

**МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА**

С. В. ЛУЧКО¹, М. А. ВАТУТИН¹, С. Ю. БАЛУЕВ¹, А. Б. ПЕТУХОВ¹,
М. П. БУЯНКИН¹, А. И. КЛЮЧНИКОВ^{1,2}

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vatutinm@inbox.ru

²1-й Государственный испытательный космодром, г. Мирный, Архангельская обл., Россия

Рассматривается методика идентификации параметров линейной части акселерометра, чувствительный элемент которого работает в автоколебательном режиме. Идентификация осуществляется путем задания значений параметров нелинейного звена, по которым, посредством измерения частоты автоколебания, определяются параметры линейной части акселерометра.

Ключевые слова: датчики, автоколебательный режим, погрешность измерения ускорения, акселерометр

В маятниковых акселерометрах компенсационного типа в качестве чувствительного элемента используется подвижная масса. Одним из способов повышения чувствительности таких датчиков первичной информации, выпускаемых серийно, является режим автоколебаний [1], реализуемый путем введения в схему нелинейного звена [2]. В качестве нелинейного звена используется релейное двухпозиционное звено с гистерезисом, гарантированно обеспечивающее автоколебания.

Идентификация параметров акселерометров, работающих в автоколебательном режиме, необходима для метрологического контроля градуировочной характеристики акселерометра. Для этого требуется знать параметры линейной части акселерометра, к которым относятся:

- коэффициент передачи линейной части $k_{л}$;
- постоянная времени подвижной части T_1 ;
- коэффициент затухания подвижной части ξ ;
- коэффициент передачи нелинейного звена $k_{н}$.

Коэффициент передачи линейной части, в свою очередь, равен

$$k_{л} = k_{п} k_{ДУ} k_{УП} k_{ДМ},$$

где $k_{п}$ — коэффициент передачи подвижной части, $k_{ДУ}$ — коэффициент передачи датчика угла, $k_{УП}$ — коэффициент передачи усилителя преобразователя, $k_{ДМ}$ — коэффициент передачи датчика момента.

Коэффициент передачи нелинейного звена [3]

$$k_{н} = \frac{2c}{\pi\sqrt{a^2 - b^2}},$$

где a — амплитуда сигнала на выходе линейной части, b — половина ширины зоны нечувствительности нелинейного звена, c — напряжение на его выходе.

В некоторых случаях значения линейных параметров приводятся в паспортных данных штатных акселерометров и их можно использовать как базовые для построения автоколебательных акселерометров. В режиме автоколебаний указанные параметры могут существенно отличаться от штатных, прежде всего из-за вибрационного сглаживания сопутствующих нелинейностей. Сглаживаются также и нелинейности, имеющие достаточно протяженный

линейный участок [1], в результате чего уменьшаются их коэффициенты передачи на линейных участках.

При идентификации параметров линейных звеньев и систем обычно используют внешние тестовые (пробные) сигналы в виде ступенчатой функции или гармонического воздействия. Для нелинейных систем такие сигналы являются малоинформативными, так как протекающие в этих системах процессы зависят от степени и характера изменения внешних воздействий.

В автоколебательных нелинейных системах тестовым сигналом могут служить собственные устойчивые периодические колебания. Измеренные значения их амплитуды и частоты являются источником информации для определения параметров. Разрабатываемая методика идентификации основана именно на этом свойстве нелинейных систем.

Эта методика [3] заключается в том, что вначале при заданных предварительно значениях параметров нелинейного звена c и b в процессе натурных испытаний автоколебательно акселерометра измеряются значения амплитуды и частоты автоколебаний. Затем вычисляются значения коэффициентов гармонической линеаризации и по формулам, связывающим модули и аргументы линейной и нелинейной частей, определяются параметры линейной части. Одновременно уточняется значение коэффициента передачи нелинейного звена. На заключительном этапе с целью уточнения производятся контрольные измерения.

Для автоколебательного акселерометра вначале идентифицируются параметры k_n , T_1 и ξ . Для этого достаточно произвести два измерения частоты при различных значениях параметров c и b . В результате определяются две пары амплитуд и частот автоколебаний: (A_1, Ω_1) и (A_2, Ω_2) .

Если параметры c и b заданы так, что выполняется условие $a > 3b$, то амплитуда автоколебаний практически не зависит от медленно изменяющейся составляющей и можно использовать коэффициенты гармонической линеаризации

$$q = \frac{4c}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \quad q' = \frac{4cb}{\pi a^2}, \quad a \geq b. \quad (1)$$

Подставив в (1) экспериментально полученные значения A_1 при $c=c_1$, $b=b_1$ и A_2 при $c=c_2$, $b=b_2$, получим

$$q_1 = \frac{4c_1}{\pi A_1} \sqrt{1 - \frac{b_1^2}{A_1^2}}, \quad q_1' = -\frac{4c_1 b_1}{\pi A_1^2};$$

$$q_2 = \frac{4c_2}{\pi A_2} \sqrt{1 - \frac{b_2^2}{A_2^2}}, \quad q_2' = -\frac{4c_2 b_2}{\pi A_2^2}.$$

Для определения коэффициента передачи линейной части системы k_n используем два выражения [3]:

$$2\xi T_1 \omega + k_n q' = 0, \quad T_1^2 \omega^2 = 1 + k_n q, \quad (2)$$

где ω — круговая частота.

Согласно выражениям (2)

$$\frac{\Omega_1^2}{\Omega_2^2} = \frac{1 + k_n q_1}{1 + k_n q_2},$$

тогда

$$k_n = \frac{\Omega_2^2 - \Omega_1^2}{q_2 \Omega_1^2 - q_1 \Omega_2^2}. \quad (3)$$

Постоянная времени T_1 при уже известном значении $k_{\text{л}}$ определяется из второго выражения (2):

$$T_1^2 = \frac{1 + k_{\text{л}}q_1}{\Omega_1^2} = \frac{1 + k_{\text{л}}q_2}{\Omega_2^2},$$

откуда с учетом формулы (3)

$$T_1^2 = \frac{q_2 - q_1}{q_2\Omega_1^2 - q_1\Omega_2^2}.$$

Коэффициент затухания ξ определяется из первого выражения (2):

$$\xi = -\frac{k_{\text{л}}q'_1}{2\Omega_1T_1} = -\frac{k_{\text{л}}q'_2}{2\Omega_2T_1},$$

где $q' < 0$.

Для контроля корректности результатов измерений используется соотношение между амплитудами и частотами автоколебаний:

$$\frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{q'_1}{q'_2} = \frac{c_1b_1A_2^2}{c_2b_2A_1^2}$$

или

$$\frac{A_1^2\Omega_1}{A_2^2\Omega_2} = \frac{c_1b_1}{c_2b_2}.$$

Для более точного определения параметров целесообразно дополнительно произвести измерения при $c = c_3$, $b = b_3$, определив A_3 и Ω_3 .

Результаты идентификации параметров линейной части переведенного в автоколебательный режим штатного акселерометра ЦЕ-199 при $c = 5,8$ В и трех значениях b (при $k_{\text{л}} \approx 6$, $T_1 \approx 2,7 \cdot 10^{-3}$ с, $\xi \approx 0,13$) приведены в таблице.

b , В	A , В	Ω , с ⁻¹	q	q'
0,5	8,4	$0,9 \cdot 10^3$	0,88	-0,05
1,1	9,8	$0,84 \cdot 10^3$	0,75	-0,08
2,0	12,5	$0,76 \cdot 10^3$	0,58	-0,09

В процессе натуральных испытаний определяется коэффициент передачи нелинейного звена по медленно изменяющейся составляющей

$$u_1^0 = \frac{k_{\text{л}}k_{\text{н}}}{1 + k_{\text{л}}k_{\text{н}}}(k_a a_{\text{вх}} + M_{\text{в}}),$$

где k_a — коэффициент передачи по входному ускорению $a_{\text{вх}}$, $M_{\text{в}}$ — момент возмущающих воздействий.

Значение $k_{\text{н}}$ зависит от амплитуды автоколебаний: так, при $A = 8,4$ В коэффициент $k_{\text{н}} \approx 0,44$, а при $A = 12,5$ В $k_{\text{н}} \approx 0,3$. Если $A \gg b$, то

$$k_{\text{н}} \approx \frac{2c}{\pi A}, \quad A \gg b.$$

При медленно изменяющейся составляющей u_1^0 коэффициент передачи разомкнутой системы $k = k_{\text{л}}k_{\text{н}}$. Например, при $A = 12,5$ В значение $k = 6 \cdot 0,3 = 1,8$; тогда в замкнутой системе $k_0 \approx 0,6$, $T_0 \approx 1,6 \cdot 10^{-3}$ с, $\xi_0 \approx 0,08$.

Коэффициент передачи по ускорению $k_a = ml$ известен при заданных массе m и плече l . Коэффициент передачи датчика угла $k_{\text{ДУ}}$ в режиме автоколебаний отдельно определить невозможно, а коэффициент передачи датчика момента $k_{\text{ДМ}}$ можно определить путем более сложных косвенных измерений.

Зная величину амплитуды автоколебаний на входе нелинейного звена, проверяем выполнение условия по максимальному значению угла отклонения подвижной части $|\beta| \leq \beta_{\max}$, а медленно изменяющееся значение угла отклонения β^0 определяем по формуле

$$\beta^0 = \frac{k_{\Pi} (k_a a_{\text{вх}} + M_{\text{в}})}{1 + k},$$

где коэффициент передачи разомкнутой системы $k = k_{\Pi} k_{\text{ДУ}} k_{\text{ДМ}} k_{\text{УП}} k_{\text{Н}}$.

Представленную методику идентификации параметров можно использовать для широкого класса приборов, измеряющих различные физические величины и использующих в качестве чувствительного элемента подвижную массу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучко С. В., Ватутин М. А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 62—66.
2. Лучко С. В., Балувев С. Ю., Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Ключников А. И., Ефимов В. П. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43—46.
3. Лучко С. В. Теория автоматического управления. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. 378 с.

Сведения об авторах

- Сергей Викторович Лучко** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов
- Михаил Алексеевич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов; E-mail: vatutinm@inbox.ru
- Сергей Юрьевич Балувев** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов; E-mail: S.baluev@mail.ru
- Андрей Борисович Петухов** — ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов; преподаватель; E-mail: andrey_11_75@mail.ru
- Михаил Петрович Буянкин** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов; E-mail: asber@mail.ru
- Алексей Игоревич Ключников** — 1-й Государственный испытательный космодром, г. Мирный; ст. инженер-испытатель; ВКА им. А. Ф. Можайского, соискатель; E-mail: zxcvbn701@yandex.ru

Рекомендована кафедрой бортовых информационных и измерительных комплексов

Поступила в редакцию 18.07.16 г.

Ссылка для цитирования: Лучко С. В., Ватутин М. А., Балувев С. Ю., Петухов А. Б., Буянкин М. П., Ключников А. И. Методика идентификации параметров автоколебательного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 251—255.

METHOD OF IDENTIFYING PARAMETERS OF SELF-OSCILLATION ACCELEROMETER

S. V. Luchko¹, M. A. Vatutin¹, S. Yu. Baluev¹, A. B. Petukhov¹,
M. P. Buyankin¹, A. I. Klyuchnikov^{1,2}

¹ A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: vatutinm@inbox.ru

² 1st State Test Spaceport, Mirny, Arkhangelsk Region, Russia

A technique is considered for identification of parameters of linear part of accelerometer with sensing element operating in self-oscillation mode. The identification is carried out by setting the known values of the parameters of the nonlinear element; the parameters of the linear part of the accelerometer is then determined by measuring the frequency of oscillations for given values of the parameters of the nonlinear unit.

Keywords: sensor, self-oscillation mode, acceleration measurement error, accelerometer

Data on authors

- Sergey V. Luchko** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measurement Complexes
- Mikhail A. Vatutin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measurement Complexes; E-mail: vatutinm@inbox.ru
- Sergey Yu. Baluev** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measurement Complexes; E-mail: S.baluev@mail.ru
- Andrey B. Petukhov** — A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measurement Complexes; Lecturer; E-mail: andrey_11_75@mail.ru
- Mikhail P. Buyankin** — Adjunct; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measurement Complexes; E-mail: asber@mail.ru
- Alexey I. Klychnikov** — 1st State Test Spaceport, Mirny; Senior Engineer-Tester; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Applicant; E-mail: zxcvbn701@yandex.ru

For citation: Luchko S. V., Vatutin M. A., Baluev S. Yu., Petukhov A. B., Buyankin M. P., Klychnikov A. I. Method of identifying parameters of self-oscillatory accelerometer // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 3. P. 251—255 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-251-255