УДК 681.2

Влияние параметров прямой цепи компенсационных акселерометров на их точностные характеристики

В.Е. Мельников

Аннотация: Рассмотрены возможности повышения точности маятниковых компенсационных акселерометров за счет рационального выбора коэффициентов звеньев прямой цепи

Ключевые слова: маятниковый компенсационный акселерометр; контурный коэффициент; структурная схема

Маятниковые компенсационные акселерометры являются наиболее прецизионными измерительными преобразователями, которые совместно с гироскопическими устройствами обеспечивают … высокое качество систем ориентации и навигации подвижных объектов как в автономном, так и в корректируемом режимах. Достигается высокая точность преобразования за счет наличия главной отрицательной обратной связи (ГООС) при рациональном выборе величины контурного коэффициента. Вместе с тем в научно-технической литературе недостаточно отражены вопросы, связанные с влиянием нестабильности параметров звеньев прямой цепи на погрешность акселерометра в целом в зависимости от того, за счет каких звеньев достигается необходимое значение контурного коэффициента.

В задачу данной публикации входит анализ степени влияния инструментальной нестабильности элементов прямой цепи на суммарную погрешность акселерометра в зависимости от вклада соответствующих элементов в общий контурный коэффициент.

На рис.1. представлено упрощённое изображение маятника акселерометра с указанием сил и моментов сил и координат точек приложения сил, определяющих закон углового движения маятника. Принято, что упругий подвес маятника обеспечивает ему только одну угловую степень свободы относительно оси X_0 корпуса. Ось чувствительности акселерометра - Y_0.

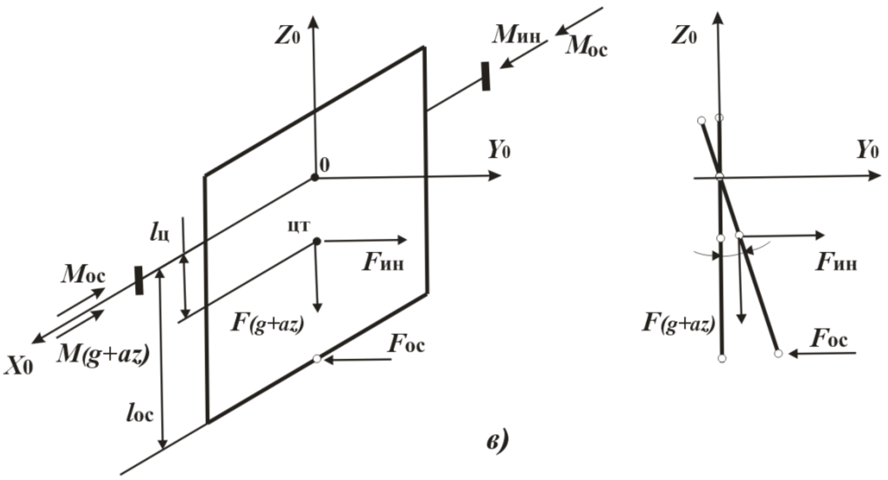

Рис. 1. Маятниковый компенсационный акселерометр. План сил и моментов сил

Закономерности относительного движения маятника акселерометра определяются дифференциальным уравнением вида:

$J_{м}\ddot{\alpha}_{м}+K_{д}\dot{\alpha}_{м}+C_{с}\alpha_{м} = M_{ин} - M_{ос} - M_{(g\pm a_z)} + M_{\varepsilon_x}$. (1)

В левой части уравнения представлена неизменяемая часть маятника акселерометра, а правая – характеризует суммарные воздействия на маятник моментов: - $M_{ин} = ml_{ц}A_y \cos\alpha_{м}$ от сил инерции при наличии ускорений A_y по измерительной оси Y при изначально вертикальном расположении плеча маятника; - $M_{ос} = M_{ос_1} + M_{ос_2}$ обратной связи, $M_{ос_1} = M_1(\alpha_{м}) = C_{э}\alpha_{м}$, $M_{ос_2} = M_2(\dot{\alpha}_{м}) = K_{д_1}\dot{\alpha}_{м}$, здесь $M_{ос_1}$ и $M_{ос_2}$ составляющие момента, определяющие соответственно позиционное и «скоростное» (демпфирующее) воздействия на маятник; - $M_{(g\pm a_z)} = ml_{ц}(g \pm a_z)sin\alpha_{м}$ от ускорения сил тяжести и ускорения по оси Z_0; - M_{ε_x}=$J_x\varepsilon_x$ от углового ускорения ε_x относительно оси X_0 (на рис.1 не показаны), совпадающей с осью подвеса маятника.

На рис.2 представлена структурная схема маятникового компенсационного акселерометра, в которой влияние возможных инструментальных дрейфов элементов прямой цепи оценивается по эквивалентной помехе на выходе соответствующего звена. Тогда при исследовании характеристик акселерометра в качестве входного воздействия может быть принят полезный сигнал или помеха (возмущение) с соответствующей точке структуры.

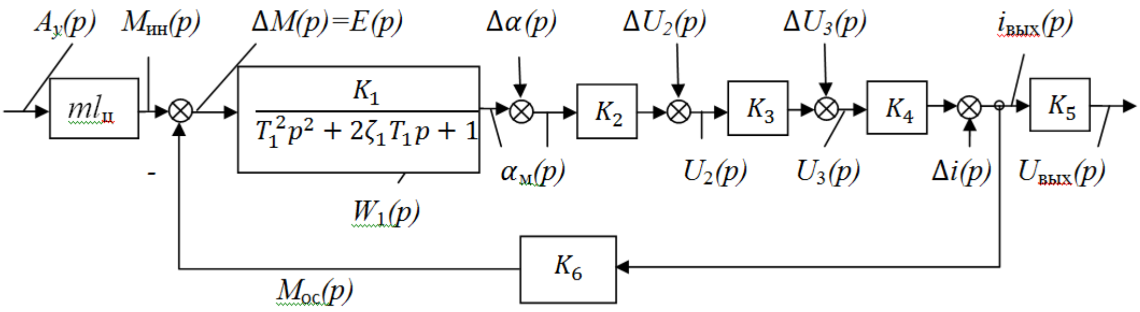

Рис. 2. Базовая структура маятникового компенсационного акселерометра с учетом возмущений

На структуре все воздействия представлены в виде изображений по Лапласу, как функции комплексной переменной Лапласа p. Здесь полезный сигнал – линейное ускорение объекта $A_y(t)$, направленное вдоль измерительной оси Y (рис.2.). Помехи $\Delta\alpha(t), \Delta U_2(t), \Delta U_3(t), \Delta i(t) -$ это медленно меняющиеся со временем нестабильности и дрейфы выходных сигналов элементов прямой цепи, обусловленные как внешними, так и внутренними причинами.

В структуре на рис.2 отражен только один (основной) вид движения маятника – поворот на угол $\alpha_м$ относительно оси подвеса и не учтены его возможные пространственные движения. Такой подход оправдан в рамках сформулированной задачи.

И, наконец, в анализируемой структуре не учитываются инерционные свойства других, кроме ЧЭ, функционально необходимых элементов; не рассматриваются дополнительные воздействия из-за наличия линейных ускорений по «не измерительным» осям X,Z (рис.1.), угловых ускорений относительно оси X.

Для структуры на рис.2 запишем передаточные функции звеньев. Передаточная функция маятника может быть представлена в виде:

$$W_1(p) = \frac{\alpha_м(p)}{\Delta M(p)} = \frac{1}{J_м p^2 + K_д p + C_с} = \frac{K_1}{T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1}, \quad (2)$$

где $\alpha_м$ [рад] – угол отклонения маятника относительно нулевой точки датчика угла; $\Delta M = M_{ин} - M_{ос}$ [Нм] – соответственно разность инерционного момента и момента обратной связи, сформированного датчиком момента; $J_м$ [кгм^2]=[Нмс^2] – момент инерции ЧЭ относительно оси подвеса; $K_д$ [Нмс] – суммарный коэффициент скоростного демпфирования; $C_с$ [Нм] – собственная угловая жесткость подвеса ЧЭ при отсутствии влияния силы тяжести; p – комплексная переменная Лапласа;

параметры типового колебательного звена $K_1=\frac{1}{C_с}$ [1/Нм], $T_1=\sqrt{\frac{J_м}{C_с}}$[с], $\zeta_1=\frac{K_д}{2\sqrt{J_м C_c}}$ – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени, безразмерный коэффициент демпфирования.

Остальные элементы структуры – пропорциональные звенья с коэффициентами передачи K_2 .....K_6:

$K_2=\frac{U_2(p)}{\alpha_м(p)}$ [В/рад] – преобразователя угла отклонения $\alpha_м$ маятника в напряжение; $K_3=\frac{U_3(p)}{U_2(p)}$ [В/В] – операционного усилителя с коэффициентом усиления по напряжению K_3 и выходным напряжением $U_3(p)$; $K_4=\frac{i_{вых}(p)}{U_3(p)}=\frac{1}{R_н+r_{ос}}$ – [Ом$^{-1}$] – токовой выходной цепи усилителя ($i_{вых}(p)$ – ток на выходе усилителя, а $R_н$ и $r_{ос}$ – омические сопротивления резистора нагрузки и катушки датчика момента); $K_э=K_3K_4$ [Ом$^{-1}$] – электронной части схемы, в которую обычно добавляют корректирующие устройства (КУ), необходимые для обеспечения устойчивости и заданного качества переходного процесса (тогда вместо $K_э$ имеем $W_э(p)=\frac{i_{вых}(p)}{U_2(p)}=K_э W_{ку}(p)$ [Ом$^{-1}$], где передаточная функция КУ в простейшем случае равна $W_{ку}(p)=\frac{T_2p+1}{T_3p+1}$, причем величины и задаваемое соотношение постоянных времени $T_2 < T_3$ соответствуют дифференцирующим свойствам КУ в районе частоты среза системы); $K_5=\frac{U_{вых}(p)}{i_{вых}(p)}=R_н$ [Ом] – выходной цепи акселерометра; $K_6=\frac{M_{ос}(p)}{i_{вых}(p)}=K_{ос}$ [Нм/А] – датчика момента, расположенного в цепи главной отрицательной обратной связи (ОС) и характеризуемого коэффициентом $K_{ос}$, зависящим (для магнитоэлектрической системы ОС) от параметров магнитной системы, активных элементов катушки обратной связи и геометрии ЧЭ.

Для структуры на рис.2 передаточная функция акселерометра при наличии последовательного корректирующего звена равна:

$$W_{a_y}(p)=\frac{U_{вых}(p)}{A_y(p)}=ml_ц R_н\frac{W_п(p)}{1+W_р(p)}, \tag{3}$$

где $W_п(p)=\frac{i_{вых}(p)}{\Delta M(p)}=W_1(p)K_2W_э(p)$ – передаточная функция прямой цепи;

$W_р(p)=\frac{M_{ос}(p)}{\Delta M(p)}=W_п(p)K_{ос}$ - передаточная функция разомкнутого контура главной ОС, при этом в линейной системе размыкание можно провести в любой точке контура.

Согласно выражению (3) в статическом режиме, то есть, при $p=0$, коэффициент передачи акселерометра равен:

$$K_а=W_{a_y}(0)=ml_ц R_н\frac{K_п}{1+K_р}\ [\text{Вс}^2\text{м}^{-1}], \tag{4}$$

где $K_п = \frac{K_2 K_э}{C_с} = \frac{K_2 K_3 K_4}{C_с}$[А/Нм] – коэффициент передачи прямой цепи;

$K_р = W_р(0) = K_п K_{ос} = \frac{C_э}{C_с}$ - коэффициент передачи разомкнутого контура (или контурный коэффициент), величина безразмерная;

$C_э = K_2 K_3 K_4 K_{ос}$[Нм] - так называемая, «электрическая жесткость» акселерометра.

Ниже при анализе точностных характеристик акселерометра используются передаточные функции по возмущениям $\Delta\alpha$, ΔU_2, ΔU_3, Δi, представленным на рис.2, а также по ошибке.

В общем виде передаточная функция по возмущению имеет вид:

Уравнение ошибок акселерометра

Согласно выражению (4) и [1] уравнение ошибок может быть представлено в виде

$$dK_а = \frac{\partial K_а}{\partial m} dm + \frac{\partial K_а}{\partial l_ц} dl_ц + \frac{\partial K_а}{\partial R_н} dR_н + \frac{\partial K_а}{\partial k_п} dk_п + \frac{\partial K_а}{\partial K_{ос}} dK_{ос}\ . \qquad (5)$$

После преобразований получим [1] уравнение ошибок компенсационного акселерометра в относительных единицах:

$$\frac{dK_а}{K_а} = \frac{dm}{m} + \frac{dl_ц}{l_ц} + \frac{dR_н}{R_н} + \frac{1}{1+K_р}\frac{dK_п}{K_п} - \frac{K_р}{1+K_р}\frac{dK_{ос}}{K_{ос}}, \qquad (6)$$

где $K_р = K_п\, K_{ос}$ – контурный коэффициент.

Как следует из (6), если $K_р \gg 1$, то наибольший вклад в статические ошибки акселерометра вносят звенья, не охваченные ГООС $\frac{dm}{m}, \frac{dl_ц}{l_ц}, \frac{dR_н}{R_н}$ и цепь обратной связи $\frac{K_р}{1+K_р}\frac{dK_{ос}}{K_{ос}} \cong \frac{dK_{ос}}{K_{ос}}$, к которым следует обращать особое внимание. Это решаемая задача, и она решается.

Что касается элементов, охваченных ГООС - $\frac{1}{1+K_р}\frac{dK_п}{K_п}$, то при $K_р \gg 1$, на первый взгляд, все достаточно просто, влияние погрешностей всех элементов прямой цепи существенно ослабляются в соответствующее число раз. Но на самом деле это не так, поскольку в соответствии с рис.2 точки входа у них различные и потому и относительное влияние на характеристики акселерометра может отличаться.

Передаточные функции по возмущениям. Выбор параметров прямой цепи.

Рассмотрим передаточные функции замкнутой системы по отношению к различным возмущающим факторам инструментального характера, представленным на рис.2, проследим влияние помех на выходные характеристики, а также проанализируем возможности и способы минимизации этого влияния при рациональном выборе параметров прямой цепи.

В качестве возмущений $\Delta\propto, \Delta U_2$, ΔU_3, $\Delta i_{\text{вых}}$ взяты возможные медленно меняющиеся во времени и обусловленные различными физическими причинами процессы дрейфа, нестабильности, а также уходы и шумы в звеньях прямой цепи. Все возмущающие воздействия приведены к выходу соответствующего звена.

В связи с тем, что рассматриваемые помехи относятся к классу низкочастотных процессов, можно в исходной системе не учитывать корректирующее устройство, работающее в диапазоне средних частот, и принять $W_{\text{ку}}(p) = 1$, $W_{\text{э}}(p) = K_3 K_4$.

Тогда с учетом формул (2), (3) передаточные функции прямой цепи и разомкнутого контура запишем в виде:

$$\left.\begin{aligned} &W_{\text{п}}(p)=W_1(p)K_2K_3K_4=\frac{K_{\text{п}}}{T_1^2p^2+2\zeta_1T_1p+1}, \\ &W_{\text{р}}(p)=W_{\text{п}}(p)K_{\text{ос}}=\frac{K_{\text{р}}}{T_1^2p^2+2\zeta_1T_1p+1}. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Затем, опираясь на (4), передаточную функцию акселерометра для удобства дальнейших расчетов, выразим через передаточную функцию замкнутого контура $W_{\text{з}}(p)$.

$$\left.\begin{aligned} &W_{A_y}(p)=\frac{U_{\text{вых}}(p)}{A_y(p)} = ml_{\text{ц}}R_{\text{н}}W_{\text{з}}(p) \\ &W_{\text{з}}(p)=\frac{i_{\text{вых}}(p)}{M_{\text{ин}}(p)} = \frac{K_{\text{п}}}{(1+K_{\text{р}})(T_{\text{а}}^2p^2+2\zeta_{\text{а}}T_{\text{а}}p+1)}, \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

где $T_{\text{а}}=\frac{T_1}{\sqrt{1+K_{\text{р}}}}$, $\zeta_{\text{а}}=\frac{\zeta_1}{\sqrt{1+K_{\text{р}}}}$ - постоянная времени и относительный коэффициент демпфирования замкнутого контура акселерометра.

На основании структуры на рис.2 для каждой помехи могут быть составлены структурная схема и соответствующая ей передаточная функция.

Передаточные функции по каналам помех, соответствующих звеньям прямой цепи, в виде:

- для помехи маятника

$$W_{\Delta\propto}(p) = \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta\propto(p)} = \frac{W_{\text{з}}(p)}{W_1(p)} = \frac{1}{K_1K_{\text{ос}}}W_0(p)\ ; \qquad (9)$$

- для помехи датчика угла

$$W_{\Delta U_2}(p) = \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta U_2(p)}=\frac{1}{K_1K_2K_{\text{ос}}}W_0(p), \qquad (10)$$

- для помехи усилителя

$$W_{\Delta U_3}(p) = \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta U_3(p)}=\frac{1}{K_1K_2K_3K_{\text{ос}}}W_0(p), \qquad (11)$$

- для помехи резистивных цепей на выходе усилителя

$$W_{\Delta i}(p) = \frac{i_{\text{вых}}(p)}{\Delta i(p)} = \frac{1}{K_1 K_2 K_3 K_4 K_{\text{ос}}} W_0(p). \quad (12)$$

В (9) – (12) $W_0(p)$ такова:

$$W_0(p) = \frac{K_{\text{р}}}{1+K_{\text{р}}} \frac{(T_1^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1 p + 1)}{(T_{\text{а}}^2 p^2 + 2\zeta_{\text{а}} T_{\text{а}} p + 1)}. \quad (13)$$

На основании (9) – (13) выражение для выходного тока с учетом влияния нестабильности параметров звеньев прямой цепи можно представить :

$$i_{\text{вых}}(p) = \frac{m l_{\text{ц}} K_{\text{п}}}{1+K_{\text{р}}} \frac{1}{T_{\text{а}}^2 p^2 + 2\zeta_{\text{а}} T_{\text{а}} p + 1} A_y(p) + \frac{1}{K_1 K_{\text{ос}}} W_0(p)[\Delta\alpha(p) + \frac{1}{K_2}\Delta U_2(p) +$$

$$+ \frac{1}{K_2 K_3}\Delta U_3(p) + \frac{1}{K_2 K_3 K_4}\Delta i(p)]; \quad (14)$$

Таким образом, удельный вес рассматриваемых возмущений в выходном токе акселерометра, а значит и его погрешности от нестабильностей и дрейфов в элементах прямой цепи, зависят от того, за счет каких звеньев достигается требуемое значение коэффициента передачи разомкнутого контура $K_{\text{р}}$>>1. Важно, чтобы это условие реализовывалось за счет коэффициента K_1, так как именно он присутствует во всех ПФ. И значительно менее предпочтительно, если это значение $K_{\text{р}}$ достигается за счет увеличения коэффициента усиления усилителя K_3, и тогда возмущения $\Delta\alpha$ и ΔU_2 проходят на выход с очень малыми ослаблениями.

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 института); д.т.н.; тел. (495) 301 8225, e-mail: ve_melnik@mail.ru