

В.А. Голубков¹, В.Ф. Шишлаков¹, А.Г. Федоренко¹, Е.Ю. Ватаева¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Электромеханические устройства в основном состоят из роторных систем. Вибрация является результатом взаимодействия элементов роторной системы и во многом определяется точностью изготовления элементов на стадии производства и дефектами, возникающими в процессе функционирования. Основными узлами роторных систем, влияющими на вибрацию, являются подшипники. Для определения технического состояния подшипников и ресурса работы роторной системы необходимо точно измерять ненаблюдаемые колебания ротора. В статье рассмотрена модель канала измерения вибрации электромеханической системы, построенная с помощью аппарата графов связей. Получена передаточная функция посредством анализа графа потока сигналов. Проанализированы систематические и случайные ошибки измерения вибрации в зависимости от соотношения масс корпуса системы и вибропреобразователя при различных массах датчиков и жесткостей крепления.

Ключевые слова: граф связей, передаточная функция, подшипник

Введение

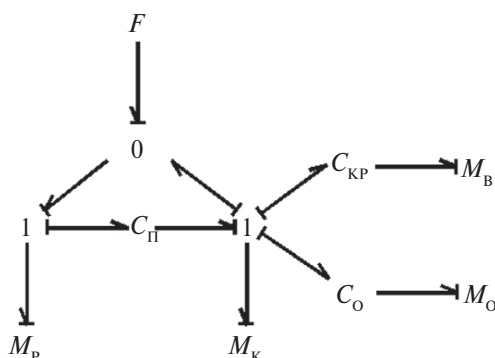
Как показали исследования, качество изготовления и сборки элементов электромеханических систем в значительной степени определяет их собственную вибрацию [1]. Электромеханические устройства в основном состоят из роторных систем, содержащих опоры качения, которые являются основным источником вибрации [2, 3]. В связи с этим спектральные характеристики вибрации используются для косвенной оценки технического состояния электромеханической системы [4, 5]. Отсюда следует, что точность диагностики технического состояния во многом определяется точностью измерения собственной вибрации. Для измерения вибрации исследуемая система, как правило, устанавливается

на упругом основании, и на ней крепится вибропреобразователь.

Модель канала измерения вибрации

Граф связей канала измерения вибрации изображен на рис. 1, где M_P , M_K , M_B , M_O – массы ротора, корпуса, вибропреобразователя и основания соответственно; C_{II} , C_{KP} , C_O – жесткости подшипников, крепления вибропреобразователя к корпусу и прокладки соответственно; F – вынуждающие силы упругого характера [6, 7].

Определим функцию передачи, связывающую перемещения ротора и корпуса. Составленному графу связей соответствуют графы потока сигналов, изображенные на рис. 2:



$$\Delta = 1 - \frac{C_{KP}}{M_B \omega^2} - \frac{C_O}{M_O \omega^2}; L_{PK}^1 = -\frac{M_K}{M_P}; \Delta^1 = \Delta;$$

$$L_{PK}^2 = -\frac{M_{KP}}{M_P \omega^2}; \Delta^2 = \Delta; L_{PK}^3 = \frac{C_{KP}^2}{M_P M_K \omega^4};$$

$$\Delta^3 = 1 - \frac{C_O}{M_O \omega^2}; L_{PK}^4 = -\frac{C_O}{M_P \omega^2}; \Delta^4 = \Delta;$$

$$L_{PK}^5 = \frac{C_O^2}{M_P M_K \omega^4}; \Delta^5 = 1 - \frac{C_{KP}}{M_B \omega^2},$$

где Δ – полный определитель графа; Δ^i – сокращенный определитель графа, соответствующий i -му пути между \dot{X}_P и \dot{X}_K ; L_{PK}^i – коэффициент передачи i -го пути от узла \dot{X}_K к узлу \dot{X}_P ; X_P ,

Рисунок 1. Граф связей канала измерения вибрации

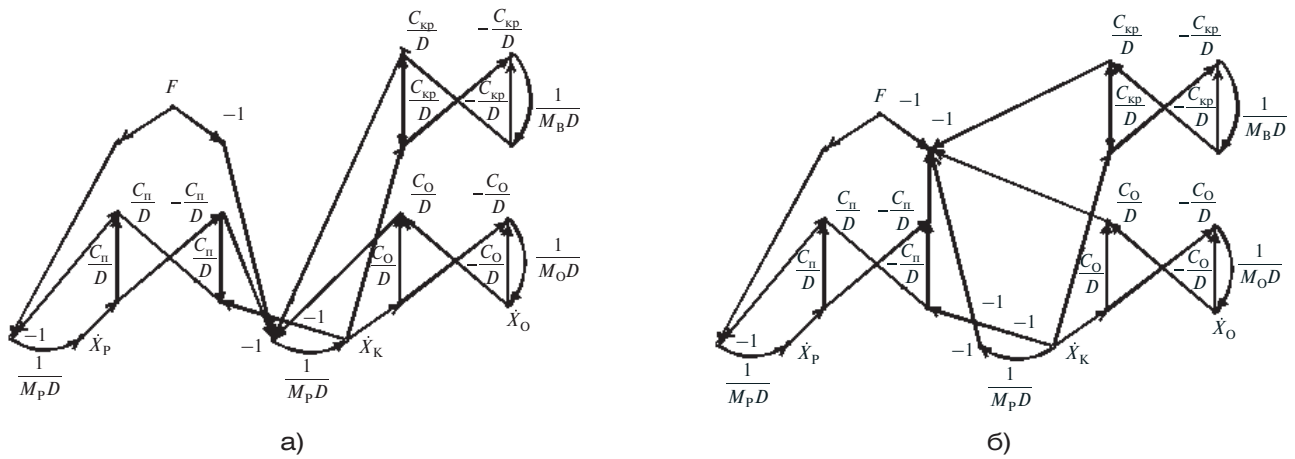


Рисунок 2. Исходный (а) и преобразованный (б) графы потока сигналов канала измерения вибрации: Δ – полный определитель графа; Δ^i – сокращенный определитель графа

X_K – виброперемещения ротора и корпуса системы.

Согласно правилу Мэзона [2]:

$$\frac{X_P}{X_K} = -\frac{M_K}{M_P} + \frac{C_{KP}}{M_P \omega^2} + \frac{C_O}{M_P \omega^2} + \frac{C_{KP}^2}{M_P M_B \omega^4} \left(1 - \frac{C_O}{M_O \omega^2}\right) + \frac{C_O^2}{M_P M_O \omega^4} \left(1 - \frac{C_{KP}}{M_B \omega^2}\right) \quad (1)$$

$$+ \frac{1 - \frac{C_{KP}}{M_B \omega^2} - \frac{C_O}{M_O \omega^2}}{1 - \frac{C_{KP}}{M_B \omega^2} - \frac{C_O}{M_O \omega^2}}$$

Обычно $M_O \gg M_K$; $M_O \gg M_P$, $M_O \gg M_B$, поэтому (1) упрощается выражением

$$\frac{X_P}{X_K} = -\frac{M_K}{M_P} + \frac{C_O}{M_P \omega^2} + \frac{M_B}{M_P} \frac{C_{KP}}{M_B \omega^2 - C_{KP}}$$

В случае если жесткость прокладки C_O , на которой устанавливается исследуемая система, и масса датчика M_B равны нулю, получим следующую передаточную функцию

$$\frac{X_P}{X_K} = -\frac{M_K}{M_P}$$

Таким образом, ошибка в измерении вибрации определяется выражением

$$\delta_X = \left| \frac{M_B}{M_K} \frac{C_{KP}}{C_{KP} - M_B \omega^2} - \frac{C_O}{M_P \omega^2} \right| 100\%$$

Она содержит две частотнозависимые составляющие. Первая составляющая обусловлена отношением масс вибропреобразователя и корпуса, характером крепления вибропреобразователя к корпусу системы, а вторая – упругостью прокладки, на которой устанавливается система.

Если учесть, что жесткости крепления вибропреобразователя и прокладок являются нормально распределенными случайными величинами, то систематическая ошибка в измерении вибрации определяется следующим выражением

$$\delta_X = \left| \frac{M_B}{M_K} \frac{M(C_{KP})}{M(C_{KP}) - M_B \omega^2} - \frac{M(C_O)}{M_K \omega^2} \right| 100\%$$

где $M(C_{KP})$, $M(C_O)$ – математические ожидания жесткости крепления вибропреобразователя и прокладки.

Случайная ошибка при достоверности 0,995 рассчитывается по формуле

$$\delta_X^{0,995} = \left| \frac{2 M_B^2 \omega^2 \sigma_{KP}}{M_K [M(C_{KP}) - M_B \omega^2]^2} - \frac{2 \sigma_O}{M_B \omega^2} \right| 100\%$$

где σ_{KP} , σ_O – среднеквадратические отклонения жесткости крепления и основания.

На рис. 3 представлены графики зависимости средней погрешности измерения вибрации от частоты для вибропреобразователей массой 2, 5, 10, 15, 20 и 30 г (соответственно кривые 1–6) при соотношении $M_B/M_K = 0,01$; 0,05; а также при $M(C_{KP}) = 80 \cdot 10^6$ Н/м; $M(C_O) = 15$ Н/м.

Графики зависимости случайной ошибки для $M_B/M_K = 0,01$; 0,1; 0,15 и $M_B = 10, 15, 20, 30$ г (кривые 1–4 соответственно) представлены на рис. 4 с учетом $\sigma_{KP} = 7 \cdot 10^6$ Н/м, $\sigma_O = 1,6$ Н/м.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что систематическая и случайные ошибки измерения зависят от соотношения масс вибропреобразователя и корпуса, а также от резонансных свойств крепления вибропреобразователя. С уменьшением отношения M_B/M_K систематическая и случайная ошибки снижаются. С приближением частоты анализа к резонансной частоте крепления вибропреобразователя систематическая и случайная ошибки возрастают. Необходимо отметить, что при выборе вибропреобразователя надо учитывать резонансные свойства самого датчика и выбирать частотный диапазон измерения вне зоны собственного резонанса.

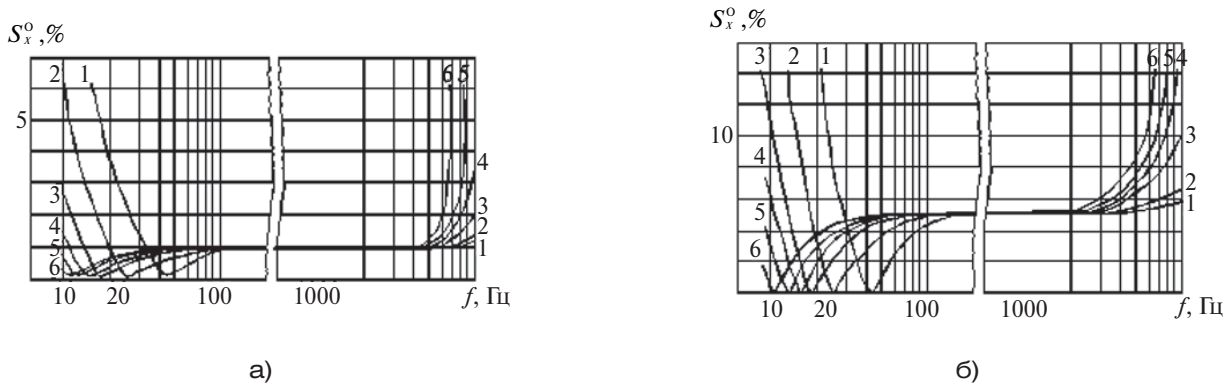


Рисунок 3. Зависимость средней погрешности измерения вибрации при $M_B/M_K = 0,01$ (а) и при $M_B/M_K = 0,05$ (б). Кривые 1–6 – для вибропреобразователей массой 2, 5, 10, 15, 20, 30 г соответственно

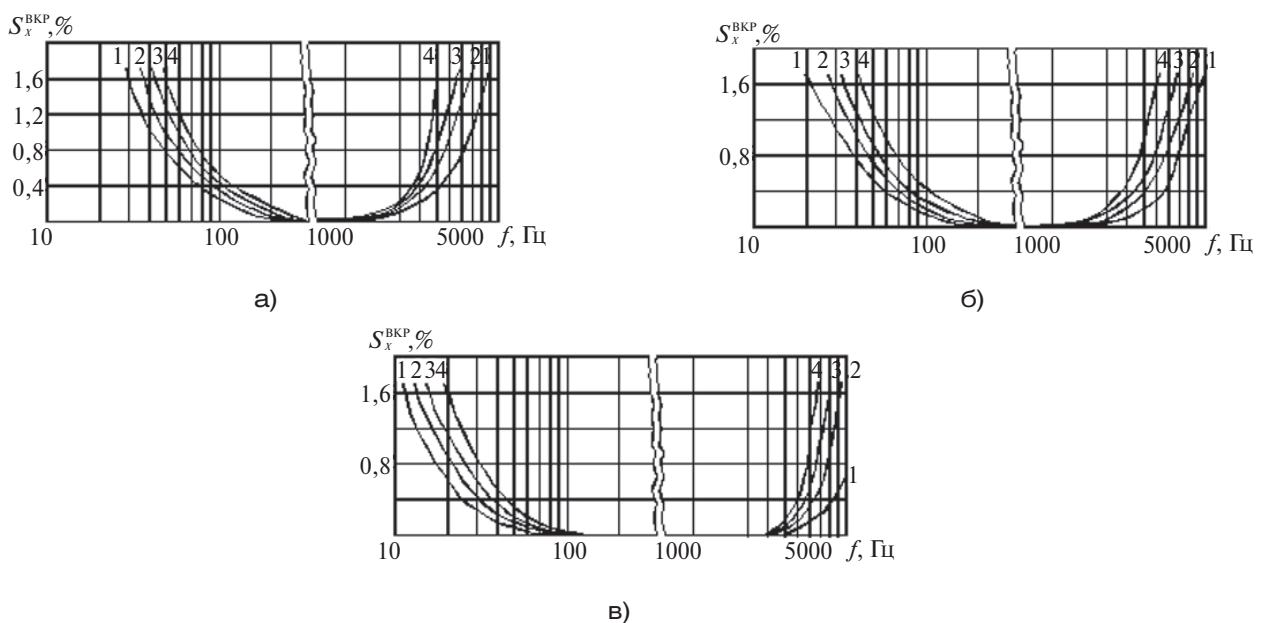


Рисунок 4. Зависимость случайной погрешности измерения вибрации при $M_B/M_K = 0,01$ (а), $M_B/M_K = 0,1$ (б) и $M_B/M_K = 0,15$ (в). Кривые 1–4 для вибропреобразователей массой 10, 15, 20, 30 г соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Явленский А. К., Явленский К. Н. Теория динамики и диагностики систем трения качения. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 184 с.
2. Приборные шариковые подшипники / под ред. К. Н. Явленского. М.: Машиностроение, 1981. 351 с.
3. Веркович Г. А., Головенкин Е. Н., Голубков В. А. и др. Справочник конструктора точного приборостроения. Л.: Машиностроение. Ленингр. отдел., 1989. 792 с.
4. Явленский А. К., Явленский К. Н. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. отдел., 1983. 239 с.
5. Эльперин А. И., Явленский А. К., Талашов Г. И. Диагностирование реодинамики систем трения. СПб.: Наука, 1998. 142 с.
6. Применение теории графов связей в технике / под ред. Д. Кэрнопа, Р. Розенберга. М.: Мир, 1974. 95 с.
7. Karnopp D. C., Rosenberg R. C. Analysis and simulation of multiport systems-the bond graph approach to physical system dynamics. Cambridge: M.I.T. Press, 1968. 201 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голубков Виктор Александрович, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (812) 494-70-31, e-mail: viktor-golubkov@yandex.ru.

Шишляков Владислав Федорович, д.т.н., профессор, директор Института инновационных технологий в электро-механике и робототехнике, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А, тел.: 8 (812) 494-70-31, e-mail: shishlakoff@yandex.ru.

Федоренко Андрей Григорьевич, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А, тел.: 8 (812) 494-70-31, e-mail: 12051312@mail.ru.

Ватаева Елизавета Юрьевна, старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А, тел.: 8 (812) 494-70-31, e-mail: kaf31@gmail.ru.

For citation: Golubkov V.A., Shishlakov V.F., Fedorenko A.G., Vataeva E. Yu. Accuracy rating measurement of vibration electromechanical devices. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 7, pp. 42–45. DOI 10.21778/2218-5453-2019-7-42-45

V. A. Golubkov, V. F. Shishlakov, A. G. Fedorenko, E. Yu. Vataeva

ACCURACY RATING MEASUREMENT OF VIBRATION ELECTROMECHANICAL DEVICES

Electromechanical devices consist mainly of rotor systems. Vibration is the result of the interaction of the elements of the rotor system and is largely determined by the accuracy of manufacturing elements at the production stage and defects arising in the process of operation. The main components of the rotor systems that affect vibration are bearings. To determine the technical condition of the bearings and the service life of the rotor system, it is necessary to accurately measure the unobservable vibrations of the rotor. The article describes the model of the channel for measuring the vibration of an electromechanical system, built using the apparatus of bond graphs. The transfer function is obtained by analyzing the signal flow graph. The systematic and random errors of vibration measurement are analyzed depending on the mass ratio between the system case and the vibration transducer for various sensor masses and attachment rigidity.

Keywords: bond graph, transfer function, bearing

REFERENCES

1. Yavlenskii A. K., Yavlenskii K. N. *Teoriya dinamiki i diagnostiki sistem treniya kacheniya* [Theory of the dynamics and diagnosis systems of rolling friction]. Leningrad, LGU Publ., 1978, 184 p. (In Russian).
2. Yavlenskii K. N., editor. *Pribornye sharikovye podshipniki* [Instrument ball bearings]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 351 p. (In Russian).
3. Verkovich G. A., Golovenkin E. N., Golubkov V. A., et al. *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Handbook of precision instrument-making designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 792 p. (In Russian).
4. Yavlenskii A. K., Yavlenskii K. N. *Vibrodiagnostika i prognozirovanie kachestva mekhanicheskikh sistem* [Vibration diagnostics and forecasting of quality of mechanical systems] Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983, 239 p. (In Russian).
5. Elperin A. I., Yavlenskii A. K., Talashov G. I. *Diagnostirovanie reodinamiki sistem treniya* [Diagnostics of friction system rheodynamics]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1998, 142 p. (In Russian).
6. Karnopp D. C., Rosenberg R. C., editors. *Primenenie grafov svyazey v tekhnike* [Application of bond graphs in the technique]. Moscow, Mir Publ., 1974, 95 p. (In Russian).
7. Karnopp D. C., Rosenberg R. C. *Analysis and simulation of multiport systems-the bond graph approach to physical system dynamics*. Cambridge, M.I.T. Press, 1968, 201 p.

AUTHORS

Golubkov Viktor, Ph. D., associate professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-70-31, e-mail: viktor-golubkov@yandex.ru.

Shishlakov Vladislav, D. Sc., professor, director of the Institute of innovative technologies in electromechanics and robotics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-70-31, e-mail: shishlakoff@yandex.ru.

Fedorenko Andrey, Ph. D., associate professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-70-31, e-mail: 12051312@mail.ru.

Vataeva Elizaveta, senior lecturer, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-70-31, e-mail: kaf31@gmail.ru.