

И. В. ФОМИНОВ, А. Н. МАЛЕТИН

## АЛГОРИТМ САМОНАСТРОЙКИ МАЯТНИКОВОГО АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Рассматривается алгоритм самонастройки маятникового компенсационного акселерометра, функционирующего в режиме автоколебаний, позволяющий уменьшить среднеквадратическую погрешность измерения кажущегося ускорения в условиях влияния высокочастотных периодических вибраций с априорно неопределенными параметрами.

*Ключевые слова:* маятниковый компенсационный акселерометр, вибрация, режим автоколебаний, самонастройка.

В настоящее время в России и за рубежом активно разрабатываются малые космические аппараты (КА), очевидным преимуществом которых является экономия затрат на их выведение. Решение задачи определения параметров движения центра масс КА при выполнении ими маневров возлагается на бортовые системы управления маневром. В качестве чувствительных элементов (ЧЭ) таких систем в большинстве случаев используются инерциальные датчики — акселерометры. Современные требования к миниатюризации систем управления КА не позволяют использовать традиционные крупногабаритные (сотни граммов) инерциальные измерители, а применение малогабаритных измерителей, чувствительный элемент которых выполнен по планарной технологии, невозможно вследствие невысоких показателей точности. В частности, малогабаритные инерциальные измерители характеризуются низкой чувствительностью к малым воздействиям.

Проведенные исследования [1, 2] инерциальных измерителей показали, что существенного повышения чувствительности и расширения диапазона измеряемых ускорений маятникового акселерометра компенсационного типа можно добиться путем искусственного введения его ЧЭ в режим автоколебаний посредством использования нелинейного звена типа „петля гистерезиса“ в цепи обратной связи. При этом ЧЭ совершает колебательные движения относительно центра динамического равновесия. При ускорении центр колебаний пропорционально смещается. В таком режиме знакопеременный сигнал на выходе нелинейного звена представляет собой меандр, обработка которого аналогична обработке в режиме с широтно-импульсной модуляцией. Величина, пропорциональная измеряемому кажущемуся ускорению, определяется следующим выражением:

$$\tilde{n} = \frac{n_{1i} - n_{2i}}{n_{1i} + n_{2i}},$$

где  $n_{1i}$  и  $n_{2i}$  — число импульсов, регистрируемых в течение интервала времени, при положительном и отрицательном значениях меандра соответственно.

В работах, посвященных автоколебательному режиму функционирования компенсационных измерителей [1, 2], не исследовалось влияние априорно неопределенных вибраций основания маятникового акселерометра на точность измерения кажущегося ускорения. С учетом того, что инерциальные измерители в современных системах управления крепятся непосредственно на корпусе КА и их ЧЭ находятся в условиях воздействия вибрации, изгибных колебаний и т.д., задача снижения погрешности, обусловленной периодическими высокочастотными возмущениями, представляется актуальной.

Для решения этой задачи предлагается использовать маятниковый акселерометр, функционирующий в режиме автоколебаний [1, 2], структурная схема которого приведена на рис. 1.

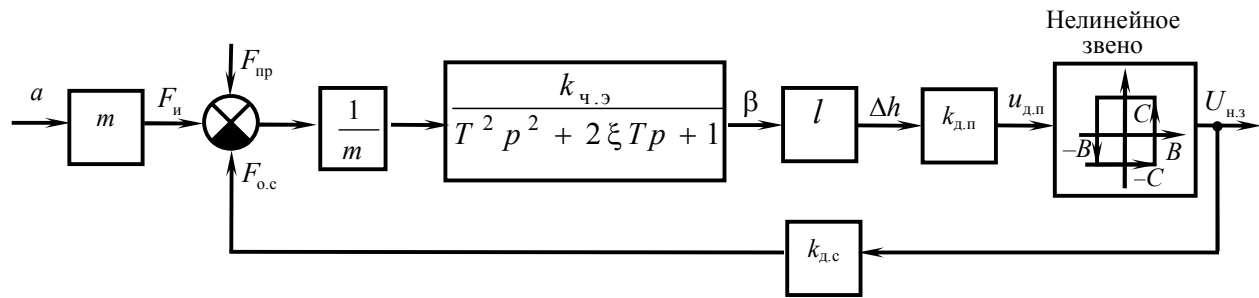


Рис. 1

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $a$  — истинное кажущееся ускорение;  $m$  — масса кремниевого ЧЭ;  $F_{и}$  — сила инерции, обусловленная кажущимся ускорением;  $F_{о.с}$  — сила цепи обратной связи, создающая компенсирующее воздействие;  $F_{пр}$  — прочие неучтенные силы;  $T$  — постоянная времени ЧЭ;  $\xi$  — относительный коэффициент демпфирования ЧЭ;  $k_{ч.э}$  — коэффициент передачи ЧЭ;  $\beta$  — угол отклонения ЧЭ;  $l$  — длина ЧЭ с торсионом;  $\Delta h$  — величина перемещения ЧЭ;  $k_{д.п}$  — коэффициент передачи датчика перемещения;  $u_{д.п}$  — напряжение, снимаемое с датчика перемещения [3];  $B$  — ширина „петли гистерезиса“ нелинейного звена;  $C$  — размах „петли гистерезиса“ нелинейного звена;  $U_{н.з} = [-C; C]$ ;  $k_{д.с}$  — коэффициент передачи магнитоэлектрического датчика силы.

Передаточная функция замкнутой системы маятникового акселерометра имеет следующий вид:

$$W_{м.а}(p) = \frac{k_{ч.э} l k_{д.п} \Phi(B, C)}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1 + k_{ч.э} l k_{д.п} \Phi(B, C) k_{д.с} / m}, \quad (1)$$

где  $\Phi(B, C)$  — линеаризованная функция, описывающая нелинейное звено.

Выражение (1) может быть приведено к передаточной функции второго порядка посредством гармонической линеаризации нелинейного звена [4]:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}, \quad (2)$$

где

$$k_1 = \frac{k_{ч.э} l k_{д.п} \Phi(B, C)}{1 + k_2 \Phi(B, C)}; \quad T_1 = \sqrt{\frac{T^2}{1 + k_2 \Phi(B, C)}}; \quad \xi_1 = \frac{\xi}{\sqrt{1 + k_2 \Phi(B, C)}}; \quad k_2 = k_{ч.э} l k_{д.п} k_{д.с} / m.$$

Как известно [4], фильтрующие свойства акселерометра можно определить по амплитудно-частотной характеристике

$$L(\omega) = |W_1(j\omega)| = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + 4\xi_1^2 T_1^2 \omega^2}},$$

где  $\omega$  — собственная частота замкнутой системы акселерометра.

Фильтрующие свойства проявляются при частоте  $\omega > 1/T_1$ , при этом, как видно из выражения (2), постоянная времени  $T_1$  зависит от параметров  $B, C$ . Эти свойства иллюстрирует

рис. 2, на котором представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики акселерометра для различных частот автоколебаний  $f_{ак}$ .

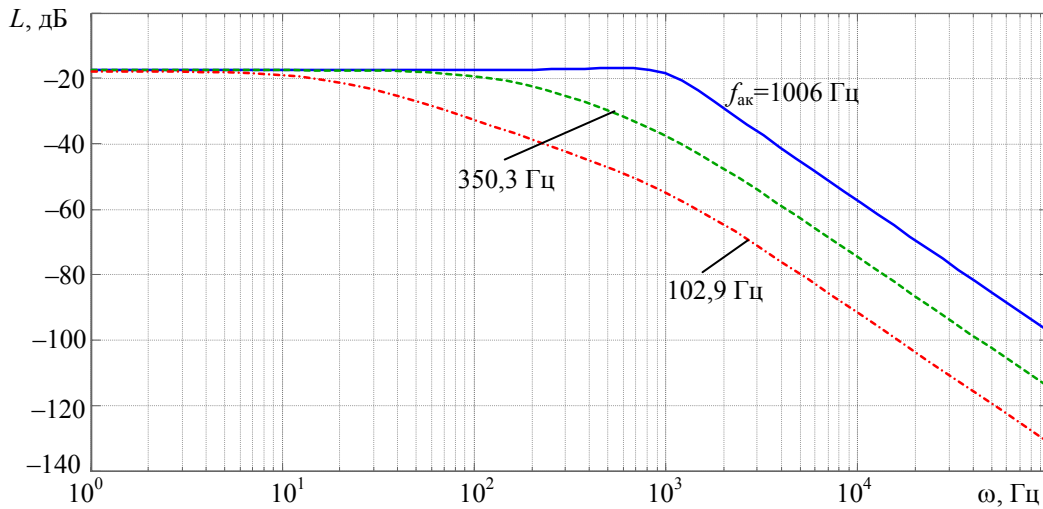


Рис. 2

Численное моделирование функционирования акселерометра в режиме автоколебаний (рис. 3) подтвердило снижение среднеквадратической погрешности  $\sigma_a$  измерения при частотах периодических возмущающих воздействий, намного превышающих значение частоты  $f_{ак} = 630$  Гц.

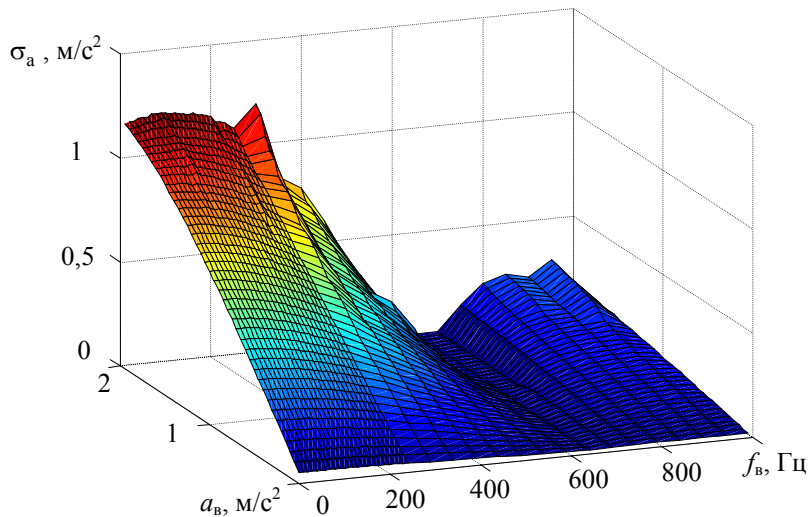


Рис. 3

Кроме того, при малой амплитуде вибрации  $a_b$  и кратном значении частоты автоколебаний значению частоты вибрации  $f_b$  фильтрующие свойства измерителя усиливаются.

В качестве исходных данных для решения задачи поиска оптимального значения параметра  $B_{опт}$  нелинейного звена, при котором достигается минимум  $\sigma_a$ , были приняты условия внешней среды и следующие параметры акселерометра:

- $\mathbf{Q} = [f_b, a_b]$  — множество возможных значений частоты и амплитуды вибрации основания;
- $\mathbf{P} = [m, T, \xi, k_{ч.э}, l, k_{д.п}, k_{д.с}]$  — вектор фиксированных параметров акселерометра;
- $\Omega_B$  — множество допустимых значений параметра  $B$ .

В общем случае сигнал, поступающий с выхода акселерометра, содержит истинное кажущееся ускорение и ошибку:

$$\tilde{n} = K(a + \Delta a),$$

где  $\tilde{n}$  — сигнал на выходе акселерометра;  $\Delta a$  — погрешность измерения, причем  $\sigma_a = f(\mathbf{Q}, B)$  — среднеквадратическая погрешность измерения, от которой зависит  $\Delta a$ ;

$$K = \frac{m}{k_{д.с} C} \text{ — коэффициент передачи акселерометра.}$$

Требуется минимизировать среднеквадратическую погрешность измерения  $\sigma_a$ , вызванную внешними вибрациями, путем автоматического подбора значения параметра  $B$ , соответствующего частоте автоколебаний  $f_{ак} = f_B / q$ , где  $q = [2, 3, 4 \dots]$ , с учетом того, что  $a_B \ll a$ . Иными словами, требуется найти

$$B_{опт} = \arg \min_{B \in \Omega_B} \sigma_a(\mathbf{Q})$$

при ограничениях на конструктивные параметры  $\mathbf{P}$  акселерометра и допустимые значения параметров  $B \in \Omega_B$ .

Для реализации решения было проведено численное моделирование функционирования акселерометра в режиме автоколебаний с учетом следующих значений его фиксированных параметров:  $m = 0,29 \cdot 10^{-3}$  кг,  $k_{ч.э} = 4,117 \cdot 10^{-3}$  с<sup>2</sup>/м,  $T = 4,636 \cdot 10^{-3}$  с,  $\xi = 16,323$ ,  $l = 5,086 \cdot 10^{-3}$  м,  $k_{д.п} = 2,5 \cdot 10^5$  В/м,  $k_{д.с} = 2,155 \cdot 10^{-3}$  Н/В.

На рис. 4 представлены графики, показывающие влияние значений параметров нелинейного звена на частоту и амплитуду автоколебаний ЧЭ акселерометра.

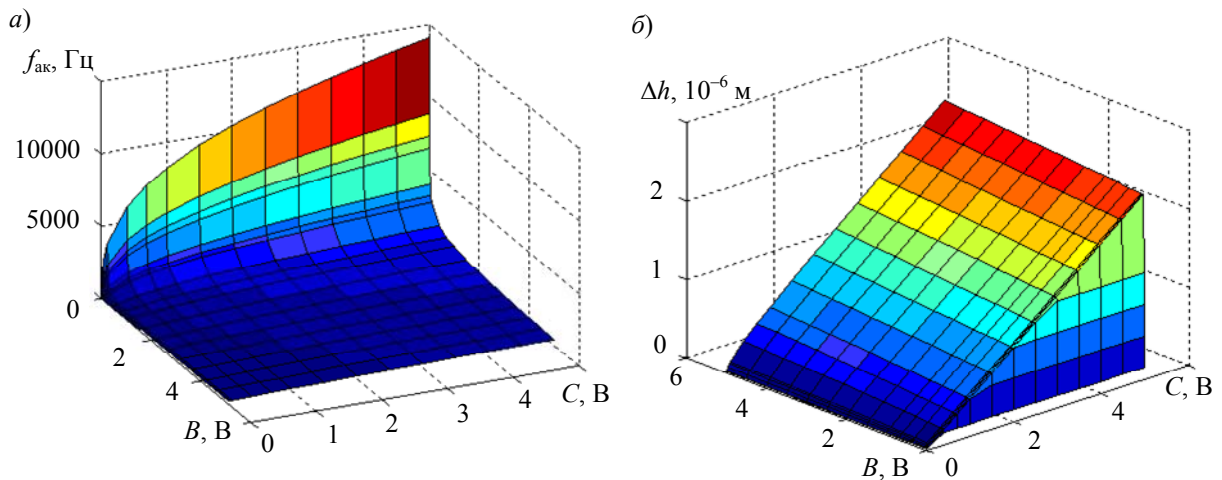


Рис. 4

Как видно из рис. 4, а, зависимость частоты автоколебаний  $f_{ак}$  от параметров  $B, C$  имеет нелинейный характер, при этом частота  $f_{ак}$  наиболее чувствительна к изменению параметра  $B$ . Параметр  $C$  влияет на жесткость отрицательной обратной связи и может быть использован для задания требуемого диапазона измерения. Существенным ограничением выбора значений параметров  $B$  и  $C$  является максимально допустимая величина перемещения ЧЭ  $\Delta h_{max}$ . График зависимости  $\Delta h(B, C)$  представлен на рис. 4, б.

Анализ представленных графиков показал, что для обеспечения требуемого значения частоты автоколебаний  $f_{ак}$  при ограничениях на их амплитуду  $\Delta h$  и заданный диапазон измерения можно найти такое оптимальное значение параметра  $B$ , при котором достигается минимум среднеквадратической погрешности измерения ускорения  $\min \sigma_a$ .

Рассмотрим алгоритм самонастройки маятникового акселерометра. Суть разработанного алгоритма может быть пояснена структурной схемой, представленной на рис. 5.

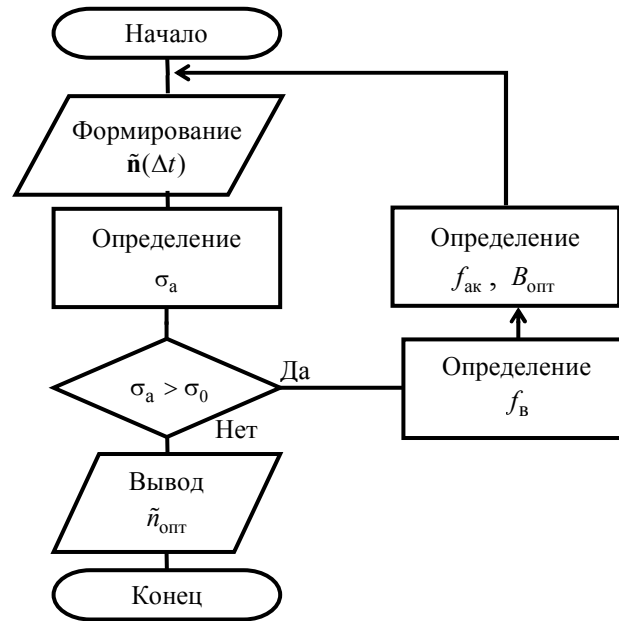


Рис. 5

Разработанный алгоритм включает в себя выполнение следующих операций.

1. Формирование массива значений  $\tilde{\mathbf{n}} = [\tilde{n}_1 \dots \tilde{n}_k]$  на выходе акселерометра в течение интервала времени  $\Delta t^j = t_k^j - t_0^j$ , где  $t_0^j$  — момент определения значения  $\tilde{n}_1$  в ходе  $j$ -го цикла измерений;  $t_k^j$  — момент определения значения  $\tilde{n}_k$  в ходе того же цикла измерений.

2. Определение среднеквадратической погрешности  $\sigma_a$  измерений значений массива  $\tilde{\mathbf{n}} = [\tilde{n}_1 \dots \tilde{n}_k]$ :

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\tilde{n}_i - \bar{\tilde{n}})^2}{k}}.$$

3. Определение нового значения параметра  $B$ , удовлетворяющего требованию  $B_{\text{опт}} = \arg \min_{B \in \Omega_B} \sigma_a(\mathbf{Q})$ , при условии превышения полученным значением  $\sigma_a$  некоторого допустимого значения  $\sigma_0$ . Задача поиска решается в несколько этапов:

- определение частоты вибрации  $f_v(\tilde{\mathbf{n}})$  на интервале времени  $\Delta t^j$ ;
- определение значения частоты автоколебаний, при котором будет происходить фильтрация высокочастотных возмущений:  $f_{\text{ак}} = f_v / k_{\text{кр}}$ ;
- определение оптимального значения  $B_{\text{опт}}$  на основе полученной экспериментальным путем зависимости  $B(f_{\text{ак}}, C)$  (см. рис. 4, а).

4. При  $\sigma_a < \sigma_0$  вычисление величины  $\tilde{n}_{\text{опт}}$ , пропорциональной входному ускорению.

Проведенные исследования показали, что уменьшение частоты автоколебаний ниже определенного критического значения приводит к снижению чувствительности акселерометра на временном интервале, равном периоду автоколебаний.

Следует отметить, что длительность самонастройки акселерометра составляет 1—2 периода автоколебаний, что при частоте в 1200 Гц соответствует тысячным долям секунды.

График изменения сигнала на выходе акселерометра (в размерности измеряемого ускорения) в режиме самонастройки показан на рис. 6.

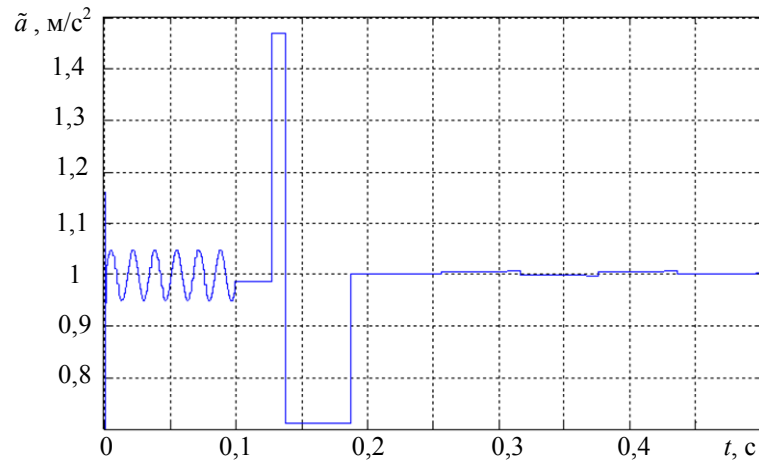


Рис. 6

Этот график получен в результате математического моделирования процесса функционирования автоколебательного маятникового акселерометра в режиме самонастройки. При этом в качестве входных воздействий задавались постоянное ускорение  $a=1 \text{ м/с}^2$ , вибрация с амплитудой  $a_b=0,05 \text{ м/с}^2$  и частотой  $f_b=60 \text{ Гц}$ . Результаты моделирования подтвердили уменьшение величины  $\sigma_a$  от  $\sigma_a=0,0239 \text{ м/с}^2$  до  $\sigma_a=0,0022 \text{ м/с}^2$ . Время самонастройки составило  $0,08 \text{ с}$ .

Рассмотренный алгоритм может быть применен к большинству компенсационных инерциальных измерителей параметров движения в условиях периодических воздействий, амплитуда и частота которых заранее неизвестны. Алгоритм самонастройки параметра нелинейного звена может быть реализован при помощи микроконтроллера, используемого в контуре обратной связи маятникового акселерометра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбаков В. И., Фоминов И. В. Способ измерения навигационных параметров подвижных объектов автоколебательными датчиками первичной информации. СПб: Военная академия связи, 2005. С. 240—244.
2. Рыбаков В. И., Фоминов И. В. Инерциальный блок измерения абсолютной угловой скорости КА // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 7. С. 37—43.
3. Распов В. Я. Микромеханические приборы: Учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
4. Бесекецкий В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб: Изд-во „Профессия“, 2004. 752 с.

#### Сведения об авторах

- Иван Вячеславович Фоминов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления, Санкт-Петербург;  
E-mail: jy79@rambler.ru
- Андрей Николаевич Малетин** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления, Санкт-Петербург;  
E-mail: maletin@bk.ru

Рекомендована кафедрой  
автономных систем управления

Поступила в редакцию  
28.03.11 г.