

УДК 681.2

Особенности маятниковых компенсационных акселерометров с интегрирующими звеньями в прямой цепи

Е.Н.Мельникова, В.Е.Мельников

Аннотация: Рассмотрены возможности повышения точности компенсационных акселерометров, введением в контур прямой цепи интегрирующих звеньев: интегрирующего усилителя или за счет придания интегрирующих свойств первому звену, маятнику.

Ключевые слова: маятниковый компенсационный акселерометр; интегрирующий контур; статизм; астатизм

Возможным способом повышения статической точности компенсационных акселерометров является введение интегрирующих звеньев в прямую цепь замкнутого контура. Такие системы называют *астатическими*.

Порядок астатизма ν определяется количеством интегрирующих звеньев. Если $\nu=0$, имеет место обычная классическая схема «статического» компенсационного акселерометра. Если $\nu=1$, это соответствует системе с астатизмом первого порядка. В такой системе отсутствует статическая ошибка от постоянного задающего воздействия и постоянных возмущений. Но надо помнить, что для астатизма относительно возмущения интегрирующее звено должно быть введено до точки приложения возмущения.

С другой стороны, интегрирующее звено существенно влияет на динамику системы. Например, уменьшается частота среза разомкнутой системы, а переходный процесс становится более длительным. Кроме того, изменяются запасы устойчивости. Они могут, как уменьшаться, так и увеличиваться. Поэтому в большинстве случаев нужны мероприятия по коррекции структуры.

Введение в систему двух интегрирующих звеньев ($\nu=2$) придает ей астатизм второго порядка. Тогда уже отсутствуют установившиеся ошибки от полезного воздействия и возмущений, постоянных по величине и изменяющихся с постоянной скоростью.

В целом, увеличение числа интегрирующих звеньев в системе приводит к нулевым значениям нескольких коэффициентов ошибок, но при этом усложняется обеспечение устойчивости системы.

Рассмотрим теперь конкретные возможности повышения точности акселерометра в установившихся режимах за счет введения в прямую цепь интегрирующего звена. Здесь возможны варианты. Интегрирующее звено может быть организовано в усилителе или же сам чувствительный элемент при определенных условиях приобретает интегрирующие свойства.

За основу примем структурную схему маятникового компенсационного акселерометра, представленную на рис.1.

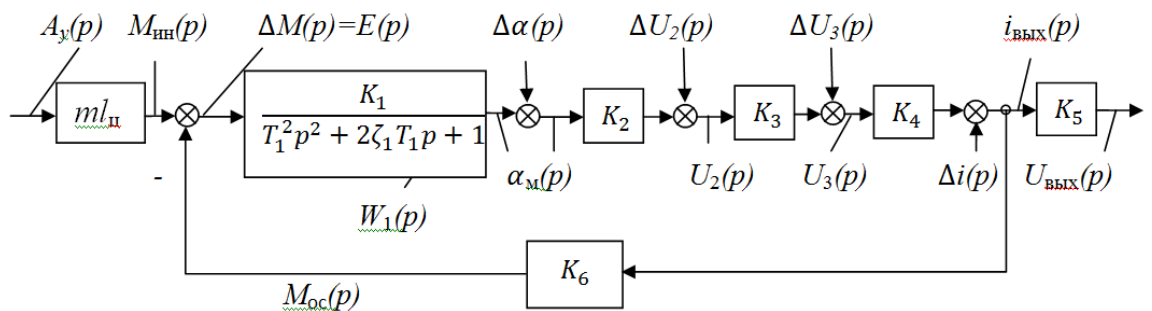


Рис. 1. Структурная схема маятникового компенсационного акселерометра с учетом возмущений

Здесь представлены основные функционально необходимые элементы: маятник с ПФ $W_1(p) = \frac{K_1}{(T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1)}$; коэффициенты передачи K_2 датчика угла отклонения маятника, коэффициент усиления усилителя K_3 или K_3' коэффициент передачи интегрирующего усилителя; проводимость K_4 цепи нагрузки усилителя; резистор нагрузки K_5 ; передаточный коэффициент обратной связи $K_{ос}$. Обозначены точки ввода возмущений в соответствующие точки структуры, соответствующие неустойчивости предшествующего звена.

Интегрирующее звено в усилителе.

Пусть ПФ усилителя имеет вид:

$$W_3'(p) = \frac{U_3(p)}{U_2(p)} = \frac{K_3'}{p}, \tag{1}$$

где K_3' [1/с] – коэффициент передачи интегрирующего усилителя.

С учетом этого для схемы на рис.1 запишем ПФ прямой цепи $W_n(p)$, разомкнутого $W_p(p)$ и замкнутого $W_3(p)$ контуров, а также акселерометра $W_{a_y}(p)$:

$$\left. \begin{aligned} W_n(p) &= W_1(p) K_2 \frac{K_3}{p} K_4 = \frac{K_n}{p(T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1)}; \\ W_p(p) &= W_n(p) K_{oc} = \frac{K_p}{p(T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1)}; \\ W_3(p) &= \frac{i_{\text{вых}}(p)}{M_{\text{ин}}(p)} = \frac{W_n(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{K_n}{K_p} \frac{1}{(a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1)}; \\ W_{a_y}(p) &= \frac{U_{\text{вых}}(p)}{A_y(p)} = m l_y R_n W_3(p); \\ a_0 &= \frac{T_1^2}{K_p}, a_1 = \frac{2\zeta_1 T_1}{K_p}, a_2 = \frac{1}{K_p}, a_3 = 1. \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь a_i – коэффициенты характеристического уравнения замкнутой системы – $[1 + W_p(p)] = 0$, а T_1, ζ_1 – постоянная времени и относительный коэффициент демпфирования первого звена прямой цепи.

Далее в соответствии со структурной схемой на рис.1 получим ПФ по каждому из возмущений:

$$\left. \begin{aligned} W_{\Delta\alpha, i_{\text{вых}}}(p) &= \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta\alpha(p)} = \frac{1}{W_1(p)} W_3(p) = \frac{1}{K_1 K_{oc}} W_7(p); \\ W_{\Delta U_2, i_{\text{вых}}}(p) &= \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta U_2(p)} = \frac{1}{K_2 W_1(p)} W_3(p) = \frac{1}{K_1 K_2 K_{oc}} W_7(p); \\ W_{\Delta U_3, i_{\text{вых}}}(p) &= \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{p}{K_2 K_3 W_1(p)} W_3(p) = \frac{p}{K_1 K_2 K_3 K_{oc}} W_7(p); \\ W_{\Delta i, i_{\text{вых}}}(p) &= \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta i(p)} = \frac{p}{K_2 K_3 K_4 W_1(p)} W_3(p) = \frac{p}{K_p} W_7(p); \\ W_7(p) &= \frac{T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1}. \end{aligned} \right\} (3)$$

Здесь $W_7(p)$ – общая для всех каналов передаточная функция, отражающая динамику этих каналов.

Можно провести сравнительный анализ статической и астатической систем, представив выражения для выходного тока, как функции нескольких воздействий, представленных в базовой структуре на рис.1.

Для статической системы ($v=0$) получим:

$$\begin{aligned} i_{\text{вых}}(p) &= \frac{m l_y K_n}{1 + K_p} \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1} A_y(p) + \frac{1}{K_1 K_{oc}} W_0(p) [\Delta\alpha(p) + \frac{1}{K_2} \Delta U_2(p) + \frac{1}{K_2 K_3} \Delta U_3(p) + \\ &+ \frac{1}{K_2 K_3 K_4} \Delta i(p)]; \end{aligned} \quad (4)$$

Для астатической системы ($\nu=1$) – с интегратором в усилителе согласно передаточным функциям (2), (3) получим:

$$i_{вых}(p) = \frac{ml_u K_n}{K_p} \frac{1}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1} A_y(p) + \frac{1}{K_1 K_{oc}} W_7(p) [\Delta\alpha(p) + \frac{1}{K_2} \Delta U_2(p) + \frac{p}{K_2 K_3} \Delta U_3(p) + \frac{p}{K_2 K_3 K_4} \Delta i(p)]; \quad (5)$$

Из последнего соотношения следует, что в статике при $p=0$ помехи $\Delta U_3, \Delta i$ (нестабильность параметров усилителя и резисторов в его выходной цепи) не проходят на выход замкнутого контура. То есть, система обладает астатизмом 1-го порядка по отношению к этим помехам. В то же время, по отношению к помехам $\Delta\alpha, \Delta U_2$ (уходы ЧЭ и датчика угла) система является статической, а коэффициенты их передачи на выход системы практически совпадают с коэффициентами передачи в предыдущем варианте статического акселерометра, описываемого соотношением (4).

При проектировании акселерометра всегда уделяется внимание рабочему углу отклонения маятника α_m , от величины и стабильности которого зависит ряд погрешностей. В частности, погрешности от перекрестных ускорений. Поэтому рассмотрим теперь угол α_m в качестве выходного сигнала и составим соответствующие передаточные функции от всех входных воздействий, представленных на рис.3.1, для двух вариантов структур: $\nu = 0$ и $\nu = 1$.

Для статического акселерометра ($\nu = 0$) несложно получить следующие передаточные функции с выходом α_m от ускорения и помех через общую ПФ $W_8(p)$:

$$\left. \begin{aligned} W_{A_y, \alpha_m}(p) &= \frac{\alpha_m(p)}{A_y(p)} = \frac{ml_u K_1}{1 + K_p} W_8(p); \\ W_{\Delta\alpha, \alpha_m}(p) &= \frac{\alpha_m(p)}{\Delta\alpha(p)} = \frac{1}{1 + K_p} W_8(p) \frac{K_1}{W_1(p)}; \\ W_{\Delta U_2, \alpha_m}(p) &= \frac{\alpha_m(p)}{\Delta U_2(p)} = \frac{K_1 K_3 K_4 K_{oc}}{1 + K_p} W_8(p) \approx \frac{1}{K_2} W_8(p); \\ W_{\Delta U_3, \alpha_m}(p) &= \frac{\alpha_m(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{K_1 K_4 K_{oc}}{1 + K_p} W_8(p) \approx \frac{1}{K_2 K_3} W_8(p); \\ W_{\Delta i, \alpha_m}(p) &= \frac{\alpha_m(p)}{\Delta i(p)} = \frac{K_1 K_{oc}}{1 + K_p} W_8(p) \approx \frac{1}{K_2 K_3 K_4} W_8(p). \end{aligned} \right\} (6)$$

$$W_8(p) = \frac{1}{T_a^2 p^2 + 2\zeta_a T_a p + 1}, \quad W_8(0) = 1, \quad K_p \gg 1.$$

Здесь ПФ $W_8(p)$ отражает общие динамические свойства по каждому из входных воздействий, кроме $\Delta\alpha(p)$. По этому каналу добавляется сомножитель в виде: $\frac{K_1}{W_1(p)} = (T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1)$. Постоянные T_a , ζ_a соответствуют формулам (4) для замкнутого контура акселерометра. С учетом (6) запишем общее выражение для $\alpha_m(p)$ как функции ряда воздействий: T_1^2

$$\alpha_m(p) = \frac{W_8(p)}{1+K_p} [ml_u K_1 A_y(p) + K_p \Delta\alpha(p) + K_1 K_3 K_4 K_{oc} \Delta U_2(p) + K_1 K_4 K_{oc} \Delta U_3(p) + K_1 K_{oc} \Delta i(p)]. \quad (7)$$

Для астатического акселерометра ($v=1$) с интегрирующим звеном в усилителе ПФ с выходом по углу α_m от тех же воздействий выразим через общую ПФ $W_9(p)$ в виде:

$$W_{A_y, \alpha_m}(p) = \frac{\alpha_m(p)}{A_y(p)} = \frac{ml_u K_1}{K_p} p W_9(p);$$

$$W_{\Delta\alpha, \alpha_m}(p) = \frac{\alpha_m(p)}{\Delta\alpha(p)} = \frac{1}{K_p} p W_9(p) \frac{K_1}{W_1(p)};$$

$$W_{\Delta U_2, \alpha_m}(p) = \frac{\alpha_m(p)}{\Delta U_2(p)} = \frac{K_1 K_3 K_4 K_{oc}}{K_p} W_9(p);$$

$$W_{\Delta U_3, \alpha_m}(p) = \frac{\alpha_m(p)}{\Delta U_3(p)} = \frac{K_1 K_4 K_{oc}}{K_p} p W_9(p); \quad (8)$$

$$W_{\Delta i, \alpha_m}(p) = \frac{\alpha_m(p)}{\Delta i(p)} = \frac{K_1 K_{oc}}{K_p} p W_9(p);$$

$$W_9(p) = \frac{1}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1}, W_9(0) = 1.$$

Здесь коэффициенты a_i в $W_9(p)$ соответствуют формулам (2). Используя (8), запишем выражение для угла α_m как функцию по всем воздействиям:

$$\alpha_m(p) = \frac{W_9(p)}{K_p} \left[ml_u K_1 p A_y(p) + \frac{p K_1}{W_1(p)} \Delta\alpha(p) + K_1 K_3 K_4 K_{oc} \Delta U_2(p) + K_1 K_4 K_{oc} p \Delta U_3(p) + K_1 K_{oc} p \Delta i(p) \right]. \quad (9)$$

В выражениях (7) и (9) отражены воздействия, влияющие на угол отклонения маятника. По ним можно провести расчеты этого узла, например, для определения

статической погрешности от перекрестных ускорений. Отметим также, что коэффициенты в (7), (9) при одинаковых воздействиях близки между собой, если $K_p \gg 1$. Согласно (9) имеет место астатизм по отношению к постоянным воздействиям: ускорению и помехам $\Delta\alpha, \Delta U_3$ и Δi .

В заключение выделим некоторые общие факторы, выявленные при анализе точности статического и астатического акселерометров и сформулируем выводы по целесообразности использования интегрирующего звена в цепи усилителя астатического акселерометра.

Во-первых, отметим, что анализ проводился для всех производных на рис.1 воздействий. При этом рассматривались следующие три типа выходных сигналов и обобщенные уравнения, характеризующие их зависимость от заданных воздействий для вариантов статической ($\nu=0$) и астатической ($\nu=1$) систем:

- ток $i_{\text{вых}}(p)$ на выходе замкнутого контура акселерометра, уравнения (4) для $\nu=0$ и (5) для $\nu=1$;

- рабочий угол $\alpha_m(p)$ отклонения маятника относительно нулевой точки на корпусе акселерометра, уравнения (3.36) для $\nu=0$ и (9) для $\nu=1$;

Наконец, согласно сравнительному анализу представленных соотношений, становится очевидным факт повышения точности в установившихся режимах, наблюдаемых в астатической системе по сравнению со статической. Введение интегрирующего звена в цепь усилителя, принадлежащего прямой цепи контура, приводит к следующим эффектам.

1. На выход замкнутого контура в цепь $i_{\text{вых}}$ не проходят помехи $\Delta U_3, \Delta i$, связанные с нестабильностью самого усилителя и активных сопротивлений в его выходной цепи. Система является астатической по отношению к этим помехам. В то же время ускорение и помехи $\Delta\alpha$ и ΔU_2 («уходы» ЧЭ и датчика угла) проходят на выход практически с теми же коэффициентами передачи, что и в статической системе, если $K_p \gg 1$. Следует отметить повышение порядка передаточных функций замкнутого контура по ускорению и помехам.
2. Если в качестве выхода рассматривается угол отклонения маятника α_m , то наблюдается астатизм с $\nu=1$ по отношению к измеряемому ускорению и помехам $\Delta\alpha, \Delta U_3, \Delta i$. Минимизация α_m важна для снижения погрешности акселерометра от перекрестных ускорений. Помеха ΔU_2 влияет на α_m почти также, как в статической системе.

3. Анализ точностных характеристик по методу коэффициентов ошибок показал, что статическая ошибка замкнутого контура равна нулю при наличии постоянных по времени ускорения и помех $\Delta U_3, \Delta i$.

Интегрирующее звено в чувствительном элементе

Передаточная функция и соответственно дифференциальное уравнение чувствительного элемента согласно (1) равны:

$$W_1(p) = \frac{\alpha_m(p)}{\Delta M(p)} = \frac{1}{J_m p^2 + K_0 p + C_c} = \frac{K_1}{T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1};$$

$$J_m \frac{d^2 \alpha_m}{dt^2} + K_0 \frac{d\alpha_m}{dt} + C_c \alpha_m(t) = \Delta M(t) = M_{ин}(t) - M_{oc}(t).$$

В разомкнутой схеме $\Delta M(t) = M_{ин}(t)$.

Проанализируем возможные факторы, которые могут повлиять на вид передаточной функции ЧЭ. Одним из них является снижение собственной жесткости C_c подвеса ЧЭ, что приводит, прежде всего, к увеличению коэффициента передачи $K_1 = \frac{1}{C_c}$ первого звена в прямой цепи замкнутого контура на рис.1. За счет этого возможна реализация условия $K_p \gg 1$ при одновременном снижении требований к величине коэффициентов передачи последующих звеньев. Прежде всего, к коэффициенту усиления усилителя K_3 .

На примере кварцевых маятниковых компенсационных акселерометров [1] с ЧЭ на струнном торсионном подвесе оценим значения возможной собственной жесткости C_c подвеса и её значимость в сопоставлении с другими параметрами акселерометра. Задача состоит в том, чтобы показать, что возможен вариант сочетания параметров акселерометра, при котором можно пренебречь собственной жесткостью (собственным моментом упругих сил) на фоне инерционных, демпфирующих и прочих моментов. При этом ЧЭ приобретает интегрирующие свойства.

Так, в кварцевом акселерометре при массе $m_{ЧЭ}$ порядка долей и единиц миллиграмм угловая жесткость подвеса C_c может составлять величину порядка $(10^{-8}-10^{-9})$ Нм. Тогда максимальный момент сил упругости, создаваемый собственно подвесом в рабочем диапазоне углов отклонения маятника $\alpha_m \cong (10-20)$ угловых секунд $[(5-10)10^{-5}]$ радиан составит $(M_{упр})_{max} = C_c \alpha_m = (5-10)(10^{-13}-10^{-14})$ Нм. В разомкнутой системе упругий момент должен уравновешивать инерционный момент. Оценим инерционный момент на пороге чувствительности акселерометра. Так, если порог чувствительности акселерометра

$(a_y)_{min}=(10^{-4}-10^{-5})\text{мс}^{-2}$, масса ЧЭ $m= 10^{-6}\text{кг}$, плечо маятника $l_{ц}= 5(10^{-3})\text{м}$, то $(M_{ин})_{min}=5(10^{-13}-10^{-14})\text{Нм}$.

Эти оценки убеждают, что собственный упругий момент подвеса ЧЭ не в состоянии уравновесить измеряемый инерционный момента даже при минимальных измеряемых ускорениях. Следовательно, в замкнутой системе C_c может быть столь малой в сравнении с жесткостью C_s «электрической пружины», что C_c можно пренебречь. Тогда ЧЭ приобретает свойства «механического» интегрирующего звена и его ПФ можно записать в виде:

$$W_1^*(p) = \frac{\alpha_M(p)}{\Delta M(p)} = \frac{1}{p(J_M p + K_\partial)} = \frac{K_1^*}{p(T_1^* p + 1)}, \quad (10)$$

где $K_1^* = \frac{1}{K_\partial} [\frac{1}{\text{Нмс}}]$, $T_1^* = \frac{J_M}{K_\partial} [\text{с}]$ – коэффициент передачи и постоянная времени ЧЭ.

Имеет место трансформация исходной ПФ ЧЭ как колебательного звена к ПФ (3.48), представляющей собой последовательно соединенные типовые звенья – интегрирующее $\frac{K_1^*}{p}$ и апериодическое $\frac{1}{T_1^* p + 1}$. Такой вариант преобразования ПФ характерен для ЧЭ на «мягком» подвесе, преимущественно струнном, при малой массе самого ЧЭ. Только в этом случае упругий момент подвеса может стать существенно меньше инерционного момента во всем динамическом диапазоне измерения.

Обратимся вновь к ПФ (1) ЧЭ с коэффициентом передачи K_1 , постоянной времени T_1 и безразмерным коэффициентом демпфирования ζ_1 , которые имеют вид:

$$K_1 = \frac{1}{C_c}, \quad T_1 = \sqrt{\frac{J_M}{C_c}}, \quad \zeta_1 = \frac{K_\partial}{2\sqrt{J_M C_c}}.$$

В зависимости от соотношений физических параметров ЧЭ возможны следующие варианты его ПФ.

1. Имеем $\zeta_1 < 1$, что соответствует типовому колебательному звену, у которого $K_\partial < 2\sqrt{J_M C_c}$ или $C_c > \frac{K_\partial^2}{4J_M}$.

2. Критический случай $\zeta_1 = 1$, $C_c = C_{кр} = \frac{K_\partial^2}{4J_M}$. ПФ содержит два одинаковых апериодических звена первого порядка:

$$W_1(p) = \frac{K_{кр}}{(T_{кр} p + 1)^2}, \quad K_{кр} = \frac{1}{C_{кр}} = \frac{4J_M}{K_\partial^2}, \quad T_{кр} = T_1 = \sqrt{\frac{J_M}{C_{кр}}} = \frac{2J_M}{K_\partial}.$$

3. Имеем $\zeta_1 > 1$, $C_c < C_{кр}$, что соответствует двум апериодическим звеньям:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad T_2, T_3 = \frac{T_1}{\zeta_1 \pm \sqrt{\zeta_1^2 - 1}} = \frac{2J_M}{K_\delta \pm \sqrt{K_\delta^2 - 4J_M C_c}}. \quad (11)$$

В результате постоянные времени звеньев получают приращения разного знака относительно постоянной времени в критическом случае, то есть, $T_2 < T_{кр}$, а $T_3 > T_{кр}$.

4. Предельные случаи, когда возможно с определенной степенью приближения считать тот или иной член исходного дифференциального уравнения ЧЭ пренебрежимо малым по сравнению с остальными членами.

Предельный случай №1, когда позиционный член уравнения (упругий момент) значительно меньше суммы инерционного и скоростного (демпфирующего) членов, то есть справедливо «сильное» неравенство $C_c \alpha_m(t) \ll (J_M \frac{d^2 \alpha_m}{dt^2} + K_\delta \frac{d \alpha_m}{dt})$.

С физической точки зрения он достаточно обоснован выше для варианта «мягкого» струнного подвеса. Формально, - если $C_c = 0$, то из (3.49):

$$T_2, T_3 = \frac{2J_M}{K_\delta \pm K_\delta}; \quad T_2 = \frac{J_M}{K_\delta} = 0,5 T_{кр}; \quad T_3 \rightarrow \infty; \quad T_3 p \gg 1.$$

Следовательно, звено с T_3 «вырождается» в интегрирующее, коэффициент передачи которого несложно получить из исходного дифференциального уравнения, соответствующего ПФ (3.1). В результате приходим к ПФ (10), представляющей собой интегрирующее звено с замедлением.

Предельный случай №2, когда очень мал скоростной член уравнения и можно принять $K_\delta \frac{d \alpha_m}{dt} \ll [J_M \frac{d^2 \alpha_m}{dt^2} + C_c \alpha_m(t)]$. Это возможно, если маятник выполнен в виде легкой малогабаритной рамки (пластины) и отсутствуют специальные меры по её демпфированию. Тогда из (11) при $\zeta_1 = 0$ имеем $W_1(p) = \frac{K_1}{(T_1^2 p^2 + 1)}$.

Это – консервативное звено, в котором отсутствуют диссипативные факторы и наблюдаются незатухающие колебания с собственной частотой $\omega_1 = \frac{1}{T_1}$.

Предельный случай №3, для которого характерно преобладание инерционного члена и справедливо неравенство:

$J_M \frac{d^2 \alpha_m}{dt^2} \gg [K_\delta \frac{d \alpha_m}{dt} + C_c \alpha_m(t)]$. Оно выполняется, например, за счет $C_c \rightarrow 0$, $K_\delta \rightarrow 0$. ПФ приобретает вид двойного интегрирующего звена:

$$W_1^*(p) = \frac{K_1^*}{p^2}, \quad \text{где} \quad K_1^* = \frac{1}{J_M} \left[\frac{1}{H_{мс}^2} \right] - \text{коэффициент передачи двойного интегрирующего ЧЭ.}$$

Замкнутая система обладает астатизмом второго порядка, $v=2$.

Предельный случай №4, когда имеет место неравенство

$$K_0 \frac{d\alpha_M}{dt} \gg \int_M \frac{d^2\alpha_M}{dt^2} +$$

$C_c \alpha_M(t)$. Это возможно при большом «передемпфировании» подвижного узла и «мягком» подвесе. В этом случае ЧЭ выполняет роль чисто механического интегратора с ПФ

$$W_1^{**}(p) = \frac{K_1^{**}}{p}, \text{ где } K_1^{**} = \frac{1}{K_0} \left[\frac{1}{\text{Гц}^2} \right] - \text{коэффициент передачи интегрирующего ЧЭ.}$$

Далее проанализируем точностные характеристики астатического акселерометра, структура которого соответствует рис.1, а ЧЭ описывается ПФ (10). С этой целью получим выражения для выходных сигналов в функции заданных воздействий. Так, для выходного тока акселерометра с учетом (4) и (10) запишем сразу ПФ акселерометра по ускорению $W_{A_y}^*(p)$ и соотношение для $i_{\text{вых}}(p)$

$$\left. \begin{aligned} W_{A_y, i_{\text{вых}}}^*(p) &= \frac{i_{\text{вых}}(p)}{A_y(p)} = ml_u \frac{K_n}{K_p} \frac{1}{(T_a^*)^2 p^2 + 2\zeta_a^* T_a^* p + 1}; \\ K_n &= K_1^* K_2 K_3 K_4, K_p = K_n K_{oc}, T_a^* = \sqrt{\frac{T_1^*}{K_p}}; \zeta_a^* = \frac{1}{2\sqrt{T_1^* K_p}}; \\ i_{\text{вых}}(p) &= W_{A_y, i_{\text{вых}}}^*(p) A_y(p) + \\ &+ \frac{p}{K_1^* K_{oc}} W_{11}(p) \left[\Delta\alpha(p) + \frac{1}{K_2} \Delta U_2(p) + \frac{1}{K_2 K_3} \Delta U_3(p) + \frac{1}{K_2 K_3 K_4} \Delta i(p) \right]; \\ W_{11}(p) &= \frac{(T_1^* p + 1)}{(T_a^*)^2 p^2 + 2\zeta_a^* T_a^* p + 1}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Очевидно, что по токовому выходу система ведет себя как статическая по отношению к ускорению и как астатическая – к помехам. Действительно, в статике помехи не проходят на выход акселерометра.

$$\left. \begin{aligned} W_{A_y, \alpha_M}^*(p) &= \frac{\alpha_M(p)}{A_y(p)} = ml_u W_1^*(p) \frac{1}{1+W_p(p)} = \frac{ml_u}{C_3} W_{12}(p); \\ W_p(p) &= W_1^*(p) K_2 K_3 K_4 K_{oc}; \\ C_3 &= \frac{K_p}{K_1^*}, W_{12}(p) = \frac{1}{(T_a^*)^2 p^2 + 2\zeta_a^* T_a^* p + 1}; \\ \alpha_M(p) &= W_{12}(p) \left[\frac{ml_u}{C_3} A_y(p) + \frac{p}{K_p} (T_1^* p + 1) \Delta\alpha(p) + \frac{1}{K_2} \Delta U_2(p) + \frac{1}{K_2 K_3} \Delta U_3(p) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{K_2 K_3 K_4} \Delta i(p) \right]. \end{aligned} \right\} (12)$$

Из (12) следует, что по управляющему воздействию и всем помехам кроме $\Delta\alpha$ система является статической.

И, наконец, обратимся к передаточным функциям и соотношению для ошибки, опираясь на (11) и уравнение ошибок (12) в статической системе:

$$\begin{aligned}
 W_{a_{y,\varepsilon}}^*(p) &= \frac{E(p)}{A_y(p)} = \frac{ml_y}{K_p} p W_{11}(p); \\
 E(p) &= p W_{11}(p) \left[\frac{ml_y}{K_p} A_y(p) + \frac{1}{K_1^*} \Delta\alpha(p) + \frac{1}{K_1^* K_2} \Delta U_2(p) + \right. \\
 &\left. + \frac{1}{K_1^* K_2 K_3} \Delta U_3(p) + \frac{1}{K_1^* K_2 K_3 K_4} \Delta i(p) \right],
 \end{aligned} \tag{13}$$

где $W_{11}(p)$ – см. формулы (3.50).

Согласно (12) статическая ошибка от всех воздействий равна нулю.

Таким образом, включение в контур прямой цепи интегрирующих звеньев позволяет заметно изменить влияние погрешностей элементов прямой цепи на совокупную погрешность акселерометра.

В заключение данного раздела, посвященного анализу статических режимов работы акселерометра, сформируем основные требования и рекомендации по выбору его постоянных параметров и передаточных функций основного контура, состоящего из, так называемых, функционально необходимых звеньев, отраженных на структуре рис.1.

Чаще всего интегрирующие звенья реализуют с помощью усилителя. Исследования такого варианта показали, что по току $i_{\text{вых}}$ астатизм достигается по отношению к помехам в самом усилителе и в цепи его резистивных элементов. Но в отношении ускорения и помех, в предшествующих усилителю звеньях (ЧЭ и датчика угла) система остается статической.

По двум другим выходам – углу отклонения маятника α_m и ошибке системы ε астатизм наблюдается по отношению к измеряемому ускорению, помехам в самом усилителе и в следующем за ним резистивном звене. По выходу α_m астатизм присутствует также по отношению к помехам в самом ЧЭ. В то же время помехи остальных звеньев влияют на эти сигналы так же, как в статической системе - см. (10), (12) и (14).

Другой вариант придания астатических свойств акселерометру сводится к использованию ЧЭ с малым значением собственной жесткости, например, порядка $C_c = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ Нм, как в кварцевых акселерометрах [1]. В этом случае ПФ ЧЭ из типового колебательного звена трансформируется в интегрирующее звено с замедлением с ПФ (10).

Оценка точности также проведена по обобщенным соотношениям для каждого из выходных сигналов. Так, применительно к току $i_{\text{вых}}$ очевидно, что по отношению к ускорению система остается статической с коэффициентом передачи, равным $\frac{ml_{\text{и}}}{K_{\text{ос}}}$, и имеет ПФ второго порядка. В отношении всех помех имеет место астатизм первого порядка.

В статическом режиме при любом из входных воздействий, включая ускорение, ошибка равна нулю. И только по углу отклонения маятника α_m согласно (3.51) система при всех входных воздействиях, кроме помех в ЧЭ, остается статической, как и исходная, не содержащая интегрирующих звеньев. Поэтому необходимы тщательные оценки погрешностей от перекрестных ускорений, проекции которых на измерительную ось зависят от угла α_m , связанного с измеряемым ускорением через коэффициент $\frac{ml_{\text{и}}}{c_3}$. В связи с этим в прецизионных акселерометрах стремятся максимально уменьшить рабочие углы маятника до единиц угловых секунд и соответственно увеличить жесткость электрической пружины.

Интересно рассмотреть еще одну особенность акселерометра с интегрирующим ЧЭ. Она связана с наличием в любой реальной электромеханической системе зоны нечувствительности, которую могут породить шумы и наводки в электрических контурах системы, нелинейности в виде резкого снижения коэффициента передачи на начальных участках статических характеристик элементов. Она может быть обусловлена и чисто механическими причинами – трением, люфтами и другими факторами.

В случае применения в ЧЭ упругого подвеса, а также использования совершенных конструкционных материалов типа кварц, кремний и специальных технологий сводятся к минимуму как потери на внутреннее трение в самом подвесе, так и зона нечувствительности в ЧЭ. Поэтому преобладающей можно считать зону нечувствительности в последующих после ЧЭ звеньях структуры.

С учетом сказанного, поведение такой нелинейной системы, опираясь на известный метод «припасовывания», можно рассматривать на двух участках, на каждом из которых она ведет себя как линейная.

На первом участке при появлении на входе акселерометра сколь угодно малого измеряемого ускорения, маятник, благодаря собственным интегрирующим свойствам, начинает смещаться. Скорость этого движения при постоянном сигнале также постоянна и пропорциональна коэффициенту передачи интегрирующего звена и величине ускорения. Когда смещение маятника превысит зону нечувствительности последующих звеньев, замыкается цепь отрицательной обратной связи, система становится замкнутой, что и соответствует второму участку движения.

Сигнал обратной связи может снова вернуть ЧЭ в пределы зоны нечувствительности, ОС размыкается и процесс повторяется с частотой, зависящей от уровня входного сигнала. Постоянная составляющая этих колебаний на выходе акселерометра есть мера сколь угодно малых измеряемых ускорений. В итоге применение ЧЭ с интегрирующими свойствами приводит к эффекту снижения порога чувствительности акселерометра.

Показано, что введение в контур прямой цепи компенсационного акселерометра доступных для реализации интегрирующих звеньев расширяет функциональные возможности, позволяет повысить статическую точность и при этом снизить требования к точности звеньев прямой цепи. Целесообразно проанализировать динамические характеристики получить количественные оценки достижимых характеристик акселерометров подобной конфигурации.

Библиографический список

1. Мельников В.Е. Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. – М.: Машиностроение, 1984 – 159 с., ил. – (Б-ка приборостроителя).
2. Мельникова Е.Н., Мельников В.Е. О некоторых особенностях маятниковых компенсационных акселерометров из кварцевого стекла. Совместная, н-т конференция МАИ – СЗПУ (КНР), 2007
3. Мельникова Е.Н., Мельников В.Е. Некоторые особенности компенсационных акселерометров с маятниковым чувствительным элементом на упругом подвесе. Авиакосмическое приборостроение, ООО Издательство «Научтехиздат», 2007 г.

Сведения об авторах

Мельников Валерий Ефимович профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.; тел. (495) 301 8225,

e-mail: ve_melnic@mail.ru

Мельникова Елена Николаевна старший научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета); тел. (495) 301 8225, E-mail: ve_melnic@mail.ru