

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-43-10-16>

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Елисеев А.В.

*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск,
Россия*

Ключевые слова: механическая колебательная система, структурное математическое моделирование, передаточные функции, связность внешних возмущений, узлы колебаний, частоты внешних возмущений, оценка динамического состояния.

Аннотация. Рассматривается проблема оценки, формирования и коррекции динамических состояний технических объектов в условиях интенсивных нагрузений. Задача заключается в определении связей между параметрами динамических взаимодействий и для использования обнаруженных связей в оценке параметров вибрационных режимов. Для оценки особенностей вибрационных режимов используется методология структурного математического моделирования. В качестве модельного объекта, динамическое состояние которого оценивается, выступает рабочий орган вибрационной технологической машины. Разработано средство оценки частоты колебаний технического объекта на основе связности внешних возмущений и положения узловой точки присоединенного твердого тела.

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE AND TECHNICAL SOLUTIONS FOR EVALUATING THE DYNAMIC INTERACTIONS OF ELEMENTS OF VIBRATING TECHNOLOGICAL MACHINES

Eliseev A. V.

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Keywords: mechanical oscillatory system, structural mathematical modeling, transfer functions, connectivity of external disturbances, oscillation nodes, frequencies of external disturbances, assessment of the dynamic state.

Abstract. The problem of evaluation, formation and correction of dynamic states of technical objects under conditions of intense loads is considered. The task is to determine the relationships between the parameters of dynamic interactions to assess the characteristics of vibration modes. The methodology of structural mathematical modeling is used to evaluate the features of vibration modes. The working organ of a vibrating technological machine acts as a model object, the dynamic state of which is evaluated. A tool has been developed for estimating the oscillation frequency of a technical object based on the connectivity of external disturbances and the position of the nodal point of an attached solid.

Введение. В последние годы требования к качеству вибрационных процессов в машиностроении значительно возросли, что делает необходимым разработку новых подходов к оценке, формированию и коррекции динамических состояний технических объектов. Эффективность вибрационных технологий напрямую зависит от уровня развития методов и средств управления динамическими взаимодействиями элементов технологических машин [1-4]. Одним из ключевых подходов к оценке

динамических состояний рабочих органов вибрационных машин является учет дополнительных связей между внешними возмущениями и положением узловой точки протяженного твердого тела [5-8]. Традиционные подходы к оценке равномерности вибрационного поля рабочего органа основаны на использовании вибромаркеров и электрических датчиков, что может представлять сложность в агрессивных условиях производственных помещений [9-12].

Вместе с тем, методы разработки устройств в виде механических колебательных систем для оценки динамических характеристик рабочих органов вибрационных технологических машин еще не получили полного развития.

Статья посвящена разработке новых подходов к оценке динамических состояний технических объектов в условиях интенсивных нагрузений, основанных на учете связности внешних возмущений и положений узловых точек присоединенных твердых тел в зависимости от частот колебаний.

I. Основные положения. Постановка задачи. Для оценки динамических характеристик системы рассматривается совокупность опорного твердого тела, выполняющего роль массивного рабочего органа, и вспомогательного твердого тела, выполняющего роль «индикатора» динамических параметров опорного твердого тела. Вспомогательное твердое тело крепится к опорному твердому телу с помощью упругих элементов. Отношение амплитуд колебаний точек опорного тела, к которым прикреплено вспомогательное тело, представляет собой коэффициент связности внешних кинематических возмущений вспомогательного твердого тела.

Опорное твердое тело совершает малые плоские гармонические колебания с фиксированной частотой, служа опорной поверхностью кинематических возмущений для вспомогательного твердого тела. Вспомогательное твердое тело взаимодействует с опорным телом посредством упругих элементов. Колебания вспомогательного твердого тела имеют форму малых установившихся колебаний относительно положения статического равновесия. Трение предполагается пренебрежимо малым. Вспомогательное твердое тело в режиме вибрационного возмущения может иметь характерную точку в виде узла колебаний. Координата узла колебаний определяется связностью внешних кинематических возмущений и частотой колебаний.

Задача заключается в разработке способа и устройства для оценки частот колебаний механической колебательной системы на основе расположения координаты узла колебаний и коэффициента связности кинематических возмущений.

II. Математическая модель. В качестве расчетной схемы рассматривается механическая колебательная система, состоящая из вспомогательного твердого тела, установленного на опорную поверхность с помощью упругих элементов с жесткостями k_1 и k_2 (рис. 1). Вспомогательное твердое тело имеет массу M и момент инерции J .

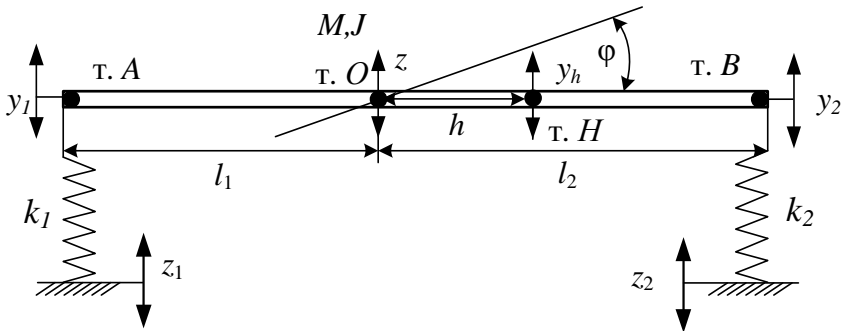


Рис. 1. Механическая колебательная система, образованная вспомогательным твердым телом: точки A и B – точки крепления пружин, точка O – центр тяжести, точка H – точка оценки динамического состояний, h – расстояние от центра тяжести, y_h – амплитуда колебания точка H , l_1, l_2 – расстояние от центра тяжести до точек A и B , z_1, z_2 – амплитуды колебаний точек опорной поверхности

Для построения математической модели используются два варианта обобщенных координат: $\{y_1, y_2\}$ – смещения точек A и B твердого тела относительно положения статического равновесия и $\{\varphi, z\}$, где φ – угол поворота твердого тела вокруг центра тяжести, z – вертикальное смещение центра тяжести относительно положения статического равновесия. Предполагается, что амплитуды z_1, z_2 имеют функциональную зависимость $z_2 = \gamma z_1$, где γ – коэффициент связности кинематических возмущений.

На основе механической колебательной системы (рис. 1) с помощью известных методов [13-15] строится структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (рис. 2).

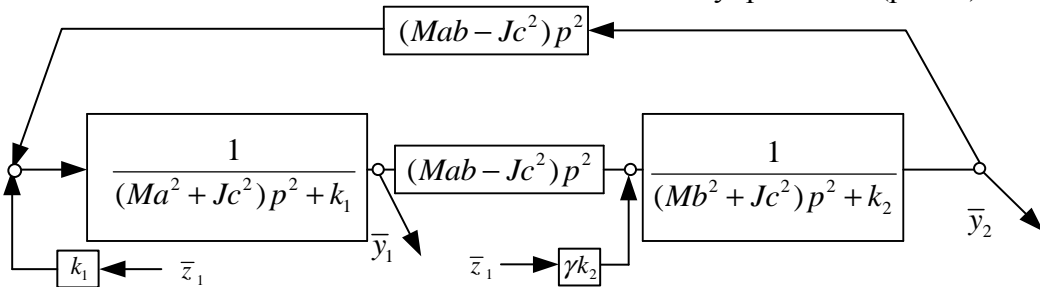


Рис. 2. Структурная схема механической колебательной системы (рис.1), $p = j\omega$ – комплексная переменная, $j = \sqrt{-1}$, ω – частота внешнего возмущения, a, b, c – метрические характеристики, знак «-» над символом означает преобразование Лапласа [16]

На основе структурной схемы (рис. 2) могут быть построены передаточные функции, которые представляют собой рычажные отношения между амплитудами колебаний точек твердого тела y_1, y_2 и амплитудами z_1, z_2 колебания точек опорного тела, рассматриваемого в качестве опорной поверхности.

III. Оценка динамических особенностей твердого тела в зависимости от связности внешних возмущений. Для оценки динамических состояний в точках A и B рассматриваются передаточные функции системы.

Эти функции могут быть детализированы через определители матрицы соответствующей системы, зависящей от коэффициента связности γ :

$$W_{11}(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1}, \quad W_{21}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1}. \quad (1)$$

На основе передаточных функций (1) может быть построена передаточная функция для оценки динамического состояния в точке H , удаленной на расстоянии h от центра тяжести. Зависимость передаточной функции от координаты h выражается через линейную комбинацию функций (1):

$$W_h(p) = (a - ch)W_{11}(p) + (b + ch)W_{21}(p). \quad (2)$$

Амплитудно-частотная характеристика передаточной функции (2) представляет собой семейство характеристик, зависящее от коэффициента связности γ и координаты h . Это семейство может быть использовано для определения точек с критическими свойствами, например, для определения узлов колебаний.

IV. Особенности определения узлов колебаний твердого тела.

Положение узла колебаний определяется координатой h , для которой амплитуда колебаний равна нулю. Коэффициент связности γ и частота колебаний ω влияют на положение узла колебаний:

$$h = - \frac{a \begin{vmatrix} k_1 & (Mab - Jc^2)p^2 \\ k_2\gamma & (Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} (Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 & k_1 \\ (Mab - Jc^2)p^2 & k_2\gamma \end{vmatrix}}{c \begin{vmatrix} (Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 & k_1 \\ (Mab - Jc^2)p^2 & k_2\gamma \end{vmatrix} - c \begin{vmatrix} k_1 & (Mab - Jc^2)p^2 \\ k_2\gamma & (Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 \end{vmatrix}}. \quad (3)$$

Зависимости между частотой колебаний, связностью возмущений и положением узловой точки могут быть использованы для разработки конструктивно-технических решений в области измерения и оценки динамических состояний технических объектов, подвергающихся вибрационным нагрузкам.

V. Разработка средств оценки динамических особенностей технических объектов. Частота колебаний ω может быть определена на основе координаты неподвижной точки h и коэффициента связности γ , который можно зафиксировать на основе наблюдений (рис. 3).

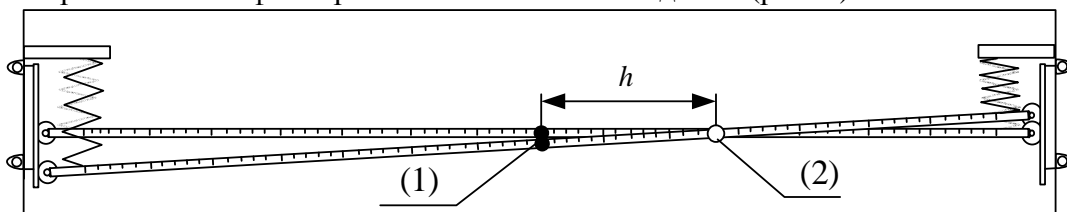


Рис. 3. Принципиальная схема устройства для оценки динамического состояния вибрационной технологической машины: 1 – центр тяжести, 2 – узел колебаний

На основе установленных аналитических зависимостей разработано устройство для оценки частоты колебаний [17]. В процессе колебаний объекта

в определенной точке инерционного элемента формируется узел колебаний с нулевой амплитудой. С помощью координатной шкалы визуально на присоединенном твердом теле определяется координата узла колебаний, а на основе вибромаркеров рассчитываются значения амплитуд, которые используются для расчета коэффициента связности. Этот коэффициент вместе с экспериментально определенной координатой узла колебаний позволяет определить частоту колебаний объекта.

Заключение. Разработана методология оценки динамических особенностей рабочих органов вибрационных технологических машин, основанная на использовании аналитических соотношениях, связывающих частоту установившихся колебаний, положение узлов колебаний и связность кинематических возмущений.

Методология позволяет разрабатывать конструктивно-технические решения для определения частот колебаний рабочих органов вибрационных технологических машин с учетом координат узлов колебаний.

Список литературы

1. Асташев В.К., Бабицкий В.И., Вульфсон И.И. Динамика машин и управление машинами. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2008. – 693 с.
3. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных технологий, 2006. – 176 с.
4. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 568 с.
5. Елисеев С.В., Елисеев А.В., Большаков Р.С., Хоменко А.П. Методология системного анализа в задачах оценки, формирования и управления динамическим состоянием технологических и транспортных машин. – Новосибирск: Наука, 2021. – 679 с.
6. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects // Series: Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 252, Springer International Publishing, Cham, 2020, 521 p.
7. Eliseev A.V. Structural Mathematical Modeling Applications in Technological Machines and Transportation Vehicles. – Hershey, PA: IGI Global, 2023. – 288 p. doi.org/10.4018/978-1-6684-7237-8.
8. Кузнецов Н.К. Динамика управляемых машин с дополнительными связями. – Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2009. – 290 с.
9. Ганиев Р.Ф. Фундаментальные и прикладные проблемы нелинейной волновой механики и машиностроения. Прорывные волновые технологии и волновое машиностроение // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 6. – С. 3-33.
10. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamics Effects, General Approach, Applications, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. – 536 p.
11. Иориш Ю.И. Виброметрия. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 756 с.

12. Вибрации в технике. Том 5. Измерения и испытания / Под ред. Генкина М.Д. – М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.
13. Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Большаков Р.С., Артюнин А.И. Динамическое состояние вибрационной машины: узлы колебаний, центры жесткости, коэффициенты связности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 45–52. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).45-52.
14. Елисеев С.В., Ситов И.С. Характерные особенности формирования динамических состояний вибрационных технологических машин // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 2(42). – С. 13-17.
15. Елисеев А.В., Кузнецов Н.К., Миронов А.С. Карты динамических инвариантов в оценке режимов движений механических колебательных систем // Труды МАИ. – 2023. – № 128. – DOI: 10.34759/trd-2023-128-05.
16. Лурье А.И. Операционное исчисление и его приложения к задачам механики. – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. – 432 с.
17. Патент №2820169 РФ. Устройство и способ для оценки динамических состояния рабочих органов вибрационных технологических машин / Елисеев А.В., Большаков Р.С., Николаев А.В., Миронов А.С. – Заявка №2023118923 от 17.07.2023; опублик. 30.05.2024, Бюл. 16.

References

1. Astashev V.K., Babitsky V.I., Wolfson I.I. Dynamics of machines and control of machines. – М.: Mechanical Engineering, 1988. – 240 p.
2. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology. – Rostov-on-Don: Publ. centre of the DSTU, 2008. – 693 p.
3. Panovko G.Ya. Dynamics of vibrational technological processes. – M.-Izhevsk: Regularic and chaotic dynamics, Institute of Computer Technologies, 2006. –176 p.
4. Kopylov Yu.R. Dynamics of vibration shock hardening processes: monograph. – Voronezh: Scientific Book, 2011. – 568 p.
5. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Bolshakov R.S., Khomenko A.P. Methodology of system analysis in the tasks of assessment, formation and management of the dynamic state of technological and transport machines. – Novosibirsk: Science, 2021. – 679 p.
6. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects // Series: Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 252, Springer International Publishing, Cham, 2020, 521 p.
7. Eliseev A.V. Structural Mathematical Modeling Applications in Technological Machines and Transportation Vehicles. – Hershey, PA: IGI Global, 2023. – 288 p. doi.org/10.4018/978-1-6684-7237-8.
8. Kuznetsov N.K. Dynamics of controlled machines with additional connections. – Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2009. – 290 p.
9. Ganiev R.F. Fundamental and applied problems of nonlinear wave mechanics and mechanical engineering. Breakthrough wave technologies and wave engineering // Problems of Mechanical Engineering and machine Reliability. 2019, no. 6, pp. 3-33.
10. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamics Effects, General Approach, Applications, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. – 536 p.
11. Iorish Yu.I. Vibrometry. – М.: State Scientific and Technical Publishing House of Machine-building literature, 1963. – 756 p.

12. Vibrations in technology. Volume 5. Measurements and tests / Edited by Genkin M.D. – M.: Mechanical Engineering, 1981. – 496 p.
13. Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Bolshakov R.S., Artyunin A.I. The dynamic state of a vibrating machine: oscillation nodes, stiffness centers, connectivity coefficients // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019, vol. 63, no. 3, pp. 45-52. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).45-52.
14. Eliseev S.V., Sitov I.S. Characteristic features of the formation of dynamic states of vibrating technological machines // Systems. Methods. Technologies. 2019, no. 2(42), pp. 13-17.
15. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Mironov A.S. Maps of dynamic invariants in the estimation of modes of motion of mechanical oscillatory systems // Proceedings of MAI. 2023, no. 128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-05.
16. Lurie A.I. Operational calculus and its applications to problems of mechanics. - M.; L.: State Publ. House of Technology-Theoretical lit., 1950. – 432 p.
17. Patent No. 2820169 RU. Device and a method for assessing the dynamic state of the working bodies of vibrating technological machines / A.V. Eliseev, R.S. Bolshakov, A.V. Nikolaev, A.S. Mironov. – Appl. No 2023118923 from 17.07.2023; publ. 30.05.2024, Bul. No. 16.

Елисеев Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики	Eliseev Andrey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor of Department of mathematics
eavsh@ya.ru	

Received 16.09.2024