

УДК 629.7.054

## МЕТОД ПОКОМПОНЕНТНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АДАПТИВНОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ДАТЧИКА КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В РЕЖИМЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

© 2015 И. В. Фоминов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
г. Санкт-Петербург

Рассматривается актуальная задача параметрической оптимизации адаптивного инерциального датчика, способного к вариации параметров с целью снижения погрешностей, которые обусловлены влиянием нестационарных высокочастотных возмущающих воздействий. Разработан метод покомпонентной параметрической оптимизации, который позволяет варьировать параметры нелинейного звена инерциального датчика компенсационного типа, функционирующего в режиме автоколебаний. Апробация метода проведена на примере маятникового акселерометра. Проведённые численные исследования подтвердили возможность фильтрации внешних вибраций и внутренних шумов инерциального датчика с сохранением чувствительности в требуемом диапазоне измерения за счёт синтеза адаптивного контура на основе нелинейного звена типа «петля гистерезиса». Сущность метода основывается на параметрическом синтезе адаптивного контура с нелинейным звеном. Проведённые численные исследования показали, что погрешность маятникового акселерометра может быть снижена в среднем на порядок благодаря адаптивной настройке параметров нелинейного звена в зависимости от амплитуды внешних вибраций. Рассмотренный метод покомпонентной параметрической оптимизации может быть применён к большинству компенсационных инерциальных измерителей параметров движения космических аппаратов, функционирующих в условиях нестационарных внешних и внутренних возмущений. Контур адаптации в адаптивных инерциальных датчиках может быть реализован посредством применения современных микроконтроллеров.

*Адаптивный инерциальный датчик, маятниковый акселерометр, параметрическая оптимизация, режим автоколебаний, погрешности, внешние вибрации.*

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-92-100

### Введение

Одной из приоритетных задач отечественной космической отрасли является разработка, запуск и лётная эксплуатация маневрирующих космических аппаратов (КА), предназначенных, например, для решения задач обслуживания орбитальных объектов. Решение задачи определения параметров движения центра масс КА при выполнении манёвров возлагается на бортовые системы управления манёвром (СУМ). В качестве чувствительных элементов СУМ МКА, как правило, используются инерциальные датчики – акселерометры и датчики угловых скоростей, которые находятся в условиях вибрации и изгибных колебаний, поскольку крепятся непосредственно на корпусе КА. Исследования инерциальных измерителей, резуль-

таты которых приведены в работах [1, 2], показали, что существенного повышения чувствительности и расширения диапазона измеряемых ускорений маятникового компенсационного акселерометра (МА) можно добиться путём искусственного введения его чувствительного элемента (ЧЭ) в режим автоколебаний при помощи импульсной обратной связи. При этом ЧЭ совершает колебательные движения относительно центра динамического равновесия. Центр динамического равновесия смещается при появлении ускорения или под действием возмущающих сил и моментов. Знакопеременный сигнал на выходе нелинейного звена (НЗ) в таком режиме представляет собой меандр, обработка которого аналогична режиму с широтно-импульсной модуляцией. Величина,

пропорциональная измеряемому кажущемуся ускорению, определяется следующим выражением:

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

где  $n_{1i}$  – число импульсов за интервал времени при положительном значении меандра;  $n_{2i}$  – число импульсов за интервал времени при отрицательном значении меандра.

В работе [3] представлен алгоритм самонастройки маятникового акселерометра, функционирующего в режиме автоколебаний. Этот алгоритм обеспечивает нахождение оптимальных по критерию точности параметров нелинейного звена в цепи обратной связи, обусловленных вибрациями основания. В приведённом алгоритме введены допущения о гармоническом виде возмущений и отсутствии шума в измерительном тракте акселерометра, что в практических случаях выполняется не всегда.

В статье предложен метод покомпонентной параметрической адаптации инерциального датчика, который позволяет оптимизировать параметры нелинейного звена с учётом зашумлённости информационного сигнала с выхода акселерометра. Особенностью данного метода является применение быстрого преобразования Фурье для идентификации гармонической составляющей погрешности измерения на фоне возможных помех.

### Постановка задачи

Рассмотрим агрегированную модель инерциального датчика компенсационного типа, функционирующего в режиме автоколебаний:

$$S_d = \langle f_d(x, \Phi_x), f_{\text{ин}}(U_{\text{нз}}), f_{\text{ап}}(\tilde{x}, Z), f_{\text{нз}}(P_{\text{вар}}), P_{\text{вар}}, P_{\text{фик}} \rangle;$$

$$Z : B \times C \times f_a; \tilde{x} = x + \delta x(\Phi);$$

$$\delta x(\Phi) = \Delta x_0 + \Delta x_0(\Phi, P_{\text{вар}}) + v_x(P_{\text{вар}}),$$

где  $f_d(x, \Phi_x)$  – функция инерциального датчика;  $f_{\text{ин}}(U_{\text{нз}})$  – функция преобразова-

теля импульсов;  $f_{\text{ап}}(\tilde{x}, Z)$  – функция адаптивного регулятора;  $f_{\text{нз}}(P_{\text{вар}})$  – функция нелинейного звена типа «петля гистерезиса»;  $P_{\text{фик}}$  – множество фиксируемых параметров инерциального датчика;  $P_{\text{вар}}$  – множество варьируемых параметров инерциального датчика – параметров нелинейного звена;  $x$  – измеряемая физическая величина на входе инерциального датчика;  $\tilde{x}$  – результат измерений инерциального датчика;  $\delta x(\Phi)$  – погрешность измерений инерциального датчика;  $\Phi$  – высокочастотное возмущающее воздействие;  $\Delta x_0$  – систематическая погрешность инерциального датчика, определённая в нормальных условиях;  $\Delta x_0(\Phi)$  – квазисистематическая погрешность инерциального датчика, обусловленная влиянием возмущающего воздействия  $\Phi$ ;  $U_{\text{нз}}$  – выходной параметр нелинейного звена;  $Z$  – множество априорных данных, хранящихся в базе знаний;  $\{B, C\}$  – множество параметров нелинейного звена,  $\{B, C\} \in P_{\text{вар}}$ ;  $f_a$  – частота автоколебаний чувствительного элемента.

Требуется найти такие значения параметров и  $C$ , при которых  $\delta x$  достигает минимальных значений:

$$P_{\text{вар}}(\Delta t_a) = \arg \min_{P_{\text{вар}} \in \Omega_d} \delta x(P_{\text{вар}}, \Phi),$$

где  $\Delta t_a$  – интервал времени адаптации, необходимый для поиска оптимальных значений параметров  $P_{\text{вар}}$  и формирования их в нелинейном звене;  $\Omega_d$  – множество допустимых значений параметров нелинейного звена.

### Синтез адаптивного инерциального датчика

Из теории адаптивных систем известно [4], что синтез адаптивной системы осуществляется декомпозицией системы на основной контур (неадаптивный) и адаптивный контур (контур самонастрой-

ки). В этой связи целесообразно структуру адаптивного инерциального датчика, приведённую на рис. 1, условно разделить на основной контур и адаптивный контур, образованный преобразователем импульсов (ПИ), адаптивным регулятором (АР) и базой знаний (БЗ). В нижней части рис. 1 изображена схема преобразования сигнала на входе НЗ.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $F_{и}$  – сила инерции;  $F_{ос}$  – сила обратной связи;  $\beta$  – угол отклонения ЧЭ;  $u_{\beta}$  – сигнал с выхода датчика перемещения (ДП), пропорциональный углу перемещения;  $B$  – ширина «петли гистерезиса» НЗ;  $C$  – размах «петли гистерезиса» НЗ;  $A$  – актюатор (датчик силы).

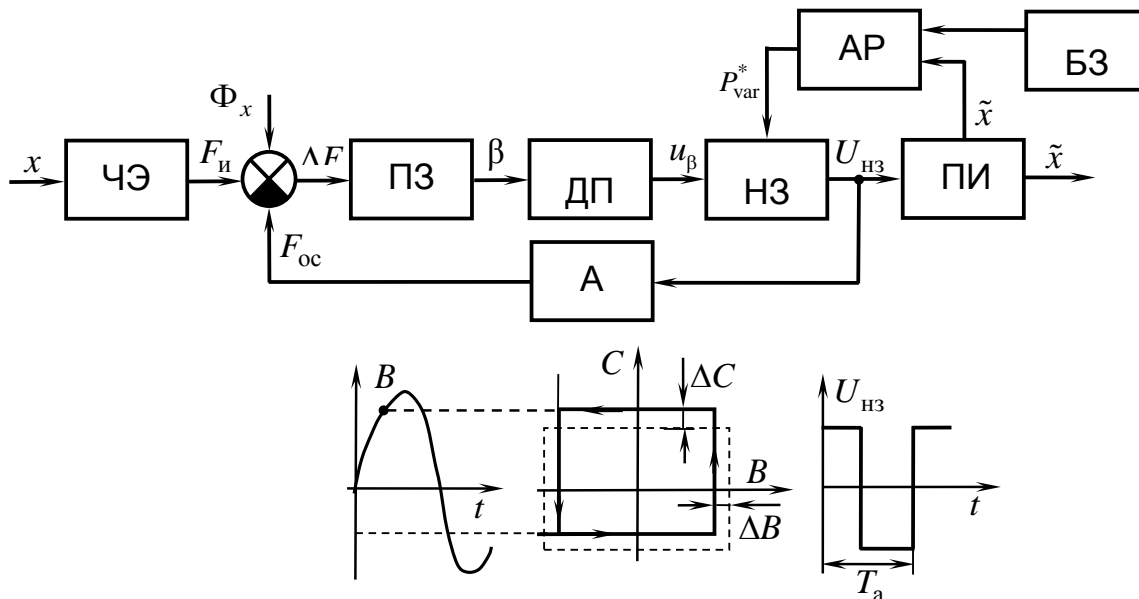


Рис. 1. Структура адаптивного инерциального измерителя

Параметрический синтез основного контура адаптивного инерциального измерителя как нелинейной системы проводится путём применения метода гармонической линеаризации [5]. В этом случае

$$W_{ма}(p) = \frac{k_{чэ} l k_{дп} f_{нз}(B, C)}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1 + k_{чэ} l k_{дп} f_{нз}(B, C) k_{дс} / m}, \quad (1)$$

где  $T$  – постоянная времени ЧЭ;  $\xi$  – относительный коэффициент демпфирования ЧЭ;  $k_{чэ}$  – коэффициент передачи ЧЭ;  $l$  – длина ЧЭ;  $\Delta h$  – величина перемещения ЧЭ;  $k_{дп}$  – коэффициент передачи ДП;  $k_{дс}$  – коэффициент передачи датчика силы;  $\Phi(B, C)$  – линеаризованная функция, описывающая НЗ.

Приведём выражение (1) к передаточной функции второго порядка посред-

передаточную функцию замкнутой системы инерциального датчика, функционирующего в режиме автоколебаний, можно представить в следующем виде:

ством гармонической линеаризации НЗ [5]:

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

где  $k_1 = \frac{k_{чэ} l k_{дп} \Phi(B, C)}{1 + k_{лч} \Phi(B, C)}$ ;

$$T_1 = \sqrt{\frac{T^2}{1 + k_{лч} \Phi(B, C)}};$$

$$\xi_1 = \frac{\xi}{\sqrt{1 + k_{лч} \Phi(B, C)}};$$

$$k_{лч} = k_{чз} l k_{дп} k_{дс} / m.$$

В этом случае фильтрующие свойства инерциального датчика по отношению к внешним высокочастотным воздействиям можно определить по амплитудно-частотной характеристике:

$$L(\omega) = |W_1(j\omega)| = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + 4\xi_1^2 T_1^2 \omega^2}}, \quad (3)$$

где  $\omega$  – собственная частота замкнутой системы.

Из выражения (3) видно, что свойства фильтрации внешних воздействий проявляются на частотах  $\omega > 1/T_1$ . Постоянная времени  $T_1$  зависит от параметров НЗ:  $B, C$ . Фильтрующие свойства инерциального датчика иллюстрирует рис. 2, на котором представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики для различ-

ных частот автоколебаний  $f_a$ , полученные экспериментальным путём по исходным данным, принятым в работе [6].

Снижение погрешностей инерциального датчика, обусловленных влиянием нестационарных внешних воздействий  $\Phi$ , возможно посредством формирования определённой частоты автоколебаний  $f_a$ . Результаты исследования влияния частоты автоколебаний  $f_a$  на среднеквадратическую погрешность  $\sigma_{вых}$ , обусловленную частотой вибрации  $f_{вибр}$  основания маятникового акселерометра, приведены на рис. 3.

Для снижения погрешностей, обусловленных нестационарными возмущающими факторами, разработан метод покомпонентной параметрической оптимизации параметров адаптивного инерциального датчика, сущность которого сводится к определению оптимальных значений варьируемых параметров нелинейного звена  $B$  и  $C$ , входящего в адаптивный контур.

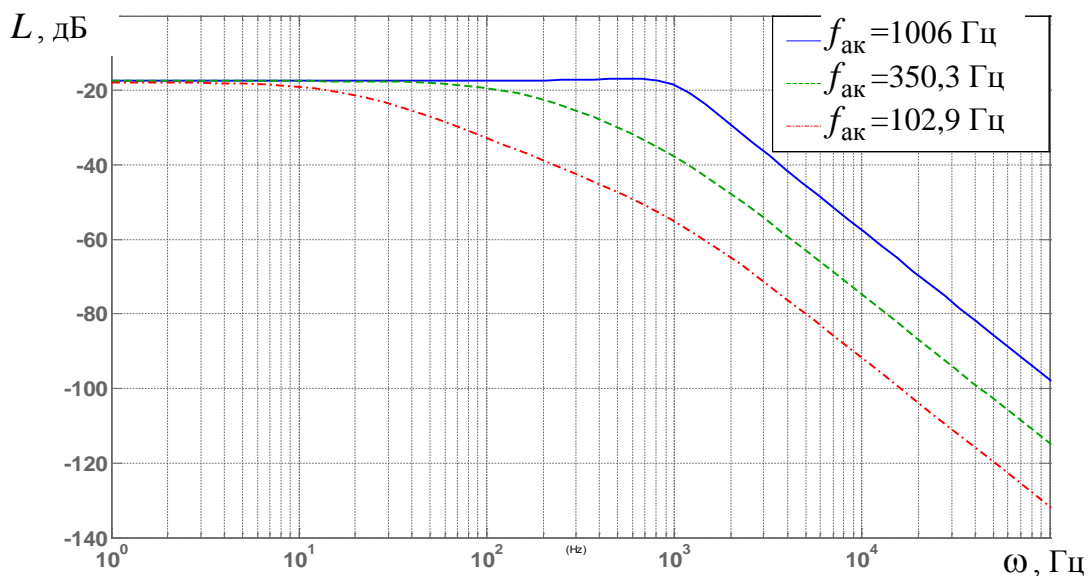


Рис. 2. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики инерциального датчика

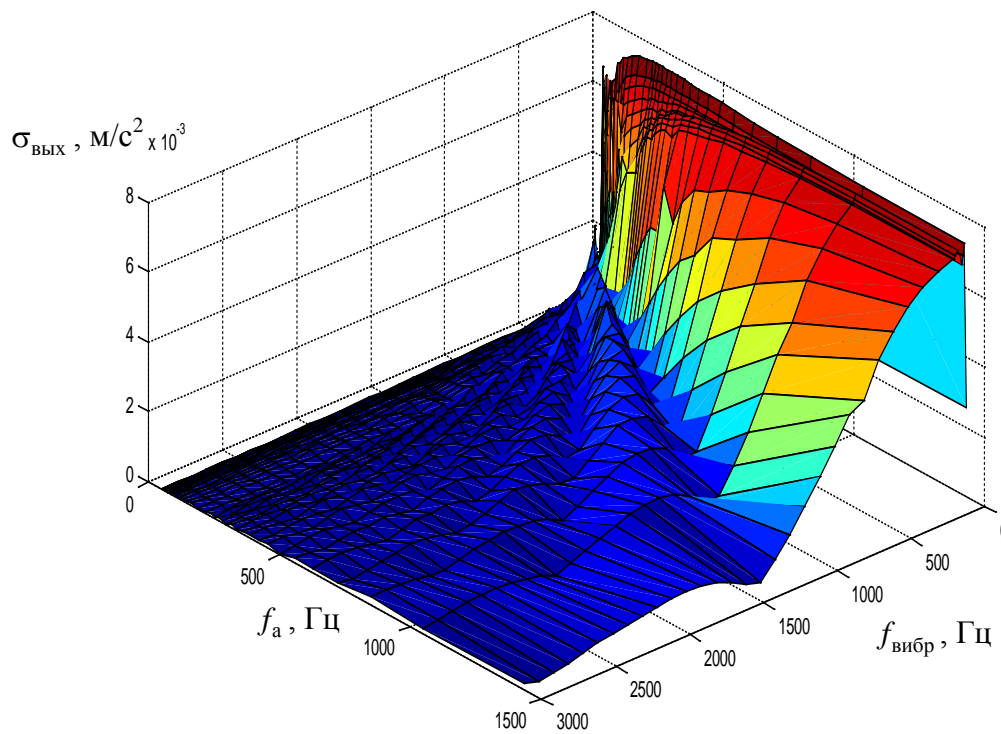


Рис.3. График зависимости влияния частот автоколебаний на погрешность измерения, обусловленную внешними вибрациями основания

Условием проведения адаптации инерциального датчика является необходимость малости и неизменности измеряемой величины:  $|x(t)| \leq x_{\text{доп}}, |\dot{x}(t)| \leq \dot{x}_{\text{доп}}$ .

Для акселерометров такие условия могут быть достигнуты в режиме пассивного орбитального полёта КА, в котором кажущиеся ускорения, как правило, не превышают значений  $10^{-5} g$ .

Алгоритм реализации метода имеет следующий вид:

1. Формируется массив выходных данных за время  $\Delta t$ :

$$\tilde{x}_{\Delta t_k} = \{\tilde{x}(t_k), \dots, \tilde{x}(t_k + \Delta t)\}, k = \overline{1, K}.$$

2. Производится стохастический анализ массива  $\tilde{x}_{\Delta t_k}$  и вычисление математического ожидания  $M[\tilde{x}_{\Delta t_k}]$ , среднеквадратического отклонения  $\sigma[\tilde{x}_{\Delta t_k}]$  и значений частот в выходных данных  $f_{\text{вых}}[\tilde{x}_{\Delta t_k}] = L(\tilde{x}_{\Delta t_k})$ , где  $L(\tilde{x}_{\Delta t_k})$  – оператор быстрого преобразования Фурье.

3. Определяется требуемая частота автоколебаний  $f'_a$ , при которой будет соблюдаться условие инвариантности:  $f_{\text{вых}}(f_{\text{вibr}}, f'_a) = 0$ . В результате анализа экспериментальных исследований эмпирическим путём получено выражение  $f_{\text{вых}} = |f_{\text{вibr}} - \chi f'_a|$ ,  $\chi \in N$ , позволяющее утверждать, что для инвариантности погрешности, обусловленной влиянием вибраций, необходимо, чтобы частота автоколебаний  $f_a$  была кратна частоте внешних вибраций  $f_{\text{вibr}}$ . При этом значение показателя кратности  $\chi$  задаётся исходя из близости значения начальной частоты автоколебаний  $f_{a0}(B_0, C_0)$ , рассчитанной до проведения адаптации, к требуемой частоте автоколебаний  $f'_a$ .

4. Решается задача фильтрации внешних возмущающих факторов путём определения нового значения параметра  $B_{k+1}$  из множества  $Z: B \times C \times f_a$ , при кото-

ром достигается минимум частоты  $f_{\text{вых}}$ :  $f_{\text{вых}} \rightarrow 0$ .

5. Формируется новое значение параметра  $B$  в соответствии с рекуррентным соотношением  $B_{k+1} = B_k + \lambda_k \Delta B_0$  до достижения условия  $f_{\text{вых}} \approx 0$ , где

$$\lambda_k = \frac{\Delta f_{\text{вых}}(\Delta t_k)}{\Delta f_a(\Delta t_k)}, \Delta B_0 \in \Omega_{\Delta B}.$$

6. Проводится стохастический анализ последней реализации  $\tilde{x}_{\Delta t_{k+1}}$  и определяется её квазисистематическая составляющая погрешности измерения, равная в данных условиях математическому ожиданию  $\Delta \tilde{x} = M[\tilde{x}_{\Delta t_{k+1}}]$ .

7. Производится компенсация квазисистематической составляющей погрешности путём формирования значения параметра  $C_{k+1}$  в соответствии с формулой  $C_{k+1} = C_k(1 + \Delta \tilde{x})$ .

Апробация метода проведена путём численного моделирования процесса функционирования маятникового акселерометра в режиме автоколебаний с учётом

следующих значений его фиксированных параметров:

$$m = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ кг}, k_{\text{чз}} = 4,117 \cdot 10^{-3} \text{ с}^2/\text{м},$$

$$T = 4,636 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \xi = 16,323,$$

$$l = 5,086 \cdot 10^{-3} \text{ м}, k_{\text{дп}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ В/м},$$

$$k_{\text{дс}} = 2,155 \cdot 10^{-3} \text{ Н/В}.$$

Результаты исследования влияния значений параметров НЗ на частоту и амплитуду автоколебаний показаны на рис. 4.

Из рис. 4, а видно, что зависимость частоты автоколебаний  $f_a$  от параметров  $B, C$  имеет нелинейный характер. При этом частота автоколебаний  $f_a$  наиболее чувствительна к изменению параметра  $B$ . Параметр  $C$  влияет на жёсткость 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  $\Delta h_{\text{max}}$ . График зависимости  $\Delta h$  от параметров НЗ представлен на рис. 4, б.

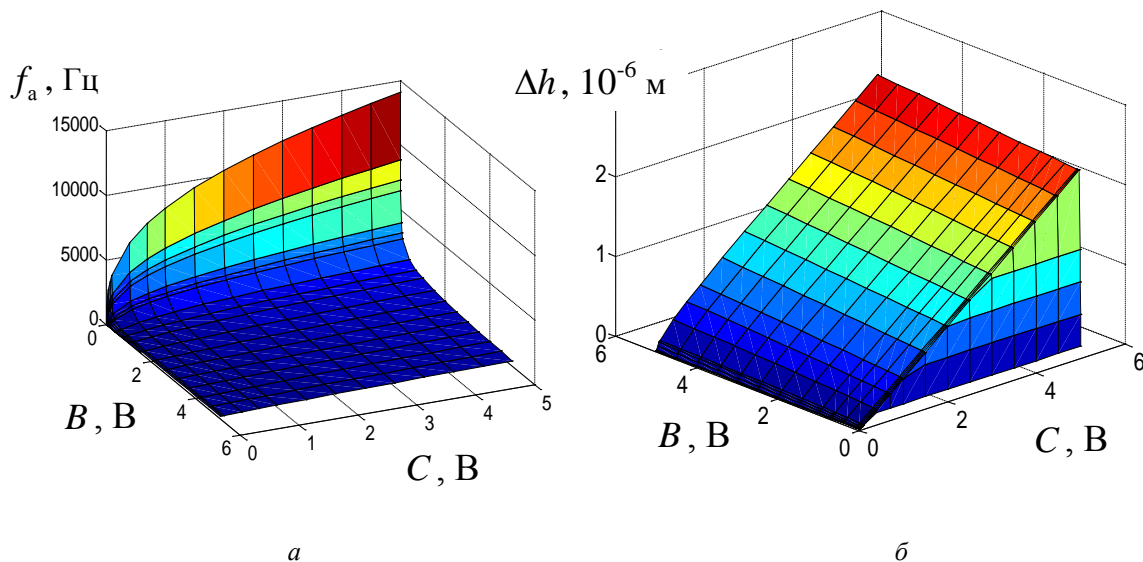


Рис. 4. Графики зависимостей частоты  $f_a$  и амплитуды  $\Delta h$  автоколебаний ЧЭ от параметров нелинейного звена маятникового акселерометра

Анализ представленных на рис. 4 графиков показал, что для обеспечения требуемой частоты автоколебаний  $f'_a$  при ограничениях на их амплитуду  $\Delta h$  и заданный диапазон измерения существует такое оптимальное значение параметра  $B$ , при котором достигается минимум среднеквадратической ошибки (СКО) измерения ускорения  $\min \sigma_a$ .

Проведённые исследования показывают, что уменьшение частоты автоколебаний ниже определённого критического значения приводит к снижению информативности выходного сигнала за временной интервал, равный периоду автоколебаний. Длительность адаптации составляет 1-2 периода автоколебаний, что при частоте в 1200 Гц соответствует тысячным долям секунды (рис. 5).

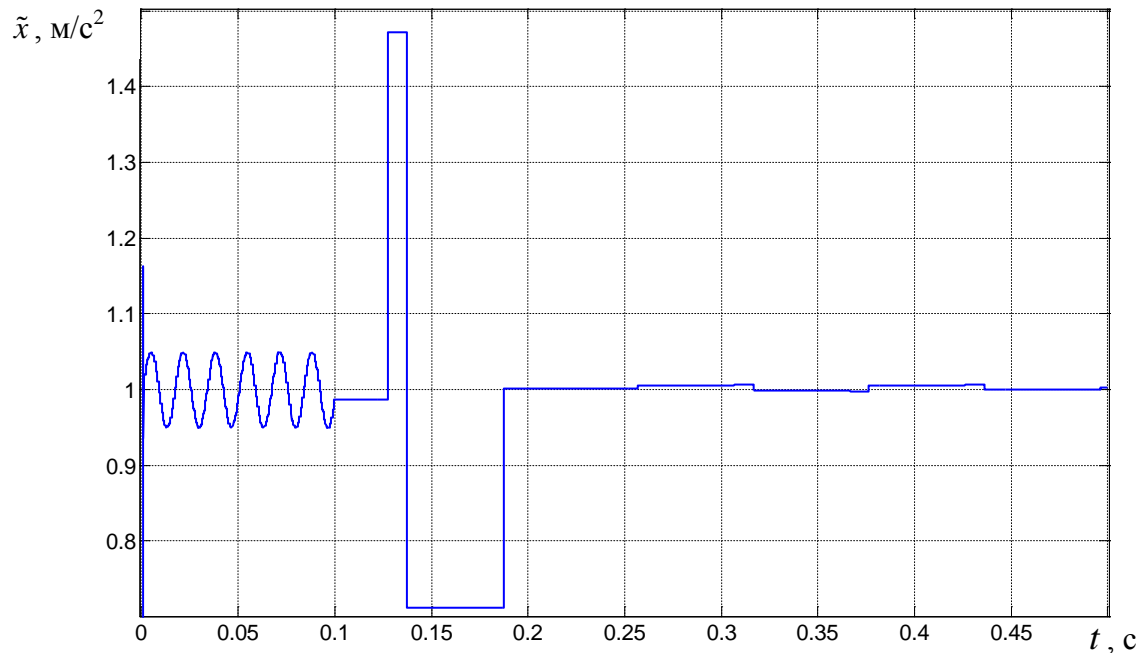


Рис. 5. График реализации выходной характеристики в процессе адаптации

Результаты математического моделирования процесса функционирования адаптивного маятникового акселерометра подтвердили снижение СКО погрешности с  $\sigma_a = 0.0239$  м/с<sup>2</sup> до  $\sigma_a = 0.0022$  м/с<sup>2</sup>. При этом в качестве входных воздействий задавались постоянное ускорение  $a = 1$  м/с<sup>2</sup>, вибрация с амплитудой  $a_{\text{вибр}} = 0,05$  м/с<sup>2</sup> и частотой  $f_{\text{вибр}} = 60$  Гц. Время на проведение самонастройки составило 0,08 с.

### Заключение

Рассмотренный метод покомпонентной параметрической оптимизации может быть применён к большинству компенсационных инерциальных измерителей параметров движения, функционирующих в условиях нестационарных внешних и внутренних возмущений. Контур адаптации в адаптивных инерциальных датчиках может быть реализован посредством применения современных микроконтроллеров.

### Библиографический список

1. Рыбаков В.И., Фоминов И.В. Способ измерения навигационных параметров подвижных объектов автоколебательными датчиками первичной информации. СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2005. С. 240–244.
2. Рыбаков В.И., Фоминов И.В. Инерциальный блок измерения абсолютной угловой скорости КА // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 7. С. 37–43.
3. Фоминов И.В., Малетин А.Н. Алгоритм самонастройки маятникового автоколебательного акселерометра при воз-
- действии периодических возмущений // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 9. С. 28–33.
4. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990. 296 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб: Профессия, 2004. 752 с.
6. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.

### Информация об авторе

**Фоминов Иван Вячеславович**, кандидат технических наук, докторант кафедры автономных систем управления, ВКА имени А.Ф. Можайского. E-mail:

[i.v.fominov@gmail.com](mailto:i.v.fominov@gmail.com). Область научных интересов: системы навигации и управления движением космических аппаратов.

### METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF EACH COMPONENT OF ADAPTIVE COMPENSATING INERTIAL SENSORS OPERATING IN A SELF-OSCILLATION MODE

© 2015 I. V. Fominov

Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy,  
St. Petersburg, Russian Federation

The paper deals with a crucial task of parametric optimization of an adaptive inertial sensor capable of varying the parameters in order to reduce errors which are caused by the influence of high-frequency transient disturbances. A method of parametric optimization of each component that makes it possible to vary the parameters of the nonlinear element of a compensating inertial sensor operating in the self-oscillation mode is developed. The method was tested with a pendulous accelerometer taken as an example. Numerical investigations confirmed the possibility of filtering external vibrations and internal noise of the inertial sensor while maintaining its sensitivity in the required measuring range due to the synthesis of the adaptive loop based on a non-linear element of the "hysteresis loop" type. The essence of the method is based on parametric synthesis of the adaptive loop with a nonlinear element. Numerical investigations show that the error of the pendulous accelerometer can be reduced, on the average, by an order of magnitude thanks to the adaptive parameter setting of the non-linear element, depending on the amplitude of the external vibrations. The above method of parametric optimization of each component can be applied to most compensating inertial sensors measuring motion parameters of spacecraft operating in conditions of non-stationary external and internal disturbances. The adaptation circuit in adaptive inertial sensors can be implemented through the use of modern microcontrollers.

*Adaptive inertial sensor, pendulous accelerometer, parametric optimization, self-oscillation mode, error, external vibration.*



### References

1. Rybakov V.I., Fominov I.V. *Sposob izmereniya navigatsionnykh parametrov podvizhnykh ob"ektov avtokolebatelnymi datchikami pervichnoy informatsii* [Method of measuring navigation parameters of moving objects by self-oscillating sensors]. Spb.: Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy Publ., 2005. P. 240–244.
2. Rybakov V.I., Fominov I.V. Inertial Device for Measurement of Absolute Angular Rate of a Space Vehicle. *Izvestia vuzov. Priborostroenie*. 2006. V. 49, no.7. P. 37–43. (In Russ.)
3. Fominov I.V., Maletin A.N. Algorithm of self-adjustment of pendulous auto-oscillating accelerometer under the influence of high-frequency periodic disturbances. *Izvestia vuzov. Priborostroenie*. 2011. V. 54, no. 9. P. 28–33. (In Russ.)
4. Fradkov A.L. *Adaptivnoe upravlenie v slozhnykh sistemakh* [Adaptive control in complex systems]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 296 p.
5. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya system avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. SPb.: Professiya Publ., 2004. 752 p.
6. Raspopov V.Y. *Mikromekhanicheskie pribory: uchebnoe posobie* [Micromechanical devices: study guide]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p.

### About the author

**Fominov Ivan Vyacheslavovich**, Candidate of Science (Engineering), doctoral student, Department of Autonomous Control Systems, Military Space Academy named after A.F.

Mozhaiskiy, St. Petersburg, Russian Federation. E-mail: [i.v.fominov@gmail.com](mailto:i.v.fominov@gmail.com). Area of Research: navigation and control of spacecraft motion.