

С. В. ЛУЧКО, С. Ю. БАЛУЕВ, М. А. ВАТУТИН, И. С. ГУРЬЕВ

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Приводится математическая модель движения чувствительного элемента маятникового акселерометра компенсационного типа, обобщаются результаты численного интегрирования и оценивается влияние возмущений на погрешность измерений акселерометром ЦЕ-199, функционирующим в периодическом режиме с широтно-импульсным модулятором второго рода.

Ключевые слова: акселерометр, датчик угловой скорости, периодический режим, погрешность измерений.

В состав систем управления движением современных летательных аппаратов (ЛА) входят датчики первичной информации. Точность ориентации и навигации ЛА непосредственно зависит от погрешностей таких датчиков. Проблема снижения погрешностей, особенно в условиях влияния различных возмущений, наиболее актуальна для задачи минимизации ошибок при ориентации ЛА. К датчикам первичной информации относятся акселерометры, датчики угловой скорости и другие приборы. Среди многочисленных типов акселерометров широкое распространение имеют маятниковые акселерометры компенсационного типа, которые имеют средние точностные характеристики и относительно невысокую стоимость.

В настоящее время существует возможность улучшения точностных характеристик маятниковых акселерометров путем минимизации нелинейностей в системе, которые обуславливают инструментальную погрешность измерения ускорений [1]. Минимизация погрешностей достигается с помощью перевода чувствительного элемента (ЧЭ) акселерометра в режим гармонических колебаний. Такой перевод можно осуществить несколькими способами: к примеру, с использованием внешнего генератора, путем введения ЧЭ в режим автоколебаний, с помощью широтно-импульсного модулятора второго рода (ШИМ-2). Как показал сравнительный анализ точностных характеристик маятникового акселерометра, самые лучшие показатели по минимизации погрешностей имеет способ приведения ЧЭ в режим вынужденных колебаний с помощью ШИМ-2 [2, 3].

Режим вынужденных колебаний с ШИМ-2 имеет существенную особенность, состоящую в том, что ЧЭ совершает колебания в строгом соответствии с последовательностью управляющих импульсов. Такой режим функционирования называется периодическим. Другая важная причина перевода ЧЭ в периодический режим — приобретение маятниковым акселерометром свойств временного модулятора, при этом выходная величина является параметром времени, а зависимость выход—вход легко преобразуется в цифровой вид, что удобно для последующей статистической обработки.

В настоящей статье рассматривается математическая модель акселерометра с ШИМ-2 и приводятся результаты исследований влияния внешних возмущений на погрешность измерений ускорения акселерометром. Проведение такого рода исследований необходимо не только для учета влияния внешних возмущений, но и для определения граничных условий функционирования данных приборов.

В ходе исследований использовался акселерометр ЦЕ-199 с ШИМ-2, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

В состав чувствительного элемента акселерометра входят подвижная масса (ПМ) и измерительный элемент (ИЭ); на рисунке ДУ — датчик угла, ДМ — датчик момента. Функционально ЧЭ обеспечивает сравнение входного инерционного $M_{\text{и}}$ и компенсационного $M_{\text{дм}}$

моментов. Внешние воздействия неучтенных сил, природа которых различна, характеризуются моментом M_f . На чувствительный элемент воздействует входное ускорение $a_{вх}$, являющееся причиной возникновения момента $M_{и}$. Разностью ΔM обуславливается отклонение ЧЭ на угол β , который преобразуется датчиком угла в сигнал u . Сигнал u поступает в ШИМ-2, состоящий из генератора пилообразного напряжения (ГПН), компаратора (К), электронного ключа (ЭК) и источника опорного напряжения (тока) — ИОН. Функционально ШИМ-2 — это устройство, которое предназначено для формирования импульсной последовательности с заданным периодом дискретизации T , заданной амплитудой h и модулированной скважностью γ_i . Скважность импульсной последовательности γ_i в ШИМ-2 формируется при сравнении текущего значения сигнала u с некоторым опорным сигналом $u_{оп}$. При воздействии ускорения длительности τ_1 и τ_2 управляющих импульсов ШИМ-2 будут различны. Преобразование интервалов τ_1 и τ_2 в код осуществляется классическим способом — заполнением временных интервалов тактовыми импульсами стабильной частоты; далее определяются их разность, сумма и отношение. На выходе измерительной схемы формируется число, пропорциональное входному ускорению.

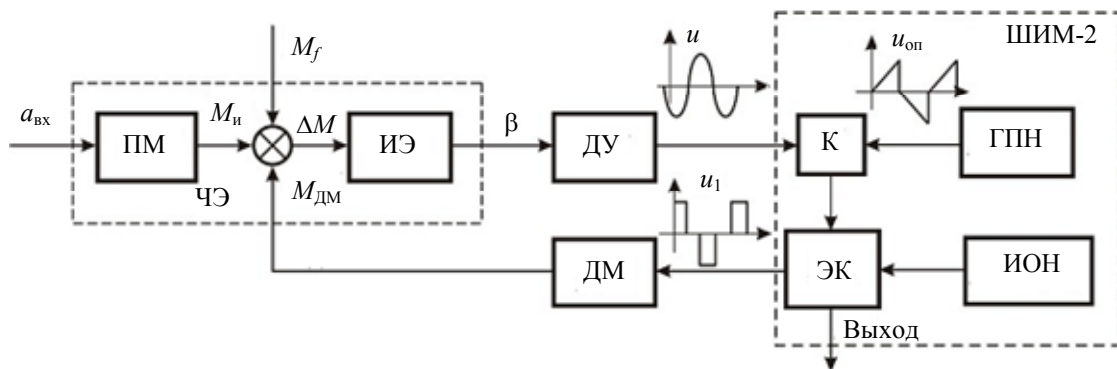


Рис. 1

Принцип действия акселерометра ЦЕ-199 с ШИМ-2 поясняется схемой, представленной на рис. 2, где m — масса маятника акселерометра. Маятник под воздействием управляющих импульсов, поступающих с ШИМ-2, совершает колебательные движения с заданным периодом T_0 и углом отклонения β . При ускорении, действующем в плоскости колебаний, положение динамического равновесия изменяется.

Особенность функционирования маятникового акселерометра с ШИМ-2 состоит в том, что такого типа прибор способен измерять постоянные или медленно изменяющиеся входные воздействия:

$$|\omega(t + T_0) - \omega(t)| \ll |\omega(t)|. \quad (1)$$

Из условия (1) следует, что изменение входного сигнала в течение периода T_0 колебаний ЧЭ акселерометра должно быть минимальным, в идеальном случае — равным нулю. Однако возмущения могут быть достаточно высокой частоты и различной амплитуды, оказывая при этом непосредственное влияние на качество измерений.

Задача исследований заключается в том, чтобы оценить, насколько существенно влияние возмущений различной частоты и амплитуды, и предусмотреть меры минимизации действия этих возмущений в процессе функционирования акселерометра с ШИМ-2 на борту ЛА.

Были проведены исследования двух типов возмущений — вибрации корпуса и искажений опорного линейно изменяющегося сигнала. Математическая модель, в соответствии

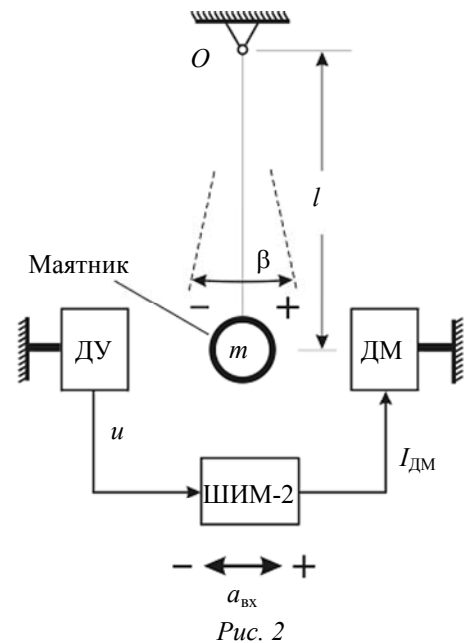


Рис. 2

с которой проводились исследования, характеризует динамику ЧЭ акселерометра в условиях влияния этих возмущений.

Математическая модель непрерывной части системы вместе с ШИМ-2 представлена разностными уравнениями со смещенным аргументом [1, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(i + \varepsilon) &= \mathbf{A}^*(\varepsilon) \mathbf{x}(i) + h \mathbf{b}^*(\varepsilon) \operatorname{sgn} \delta(i) + \mathbf{m}^*(\varepsilon) f(i); \\ y(i + \varepsilon) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \varepsilon), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$\mathbf{A}^*(\varepsilon) = e^{\mathbf{A}\varepsilon T}; \quad \mathbf{b}^*(\varepsilon) = \begin{cases} \int_0^{\varepsilon T} e^{\mathbf{A}\sigma} \mathbf{b} d\sigma, & \text{если } 0 \leq \varepsilon \leq \gamma_i, \\ 0 & \\ \int_{(\varepsilon - \gamma_i)T}^{\varepsilon T} e^{\mathbf{A}\sigma} \mathbf{b} d\sigma, & \text{если } \gamma_i \leq \varepsilon \leq 1; \end{cases} \quad \mathbf{m}^*(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon T} e^{\mathbf{A}\sigma} \mathbf{m} d\sigma;$$

$i = \overline{0, \infty}$ — целое число; ε, σ — параметры, которые можно изменять от 0 до 1; $\mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \varepsilon)$ — вектор состояния системы.

В этом случае на интервале $iT \leq t \leq (i + 1)T$ в качестве ошибки $\delta(t)$ можно рассматривать $\delta(i + \varepsilon)$:

$$\delta(i + \varepsilon) = g(i + \varepsilon) - y(i + \varepsilon) = g(i + \varepsilon) - \mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \varepsilon). \quad (3)$$

Составляющая $\mathbf{m}^*(\varepsilon)$ в системе уравнений (2) характеризует влияние возмущений $f(i)$ на движение ЧЭ акселерометра.

Опорный сигнал ГПН $u_{\text{оп}}(t)$ обычно имеет пилообразную форму. На интервале $iT \leq t \leq (i + 1)T$ этот сигнал описывается выражением

$$u_{\text{оп}} = \eta \varepsilon \operatorname{sgn} \delta(i) + \psi(i + \varepsilon), \quad (4)$$

где η — постоянный коэффициент, определяющий крутизну сигнала $u_{\text{оп}}(t)$; $\psi(i + \varepsilon)$ — возмущение ГПН, обусловленное помехами и шумами электронных компонентов.

Скважность импульсов определяется в моменты совпадения входного и опорного сигналов, т.е. в моменты $t = (i + \gamma_i)T$. В уравнениях (3) и (4) им соответствует равенство $\varepsilon = \gamma_i$. Приравняв правые части этих уравнений, получим

$$g(i + \gamma_i) - \mathbf{c}^T \mathbf{x}(i + \gamma_i) = \eta \gamma_i \operatorname{sgn} \delta(i) + \psi(i + \varepsilon). \quad (5)$$

Значение скважности γ_i является решением уравнения (5): если положительное решение отсутствует, то $\gamma_i = 1$. Уравнение (5), как правило, нелинейное, поэтому его решение можно найти лишь методом последовательных приближений.

В условиях влияния возмущений колебания ЧЭ акселерометра имеют сложный вид, близкий к форме несимметричной периодической функции. Известно, что динамика движения ЧЭ инерциальных датчиков угловой скорости и акселерометров в общем случае описывается колебательным звеном. Для математической модели маятникового акселерометра с ШИМ-2 вполне допустимо использовать передаточную функцию (ПФ) линейной части акселерометра, состоящую из двух апериодических звеньев. При этом допускается, что входное воздействие является медленно изменяющимся и выполняется неравенство (1). В этом случае ограничение (1) позволяет исследовать вместо колебательного звена с постоянной времени T_1 апериодическое звено второго порядка с заданными постоянными времени T'_1 и T''_2 , которые определены параметрическим синтезом маятникового акселерометра с ШИМ-2 при моделировании системы:

$$\frac{k}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1} \approx \frac{k}{(T'_1 p + 1)(T''_2 p + 1)}. \quad (6)$$

Передаточную функцию маятникового акселерометра с ШИМ-2 можно представить в виде

$$W(p) = \sum_{v=1}^n \frac{R_v}{T_v p_v + 1}. \quad (7)$$

Корни p_v знаменателя передаточной функции $W(p)$ — простые вещественные отрицательные, т.е. $p_v = -1/T_v$, где T_v — постоянные времени характеристического уравнения; R_v — параметр разложения $W(p)$ на элементарные дроби [4].

Матричную систему уравнений (2) можно заменить системой из n независимых уравнений первого порядка, в которых $\mathbf{A}^* = d_v$, $\mathbf{b}^* = R_v(1 - d_v)$, где $d_v = e^{-T/T_v}$.

Для акселерометра элементы ПФ (6), (7) равны

$$R_1 = kT_1(T_1 - T_2)^{-1}, \quad R_2 = -kT_2(T_1 - T_2)^{-1}, \quad d_1 = e^{-T/T_1}, \quad d_2 = e^{-T/T_2}.$$

При измерении ускорения чувствительный элемент акселерометра будет совершать несимметричные колебания, поэтому такой режим функционирования акселерометра получил название несимметричного. Скважности управляющих импульсов для несимметричного режима различны и имеют значения γ_0 и γ_1 , следовательно, и переменные состояния системы будут различны: они определяются системой из двух разностных уравнений, которые в общем виде имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(0, \gamma_0) &= \mathbf{x}_{\gamma_0} = \mathbf{A}_{\gamma_0}^* \mathbf{x}_0 + h\mathbf{b}_{\gamma_0}^* + \mathbf{m}^* f(i), \\ \mathbf{x}(1, \gamma_1) &= \mathbf{x}_{\gamma_1} = \mathbf{A}_{\gamma_1}^* \mathbf{x}_1 - h\mathbf{b}_{\gamma_1}^* + \mathbf{m}^* f(i). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Применительно к ПФ акселерометра (6), (7) правые части уравнений (8) преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{c}^T \mathbf{x}_{\gamma_0} &= h(B_1 + B_2) + f(i)(C_1 + C_2); \\ \mathbf{c}^T \mathbf{x}_{\gamma_1} &= h(B_3 + B_4) + f(i)(C_3 + C_4), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где B_1, B_2, C_1, C_2 определяют движение ЧЭ акселерометра в первом полупериоде, а B_3, B_4, C_3, C_4 — движение в последующем полупериоде:

$$\begin{aligned} B_1 &= R_1 \frac{d_1(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - (d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & B_2 &= R_2 \frac{d_2(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - (d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}, \\ B_3 &= R_1 \frac{(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - d_1(d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & B_4 &= R_2 \frac{(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - d_2(d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}; \\ C_1 &= R_1 \frac{d_1(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - (d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & C_2 &= R_2 \frac{d_2(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - (d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}, \\ C_3 &= R_1 \frac{(d_1^{1-\gamma_0} - d_1) - d_1(d_1^{1-\gamma_1} - d_1)}{1 - d_1^2}, & C_4 &= R_2 \frac{(d_2^{1-\gamma_0} - d_2) - d_2(d_2^{1-\gamma_1} - d_2)}{1 - d_2^2}. \end{aligned}$$

Элементы вектора состояния системы определяются как

$$\begin{aligned} d_1^{1-\gamma_0} &= e^{-T(1-\gamma_0)/T_1}, & d_1^{1-\gamma_1} &= e^{-T(1-\gamma_1)/T_1}, & d_2^{1-\gamma_1} &= e^{-T(1-\gamma_1)/T_2}, & d_2^{1-\gamma_0} &= e^{-T(1-\gamma_0)/T_2}, \\ d_1 &= e^{-T\gamma_1/T_1}, & d_2 &= e^{-T\gamma_1/T_2}, & d_2 &= e^{-T\gamma_0/T_2}. \end{aligned}$$

Значения скважности импульсов γ_0 и γ_1 определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \omega - h \left[\frac{R_1(1-d_1^{\gamma_0})}{1+d_1} + \frac{R_2(1-d_2^{\gamma_0})}{1+d_2} \right] &= \eta\gamma_0 + \psi(i + \varepsilon), \\ \omega - h \left[\frac{R_1(1-d_1^{\gamma_1})}{1+d_1} + \frac{R_2(1-d_2^{\gamma_1})}{1+d_2} \right] &= \eta\gamma_1 + \psi(i + \varepsilon). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Системы уравнений (2), (9) и (10) составляют математическую модель динамики ЧЭ маятникового акселерометра с ШИМ-2, на основе которой проведено численное моделирование процесса функционирования акселерометра ЦЕ-199 с ШИМ-2 в условиях влияния внешних возмущений [5]. Прямое использование маятниковых акселерометров, функционирующих в периодическом режиме на борту ЛА, без учета влияния возмущений, может привести к существенному ухудшению точностных характеристик этих приборов, а при определенных условиях — и к выходу их из строя. Поэтому решаемая в данной статье задача актуальна и важна в плане обеспечения надежной и длительной работы таких акселерометров.

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры ЧЭ акселерометра ЦЕ-199:

- коэффициент линейной части ПФ акселерометра $k = 6$;
- постоянная времени $T_1 = 2,7 \cdot 10^{-3}$ с;
- коэффициент затухания $\xi = 0,13$;
- диапазон измерения ускорения ± 1 м/с²;
- период колебания ЧЭ $T_0 = 0,01$ с.

В исходном состоянии в отсутствие внешних возмущений чувствительный элемент под влиянием управляющих импульсов с ШИМ-2 будет совершать колебания, форма которых показана на рис. 3. В условиях влияния внешних возмущений форма колебаний ЧЭ отличается, и тем существенней, чем больше амплитуда возмущений: на рис. 4, а, б показана форма колебаний ЧЭ при возмущениях амплитудой 0,5 м/с² с частотами f_b , равными 10 и 60 Гц соответственно.

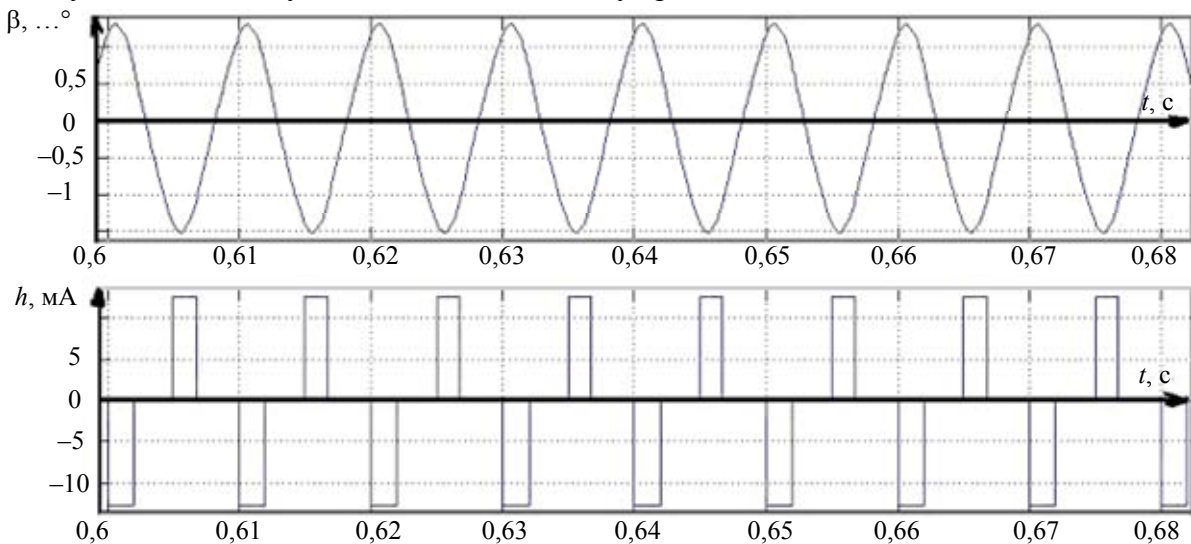


Рис. 3

Амплитуда возмущений влияет и на погрешность акселерометра ЦЕ-199: чем амплитуда выше, тем больше увеличивается погрешность. С другой стороны, на погрешность измерений существенное влияние оказывает качество работы ШИМ-2, одним из основных элементов которого является генератор пилообразных напряжений. Как показали результаты моделирования, погрешность измерений в значительной степени зависит от линейности пилообразного напряжения, шумов ГПН и стабильности источника питания.

Одним из наиболее значимых внешних возмущений является вибрация корпуса ЛА.

Результат моделирования представлен на рис. 5 графиком зависимости погрешности измерений (Δ) от амплитуды возмущений (A_k), источником которых является вибрация корпуса ЛА при различных значениях частоты колебаний корпуса ($f_{к.к}$).

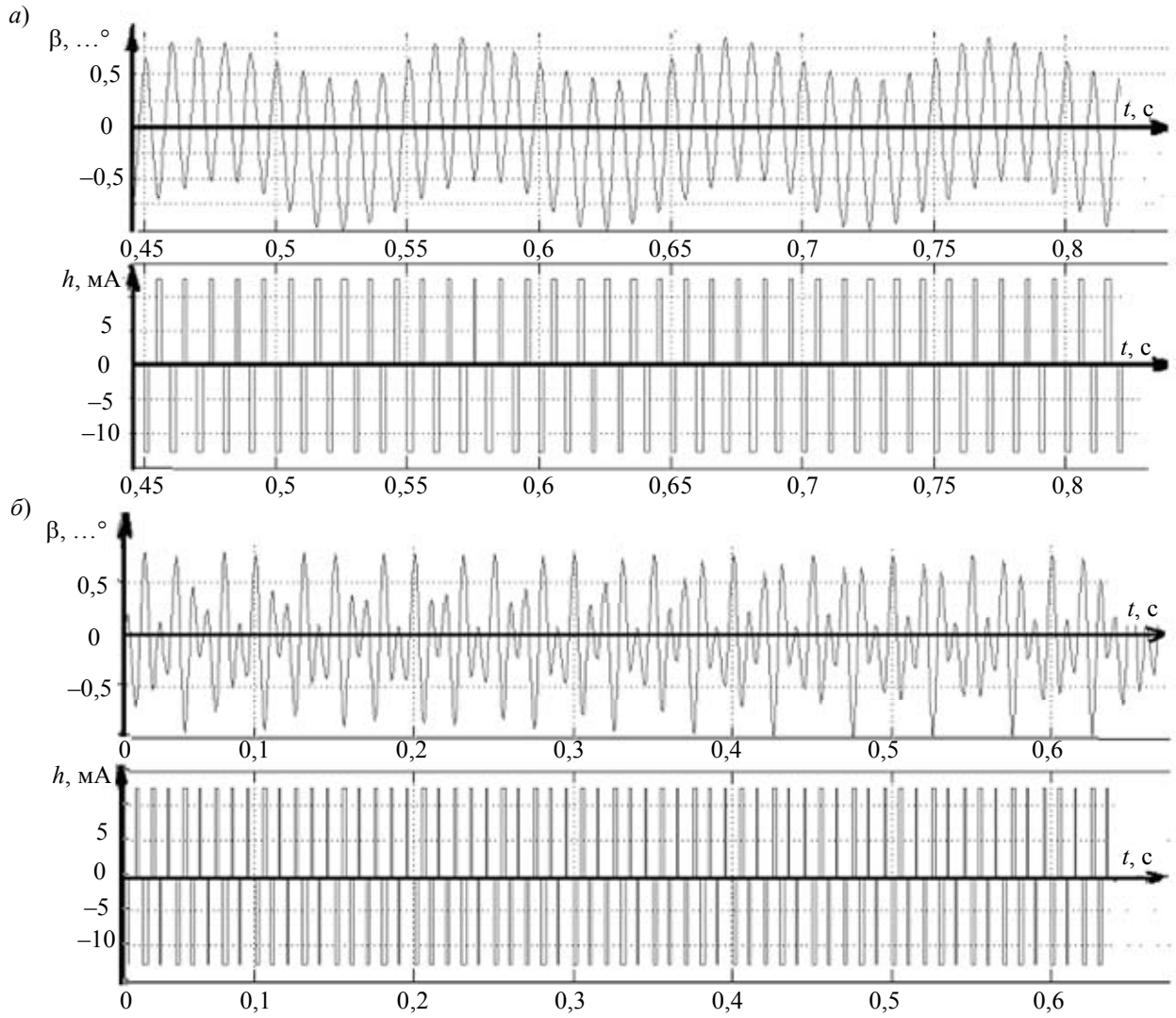


Рис. 4

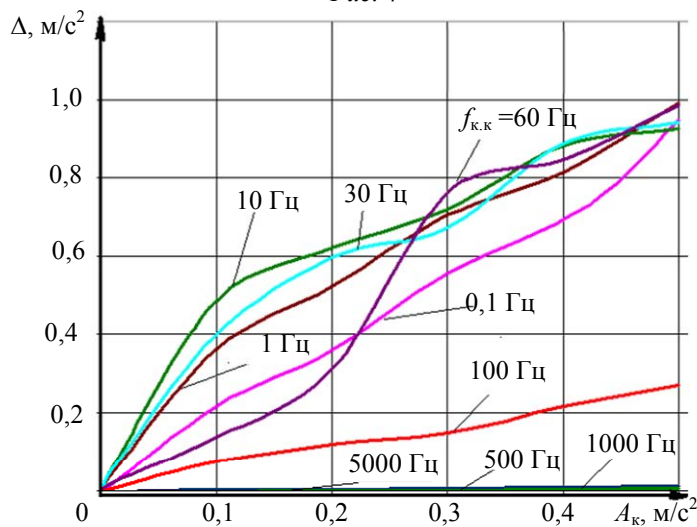


Рис. 5

Таким образом, на основании проведенных исследований функционирования акселерометра ЦЕ-199 в периодическом режиме с ШИМ-2 при влиянии внешних возмущений, а также

с учетом полученных результатов предлагается в качестве мер по минимизации влияния возмущений устанавливать акселерометр ЦЕ-199 к корпусу ЛА не жестко, а с помощью специальных демпферов. Демпферы позволяют существенно погасить колебания корпуса ЛА в области низких, средних и высоких частот. Полезная составляющая измеряемого сигнала определяется постоянной величиной или сверхнизкими частотами до 0,01 Гц, которые демпфер свободно пропускает. Качество измерений при этом стабильное и находится в рамках диапазона изменений метрологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 2003. Т. 1. С. 702—712.
2. Лучко С. В., Балувев С. Ю., Ватутин М. А., Рогачев В. А. Периодические режимы в системах автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией второго рода // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 12. С. 27—33.
3. Лучко С. В., Ватутин М. А., Трофимов И. А. Периодические режимы в автоматических системах с широтно-импульсной модуляцией // Там же. 2005. Т. 48, № 6. С. 67—73.
4. Лучко С. В. Расчет дискретных систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией. МО СССР, 1984. 112 с.
5. Кетков Ю., Кетков А. MATLAB 7. Программирование, численные методы. СПб: „БХВ — Петербург“, 2005. 737 с.

Сведения об авторах

- Сергей Викторович Лучко** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург
- Сергей Юрьевич Балувев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург;
E-mail: S.baluev@mail.ru
- Михаил Алексеевич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматики и электроники, Санкт-Петербург
- Игорь Сергеевич Гурьев** — д-р техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, научно-исследовательский отдел, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
бортовых информационных
измерительных комплексов
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
10.07.12 г.