

## **НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ: ВВЕДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СВЯЗИ**

*Елисеев А.В., Каргапольцев С.К., Елисеев С.В., Миронов А.С.*

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск*

**Ключевые слова:** режимы динамического гашения колебаний, передаточные функции, межпарциальные связи, структурная математическая модель.

**Аннотация.** Рассматриваются особенности формирования динамических свойств в технологических вибрационных машинах. Цель исследования заключается в разработке методов математического моделирования для оценки возможностей управления динамическими состояниями технических объектов на основе введения в их структуру рычажных механизмов, позволяющих изменять, настраивать и формировать динамические состояния рабочих органов в виде распределения амплитуд колебаний точек рабочих органов. Используются методы построения математических моделей в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений во временной области с последующей трансформацией уравнений в операторную форму на основе преобразований Лапласа. Системы уравнений в операторной форме трансформируются в соответствующие структурные схемы эквивалентных систем автоматического управления. Используется аналитический аппарат теории автоматического управления. Показаны возможности получения выражений для передаточных функций, на основе которых определяются необходимые динамические характеристики систем, в том числе, и характерные частоты динамических состояний. В качестве основы для динамического синтеза распределения амплитуд колебания точек рабочего органа авторами предложено использование передаточных функций межпарциальных связей. Проведены вычислительные эксперименты. Приводится ряд частотных характеристик, отражающих возможности изменения динамических состояний на основе использования рычажных механизмов.

## **ON IMPROVING THE EFFICIENCY OF DYNAMIC DAMPING: THE INTRODUCTION OF ADDITIONAL RELATIONSHIPS**

*Eliseev A.V., Kargapoltsev S.K., Eliseev S.V., Mironov A.S.*

*Irkutsk state transport university, Irkutsk*

**Keywords:** modes of dynamic vibration damping, transfer function, inter-partial ties, structural mathematical model.

**Abstract.** Features of dynamic properties of technological vibration machines are considered. The aim of the research is to develop methods of mathematical modeling. It is assumed that the developed methods are used to assess the possibility of controlling the dynamic States of technical objects. Control capabilities are based on the introduction of lever mechanisms into their structure. Lever mechanisms allow to change, adjust and form dynamic states of working bodies in the form of distribution of amplitudes of fluctuations of points of working bodies. Methods of construction of mathematical models in the form of systems of ordinary differential equations in the time domain with the subsequent transformation of the equations into the operator form on the basis of Laplace transformations are used. Systems of equations in operator form are transformed into corresponding

block diagrams of equivalent automatic control systems. The analytical apparatus of the theory of automatic control is used. The possibilities of obtaining expressions for transfer functions, on the basis of which the necessary dynamic characteristics of systems, including the characteristic frequencies of dynamic States, are determined, are shown. As a basis for the dynamic synthesis of the distribution of amplitudes of oscillation points of the working body, the authors propose the use of transfer functions of inter-partial relations. Computational experiments are carried out. A number of frequency characteristics reflecting the possibility of changing dynamic States based on the use of lever mechanisms are given.

**Введение.** Вибрационные технологические машины в последние годы находят широкое применение в разных отраслях промышленности. Теории и практике настройки и обслуживания такого рода машин посвящены работы [1-5]. В связи с повышением требований к надежности работы машин, их безопасности обслуживания, динамического качества при работе в условиях вибрационных нагружений возникает ряд вопросов, связанных с формированием и поддержанием динамических состояний машин для работы в условиях соблюдения достаточно сложных регламентов. Многие технологические машины обладают возможностями реализации разнообразных технологических процессов, связанных с вибрационным транспортированием сыпучих материалов и смесей, вибрационным упрочнением поверхностей и деталей, сортировкой, классификацией, ориентацией деталей в сборочных комплексах и другое [6-9]. Одной из важнейших технических проблем настройки вибрационных машин является формирование вибрационных полей (или распределения амплитуд колебаний точек рабочих органов) определенной формы и структуры. Для вибрационных технологических машин такие производственно-технические операции сводятся к выбору схем расположения вибровозбудителей рабочих органов, разработке способов и средств корректировки динамических состояний, оценке возможностей изменения таких состояний и выбором средств для практической реализации, обеспечивающих необходимые параметры работы. Вибрационные технологические машины отличаются большим разнообразием, что определяется спецификой технологических процессов. При этом, задачи оценки, настройки и поддержания необходимых форм динамических состояний решаются, главным образом, за счет соответствующих настроек вибрационных возбудителей [1,2,9,10]. В последние годы наметилась тенденция введения в структуру вибрационных технологических машин дополнительных связей, которые реализуются различного рода механизмами, в том числе, рычажными, винтовыми, зубчатыми и другими [11-13]. Вводимые механизмы в структуру механической колебательной системы создают эффекты изменения приведенных массо-инерционных и упругих характеристик; изменение параметров динамической системы в этом случае достигается изменениями параметров вводимых дополнительных связей. В предлагаемом материале рассматривается ряд вопросов, позволяющих в качестве средств настройки и коррекции вибрационных состояний технологических машин использовать дополнительные связи в виде рычажных механизмов первого и второго рода, позволяющих изменениями своих параметров существенно влиять на динамические состояния рабочих органов вибрационных машин.

**I. Основные положения. Постановка задачи.** На рис. 1 рассматривается механическая колебательная система с тремя степенями свободы, как расчетная схема некоторого технического объекта массой  $m_2$ , который опирается на устройство для преобразования движения рычажного типа. Движение системы описывается в системе координат  $y_0, y_1, y_2$ . В качестве внешнего возмущения рассматриваются гармонические колебания опорной поверхности  $z(t)$ . Система обладает линейными свойствами и совершает малые колебания относительно положения устойчивого статического равновесия.

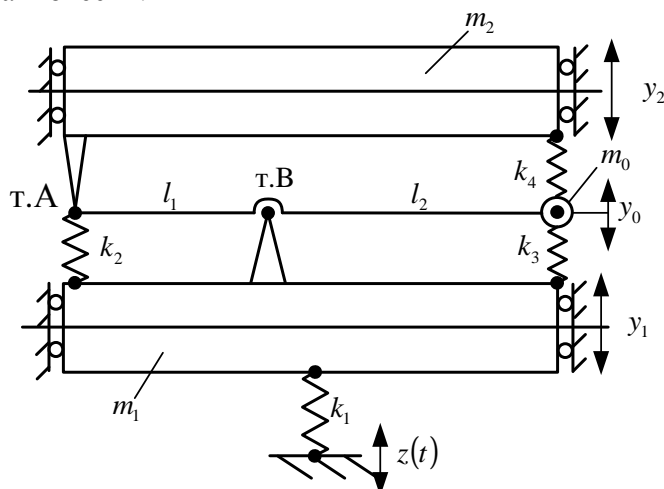


Рис. 1. Принципиальная схема виброзащитной системы технического объекта с устройством для преобразования движения

Задача исследования заключается в разработке подходов позволяющих реализовать концепции изменения динамического состояния вибрационной машины за счет специальных технических устройств.

**II. Математическая модель.** Уравнения движения системы в данном случае принимают вид

$$\ddot{y}_1 [m_1 + m_0(i+1)^2] + y_1 \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 i^2 + \\ + k_4(i+1)^2 \end{bmatrix} - \ddot{y}_2 m_0 i(i+1) - y_2 \begin{bmatrix} k_2 + k_3 i^2 + \\ + k_4(1+i)^2 \end{bmatrix} = k_1 z(t), \quad (1)$$

$$\ddot{y}_2 (m_2 + m_0 i^2) + y_2 \begin{bmatrix} k_2 + k_3 i^2 + \\ + k_4(1+i)^2 \end{bmatrix} - \ddot{y}_1 m_0 i(i+1) - y_1 \begin{bmatrix} k_2 + k_3 i^2 + \\ + k_4(1+i)^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения (1), (2) под действием преобразования Лапласа трансформируются в алгебраическую линейную систему второго порядка относительно изображений  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$ , где символ «-» над переменной означает преобразование Лапласа,  $p = j\omega$ ,  $j^2 = -1$ . Координата  $\bar{y}_0$  связана с  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$  следующими соотношениями

$$y_0 = y_1(1+i) - y_2 i, \quad (3)$$

где  $i$  – передаточное отношение. Детали формирования математической модели представлены в работе [14].

Построение математической модели основано на методах структурного математического моделирования [5,15]. В частности, для принципиальной схемы на рис. 1 структурная математическая модель представлена на рис. 2.

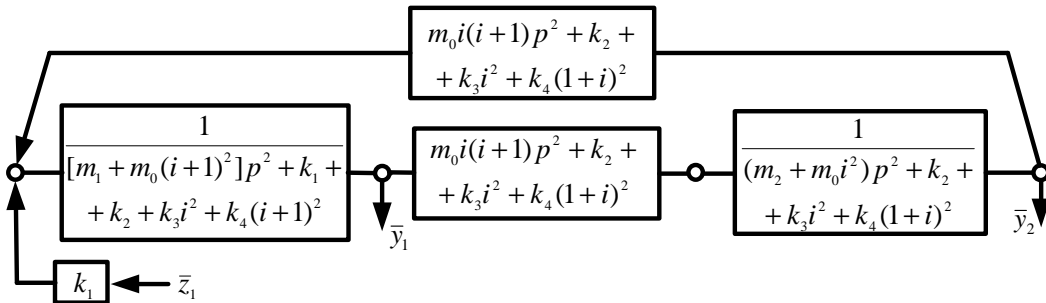


Рис. 2. Структурная математическая модель механической колебательной системы на рис. 1

Структурная схема позволяет определить ряд основных динамических параметров системы, в частности, к ним относятся частоты динамического гашения колебаний и частоты, характеризующие межпарциальные связи.

Передаточные функции системы определяются из структурной схемы:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{k_1 \bar{z}_1} = \frac{(m_2 + m_0 i^2) p^2 + k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}{A(p)}, \quad (4)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{k_1 \bar{z}_1} = \frac{m_0 i(i+1) p^2 + k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}{A(p)}, \quad (5)$$

передаточная функция межпарциальных связей:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{m_0 i(i+1) p^2 + k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}{(m_2 + m_0 i^2) p^2 + k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}, \quad (6)$$

где 
$$A(p) = \{[m_1 + m_0(i+1)^2]p^2 + k_1 + k_2 + k_3i^2 + k_4(i+1)^2\} \times [(m_2 + m_0i^2)p^2 + k_2 + k_3i^2 + k_4(1+i)^2] - [m_0i(i+1)p^2 + k_2 + k_3i^2 + k_4(1+i)^2]^2. \quad (7)$$

Передаточная функция межпарциальных связей используется для оценки эффективности изменения свойств динамических свойств и коррекции динамических состояний.

В общем случае по каждой из координат возможны режимы динамического гашения колебаний на частотах

$$\omega_{1\text{дин}}^2 = \frac{k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}{m_2 + m_0 i^2}, \quad (8) \quad \omega_{2\text{дин}}^2 = \frac{k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}{m_0 i(i+1)}. \quad (9)$$

Парциальные частоты системы в общем случае определяются:

$$n_1^2 = \frac{k_1 + k_2 + k_3 i^2 + k_4 (i+1)^2}{m_1 + m_0 (i+1)^2}, \quad (10) \quad n_2^2 = \frac{k_2 + k_3 i^2 + k_4 (1+i)^2}{m_2 + m_0 i^2}. \quad (11)$$

Динамические свойства системы зависят не только от параметров инерционных и упругих звеньев, но и от величины передаточного отношения  $i$ .

**II. Введение дополнительных элементов.** Авторы в качестве основного направления коррекции динамических свойств рассматривают введение дополнительной массы  $m_{00}$  на рычаге (рис. 3).

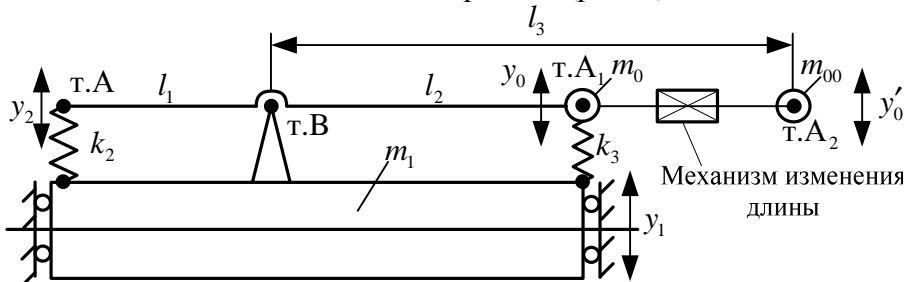


Рис. 3. Фрагмент инерционного элемента принципиальной схемы, приведенной на рис. 1 с добавлением к рычажному элементу дополнительной массы  $m_{00}$

Для целей настройки системы используется передаточная функция межпарциальной связей вида [14]:

$$W_{12}''(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{[2m_0 + m_{00}(1+i_0) \cdot (i_0 + 2)]p^2 + k_2 + k_3 + 4k_4}{[m_2 + m_0 + m_{00}(1+i_0)^2]p^2 + k_2 + k_3 + 4k_4}, \quad (12)$$

На рис. 4 приведены амплитудно-частотные характеристики для модельной задачи с параметрами  $k_1 = 10$  кН/м,  $k_2 = 10$  кН/м,  $k_3 = 10$  кН/м,  $k_4 = 10$  кН/м,  $m_2 = 20$  кг,  $i = 1$ ,  $i_0 = 2$ .

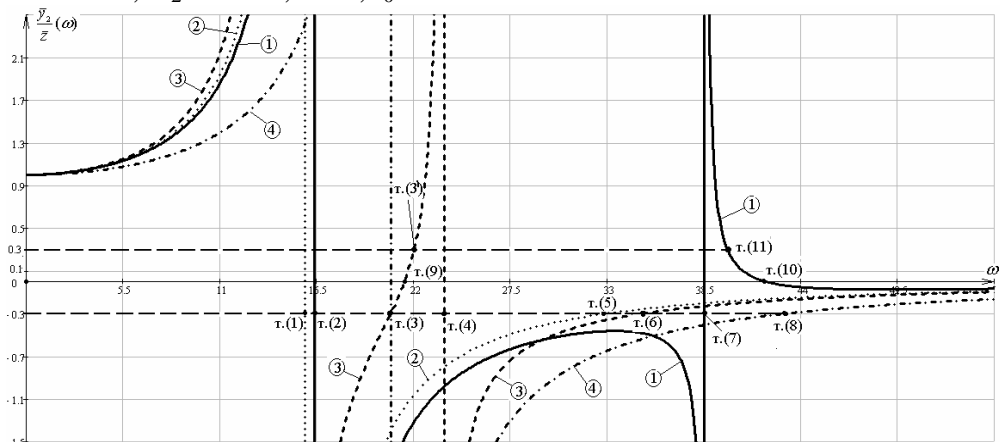


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики  $\frac{\bar{y}_2}{z}(\omega)$  для виброзащитной системы технического объекта при действии вибраций со стороны основания: кривая 1 (—) соответствует  $m_0 = 5$  кг,  $m_{00} = 2$  кг,  $m_1 = 10$  кг; кривая 2 (·····) соответствует  $m_0 = 5$  кг,  $m_{00} = 5$  кг,  $m_1 = 10$  кг; кривая 3 (---) соответствует  $m_0 = 5$  кг,  $m_{00} = 10$  кг,  $m_1 = 10$  кг; кривая 4 (- · - · -) соответствует  $m_0 = 0$ ,  $m_{00} = 0$ ,  $m_1 = 0$

Амплитудно-частотные характеристики представляют собой отношение амплитуды колебаний на объекте защиты  $m_2$  (координата  $y_2$ ) к внешнему воздействию в виде смещения или амплитуды вибраций основания  $z(t)$ . Детальный анализ амплитудно-частотных характеристик приведен в работе [14].

**Закключение.** Таким образом, проведенный авторами ряд исследований на конкретных математических моделях, и обзор результатов позволяют сделать следующие заключения.

Введение дополнительных связей в структуру технологических вибрационных машин является достаточно эффективным средством для изменения закономерной распределения амплитуд колебания точек рабочих органов и формирования на определенных частотах режимов динамического гашения колебаний.

Разработан метод математического моделирования для оценки динамических состояний вибрационных машин с рычажными связями и формирования определенных динамических состояний, соответствующих требованиям технологического процесса.

По существу авторами рассматривается техническая концепция, на основе которой могла бы проводиться соответствующая проработка рациональных конструкторско-технологических решений построения вибрационных машин, в том числе, и с системами автоматической поднастройки и управления режимами работы. Авторами предложены необходимые аналитические соотношения.

#### Список литературы

1. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных технологий, 2006. – 176 с.
2. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 568 с.
3. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. – М.: Недра, 1986. – 144с.
4. Елисеев А.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неударживающих связей: монография /А.В. Елисеев, В.В. Сельвинский, С.В. Елисеев. – Новосибирск: Наука, 2015. – 332 с.
5. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи): монография; отв. ред. А.И. Артюнин. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – 692 с.
6. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
7. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1969. – 364с.
8. Повидайло В.А. Вибрационные устройства в машиностроении. – Москва - Киев: Машгиз, 1962. – 111 с.
9. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.
10. Бабичев А.П. Основы вибрационных технологий / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Изд. ДГТУ, 1999. – 620 с.
11. Белокобыльский С.В. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи / С.В. Белокобыльский, С.В. Елисеев, И.С. Ситов. – СПб.: Политехника, 2013. – 320с.
12. Белокобыльский С.В. Прикладные задачи структурной теории виброзащитных систем / С.В. Белокобыльский, С.В. Елисеев, В.Б. Кашуба. – СПб.: Политехника, 2013. – 363 с.
13. Елисеев С.В. Динамические свойства виброзащитных платформ с рычажными связями / С.В. Елисеев, В.Б.Кашуба, Д.Х. Нгуен, А.В. Николаев // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 17-28.
14. Нгуен Д.Х. Возможности рычажного корректора в задачах динамического гашения колебаний // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т.21. №8. С.38-48.

15. Елисеев С.В. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем / С.В. Елисеев, А.И. Артюнин. – Новосибирск: Наука, 2016. – 459 с.

### References

1. Panovko G.Ya. Dynamics of vibration technological processes. - Moscow-Izhevsk: "Regular and chaotic dynamics", Institute of computer technology, 2006.- 176 p.
2. Kopylov Yu.R. Dynamics of vibro-shock hardening processes: monograph.– Voronezh: Scientific book, 2011.-568 p.
3. Weisberg L.A. Design and calculation of vibration screens.-Moscow: Nedra, 1986.-144 p.
4. Eliseev A.V. Dynamics of a vibratory interaction of elements of technological systems subject to unilateral constraints relations / A.V. Eliseev, V.V. Selvinsky, S.V. Eliseev. Novosibirsk: Nauka, 2015. – 332 p.
5. Eliseev S.V. Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of movements, vibration interactions, lever connections). – Irkutsk: Irkutsk State Transport University, 2018. – 692 p.
6. Goncharevich I.F. Theory of vibration technique / I.F. Goncharevich, K.V. Frolov. -M.: Science, 1981.-320 p.
7. Bykhovskiy I.I. Fundamentals of the theory of vibration technique. M.: Mechanical Engineering, 1969. 364 p.
8. Povedailo V.A. Vibrating device in mechanical engineering. Moscow - Kiev: Mashgiz, 1962. - 111 p.
9. Poduraev V.N. Cutting treatment with vibrations. M.: Mechanical Engineering, 1970. 350 p.
10. Babichev A.P. Fundamentals of vibration technologies / A.P. Babichev, I.A. Babichev.-Rostov-on-don: DSTU, 1999.-620 p.
11. Belokobylsky S.V. Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial-elastic bonds / S.V. Belokobylsky, S.V. Eliseev, I.S. Sitov. – St. Petersburg: Polytechnic, 2013. – 320 p.
12. Belokobylsky S.V. Applied problems of the structural theory of vibration protection systems / S.V. Belokobylsky, S.V. Eliseev, V.B. Kashuba. – St. Petersburg: Polytechnic, 2013. - 363 p.
13. Eliseev S.V. Dynamic properties of vibration-proof platforms with lever connections / S.V. Eliseev, V.B. Kashuba, D.H. Nguyen, A.V. Nikolaev // Systems. Methods. Technologies. 2016. No 4 (32). P. 17-28.
14. Nguyen D.H. Possibilities of lever corrector in problems of dynamic damping // Bulletin of Irkutsk State technical University. 2017. Vol. 21. No. 8. P. 38-48.
15. Eliseev S.V. Applied theory of oscillations in problems of dynamics of linear mechanical systems / S.V. Eliseev, A.I. Artyunin. Novosibirsk: Science, 2016. 459 p.

#### *Сведения об авторах:*

#### *Information about authors:*

<b>Елисеев Андрей Владимирович</b> – к.т.н., доцент кафедры высшей математики	<b>Eliseev Andrey Vladimirovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of department of mathematics
<b>Каргапольцев Сергей Константинович</b> - д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», kck@irgups.ru	<b>Kargapoltsev Sergey Konstantinovich</b> – doctor of technical sciences, professor of department «Automation of Production Processes», kck@irgups.ru
<b>Елисеев Сергей Викторович</b> – д.т.н., профессор, советник при ректорате по научной работе, eliseev_s@inbox.ru	<b>Eliseev Sergey Viktorovich</b> – doctor of technical sciences, professor, advisor to the rectorate for scientific work, eliseev_s@inbox.ru
<b>Миронов Артем Сергеевич</b> – соискатель, art.s.mironov@mail.ru	<b>Mironov Atrem Sergeevich</b> – postgraduate, art.s.mironov@mail.ru
Иркутский государственный университет путей сообщения, г.Иркутск, Россия	Irkutsk state transport university, Irkutsk, Russia

*Получена 02.04.2019*