единицу времени сопряжен с определенными трудностями. Это противоречия в требованиях к точности измерения и к быстродействию.

Действительно, частота определяется количеством периодов измеряемого процесса (числом переходов через «0») в единицу времени в соответствии с соотношением:

$$f(A) = \frac{N \pm 1}{T_{\text{изм}}} = f(A)_{\text{изм}} \left(1 \pm \frac{\Delta f}{f(A)_{\text{изм}}}\right).$$

Здесь $f(A)_{\text{изм}} = \frac{N}{T_{\text{изм}}} = f(A)_{\text{ср}}$ – измеренная средняя частота; $T_{\text{изм}}$ время счета N импульсов; $\frac{\Delta f}{f(A)_{\text{изм}}} = \pm \frac{1}{N}$ – относительная погрешность измерения средней частоты.

Очевидно, что погрешность системы регистрации не должна быть доминирующей в формировании погрешности акселерометра. Так как предельная частота, соответствующая верхнему пределу измерения ускорения ограничена: $f \leq f(A)_{\text{max}}$, то при $T_{\text{изм}} = 1\text{с}$ количество за фиксированных импульсов N численно будет равно $f(A)_{\text{max}}$. Значит, относительная погрешность будет равна N^{-1} . Но мало кого устроит время измерения – 1с. Если необходимо повысить быстродействие до 0.01с, то погрешность соответственно возрастет до $100N^{-1}$.

- Измерение периода

Быстродействие и точность можно обеспечить, если контролировать длительность одного или нескольких – n периодов измеряемого гармонического сигнала. Время измерения $T_{\text{изм}}$ количество импульсов эталонной частоты, уместившихся в этот интервал определяются соотношением: $T_{\text{изм}} = nT_A = (N \pm 1)t_{\text{э}}$, количество зафиксированных импульсов эталонной частоты $(N \pm 1)$. Видно, что относительная погрешность периода определится как $\frac{\Delta T}{T_A} = \pm \frac{1}{N}$.

Отличие от измерения частоты состоит в том, что частота эталонного генератора $f_{\text{э}}$ может быть значительно больше 10^7 Гц, тогда даже при времени счета $T_A = 0.01\text{с}$, будет

зафиксировано $N=10^5$ периодов, а относительная погрешность измерения периода измеряемой частоты составит 10^{-5} . Измеряемая частота определится как обратная величина периода - $1/T_A$

- Режим интегрирования

Так как фаза φ гармонического сигнала является интегралом по времени от круговой частоты: $\varphi = \varphi_0 + \int_0^t \omega(A)dt$, а круговая частота пропорциональна измеряемому ускорению, то приращение фазы за интервал времени от 0 до t соответствует приращению скорости за этот отрезок времени. Следовательно, в процедуре измерения средней частоты присутствует процедура определения приращения скорости за фиксированный отрезок времени. Каждый пришедший импульс свидетельствует о приращении скорости на некоторую величину - ΔV_0 , которая является своеобразным квантом, минимальной единицей кода скорости. Она известна для каждого частотного акселерометра с коэффициентом преобразования: $K_A = \frac{f(A)_{max}}{A_{max}}$. Тогда определяется и «цена» каждого импульса, периода частоты, выраженная в единицах скорости:

$$\Delta V_0 = \frac{1}{K_A} = \frac{A_{max}}{f(A)_{max}}.$$

Так, если взять реальные цифры: $A_{max}=10 \text{ м/с}^2$, $f(A)_{max}=10^4 \text{ 1/с}$, то $\Delta V_0=10^{-3} \text{ м/с}$. То есть максимальная абсолютная погрешность в определении приращение скорости не превосходит величины ΔV_0 на интервале между соседними импульсами. С приходом каждого очередного импульса неопределенность пропадает.

То есть, акселерометр с частотным выходным сигналом является практически идеальным интегратором, датчиком скорости. По крайней мере, сам интегратор выгодно отличается от традиционных аналоговых интеграторов. В таком случае основным источником погрешностей акселерометра является частотоподающий узел.

Узел акселерометра

Основными узлами, определяющими характеристики рассматриваемого акселерометра, является маятник и преобразователь его углового смещения в промежуточный параметр – изменение ёмкости, управляющей параметрами частотоподающего элемента автогенератора. От того, как будет реализован этот комбинированный узел (маятник – частотоподающий элемент), будет зависеть перспектива создания и область применения акселерометра. Учитывая, что основным узлом частотоподающего элемента является кварцевый резонатор, то и маятник целесообразно выполнять из кварцевого стекла (аморфного кварца). Чтобы минимизировать или вовсе исключить дестабилизирующее влияние соединительных узлов, целесообразно соединение кварцевых элементов осуществлять сваркой [1,2], решив при этом задачу конструктивного сочетания аморфного и кристаллического кварца..

Тогда удастся объединить в конструктивно законченный монолитный блок основные функционально необходимые элементы: ЧЭ, маятник, управляемые емкости, кристаллодержатели кварцевых резонаторов.

На рис.2,3,4 представлены примеры реализации таких монолитных узлов. На рис.2 – модуль акселерометра разомкнутой структуры. На рис.3, 4 – изображены соответственно модуль компенсационного акселерометра и конфигурация его маятника с дополнительными по отношению к маятнику по рис.2 элементами.

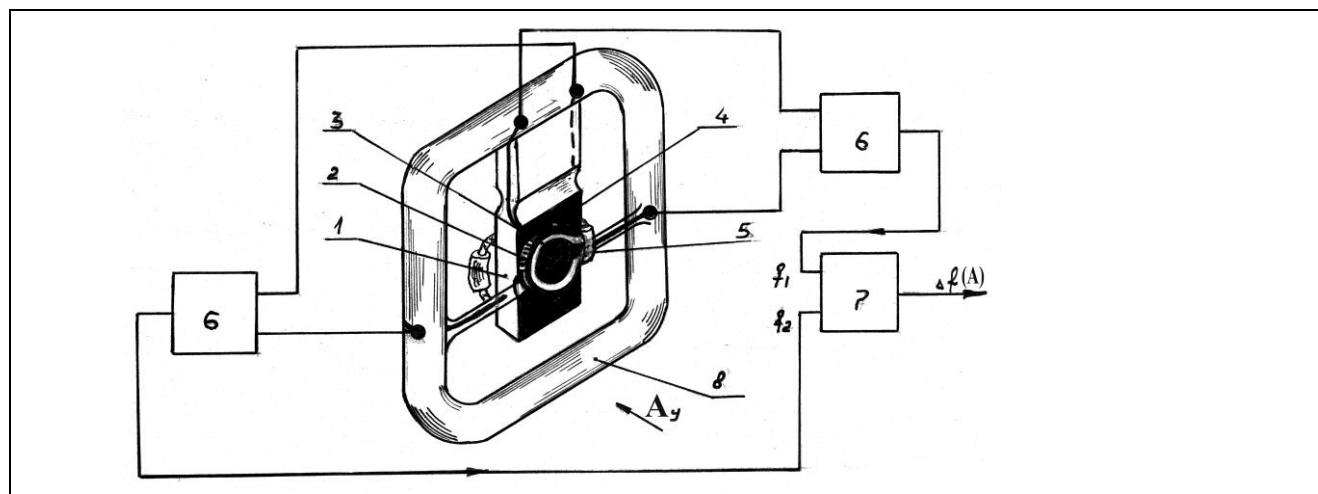


Рис. 2 Модуль акселерометра разомкнутой структуры

1 – кварцевый маятниковый элемент; 2 – кварцевые резонаторы; 3 – упругий «шарнир», подвес маятника; 4 и 5 – подвижные и неподвижные электроды частото задающего элемента, между которыми размещен кварцевый резонатор 2; 6 – схемы возбуждения, автогенераторы; 7 – устройство формирующее разность частот $\Delta f_A = f_1 - f_2$ автогенераторов 6; 8 – кварцевое основание; A_y – измеряемое ускорение.

Взаимное расположение элементов 2, 4, 5 на рис.2 соответствуют данным Таблицы. В данном случае реализован дифференциальный вариант, в котором на гранях маятника имеются электроды 4,5 с зазором расположенные относительно кварцевых резонаторов 2 (второй не виден), закрепленных в кристаллодержателях. При появлении ускорения A_y маятник смещается, меняя зазоры и тем самым частоты автогенераторов 6. Разность частот автогенераторов пропорциональна измеряемому ускорению A_y . В такой реализации при использовании кварцевых резонаторов термостабильных срезов могут быть получены характеристики на уровне акселерометров среднего класса точности.

Рис.3 относится к компенсационному акселерометру, в котором использована такая же идеология построения частото задающего монолитного блока с определенными изменениями подвеса маятника с целью возможно большего снижения угловой жесткости подвеса. Добавлены дополнительные элементы, с помощью которых организуется контур отрицательной обратной связи, формирующей «электрическую жесткость» и момент обратной связи, уравнивающий инерционный момент.

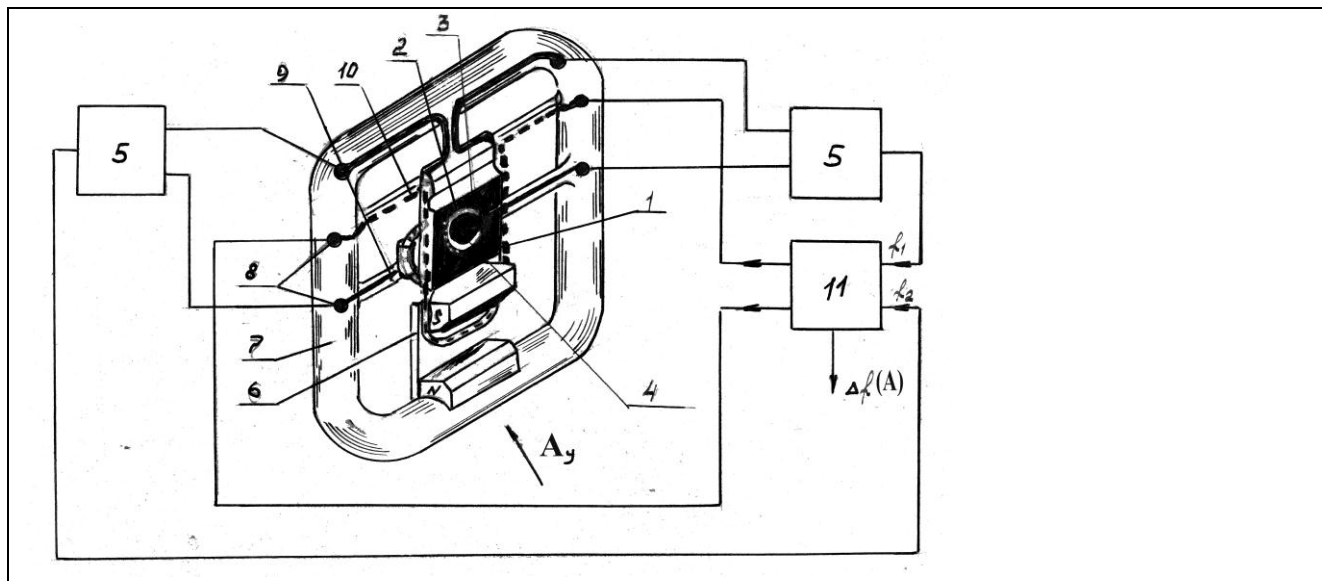


Рис.3 Модуль компенсационного акселерометра

1 – маятник, пластина на «упругом шарнире»; 2 – кварцевые резонаторы; 3 – кристаллодержатели кварцевых резонаторов; 4 – тонкопленочные электроды возбуждения кварцевых резонаторов; 5 – автогенераторы; 6 – магнитная система; 7 – кварцевое основание; 8 – токоотводы; 9 – кристаллодержатель; 10 – токовая цепь контура обратной связи; 11 – схема формирования тока обратной связи и разности частоты автогенераторов.

Особенности конфигурации маятника компенсационного акселерометра иллюстрируются рис.4.

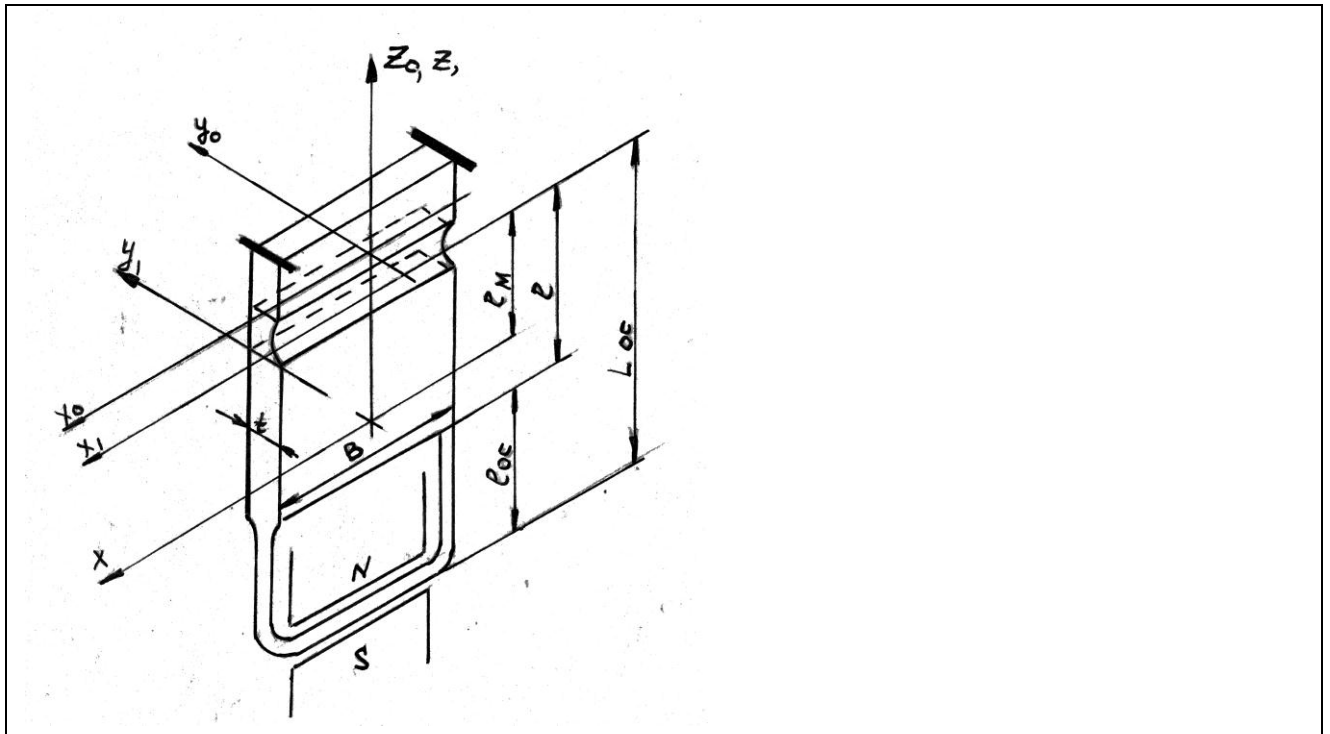


Рис. 4 Маятник компенсационного акселерометра

Маятник – пластина шириной B толщиной t , длиной l с подвесом типа «упругий шарнир»; токнесущий контур шириной B , длиной l_{oc} – нижняя часть которого – планка размещена в зазоре постоянного магнита (дополнительный элемент в сравнении с рис.2); L_{oc} – расстояние токнесущей планки до оси вращения маятника; l_m – расстояние от оси вращения до центра тяжести маятника; X_0, Y_0, Z_0 – система координат, связанная с корпусом; X, Y, Z – система координат, связанная с центром тяжести; X_1 ось вращения маятника; Y – соответственно ось чувствительности, проходящая через центр тяжести и параллельная ей ось чувствительности маятника.

На рис.5 представлена блок схема компенсационного акселерометра, соответствующая рис.3 и частично рис.1, имея с ним ряд аналогичных элементов. В частности, однотипными являются элементы до выходов автогенераторов ($АГ_1$ и $АГ_2$).

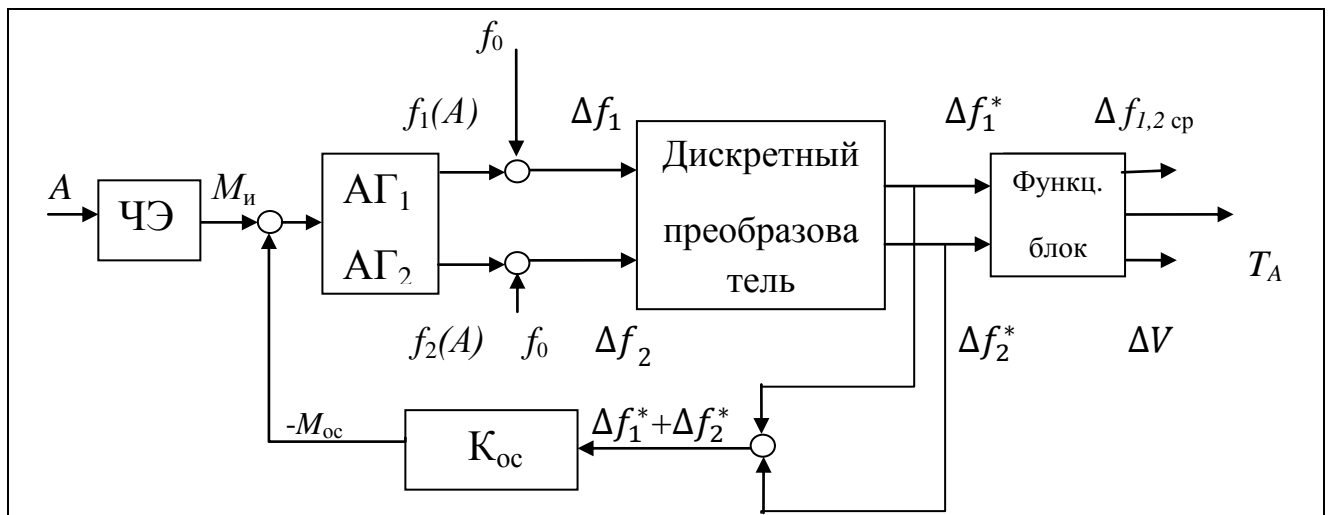


Рис.5 Блок схема компенсационного акселерометра

$f_1(A)$ и $f_2(A)$ – частоты двух автогенераторов, функционально связанные с измеряемым ускорением A ; f_0 – начальные частоты автоколебаний при отсутствии ускорения $A=0$; $\Delta f_1, \Delta f_2$ – приращения частот автоколебаний при появлении ускорений; дискретный преобразователь преобразует аналоговые разности частот $\Delta f_1, \Delta f_2$ в дискретную последовательность $\Delta f_1^*, \Delta f_2^*$ разнополярных импульсов эталонной амплитуды и длительности с частотой следования, соответственно, Δf_1 и Δf_2 ; функциональный блок формирует выходную информацию, аналогично структуре выходных сигналов по рис.1 (среднюю разность частот $\Delta f_{1,2}$ ср пропорциональную среднему ускорению, период разностной частоты T_A и приращение скорости ΔV за период счета или скорость объекта в целом (за время полета); $K_{ос}$ – коэффициент главной отрицательной обратной связи (ОС) магнитоэлектрического типа.

Особенностью акселерометра с частотным преобразователем в прямой цепи компенсационного акселерометра состоит в том, что токовая цепь контура ОС запитывается алгебраической суммой разнополярных напряжений, каждое из которых пропорционально соответственно Δf_1^* и Δf_2^* . Их частота значительно выше собственной частоты маятникового элемента акселерометра, который реагирует только на постоянную составляющую разностной частоты, соответствующую и по величине и по знаку измеряемому ускорению. По сути маятник является в такой реализации практически идеальным низкочастотным фильтром.

Таким образом, унифицированные частотные преобразователи имеют перспективы не только в акселерометрии. Такие монолитные преобразователи, выполненные в виде функционально и конструктивно законченных модулей, могут быть аттестованы по выходным показателям как готовое изделие многоцелевого использования. В частности, в весоизмерительной технике, в измерителях деформаций, смещений, сил, давлений и др. Современные технологии дают возможность значительного снижения массогабаритных характеристик и расширить область технических приложений.

Библиографический список

1. Мельников В.Е. Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. – М.: Машиностроение, 1984 – 159 с., ил. – (Б-ка приборостроителя).
2. Сергеев В.Ф. Основы расчета и проектирования навигационных акселерометров на базе комплексного использования кристаллического и аморфного кварца: Учебное пособие. – М.: МАИ, 1988. – 48 с.: ил.
3. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. «Энергия» Ленинградское отделение. 1969.
4. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. – 1989. – 272 с.: ил.

Мельников Валерий Ефимович; профессор Московского авиационного института
(национального исследовательского университета), д.т.н.;
тел.: 495 301 8225, e-mail: ve_melnic@mail.ru