



Информация об авторах

Антошкин Станислав Борисович – к. т. н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: antoshkinsb@gmail.com

Баканов Максим Витальевич – магистрант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: maximbakanov@mail.ru

Сизых Виктор Николаевич – д. т. н., доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sizykh_vn@mail.ru

Authors

Stanislav Borisovich Antoshkin – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: antoshkinsb@gmail.com

Maksim Vital'evich Bakanov – Master's student, Irkutsk State Transport University Irkutsk, e-mail: maximbakanov@mail.ru

Viktor Nikolaevich Sizykh – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sizykh_vn@mail.ru

Для цитирования

Антошкин С. Б. Система управления автономного робота на основе метода обратных задач динамики / С. Б. Антошкин, М. В. Баканов, В. Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 15–23. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).15–23

For citation

Antoshkin S. B., Bakanov M. V., Sizykh V. N. Sistema upravleniya avtonomnogo robota na osnove metoda obratnykh zadach dinamiki [An autonomous robot control system based on an inverse problems method in dynamics]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2, pp. 15–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).15–23

УДК 62.752, 621.534.833; 888.6

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).23–33

А. В. Елисеев, С. В. Елисеев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: 22 марта 2019 г.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИАДЫ В ПОДХОДАХ С ПОЗИЦИЙ МЕЗОМЕХАНИКИ

Аннотация. В статье рассматриваются основные теоретические положения научной концепции, позволяющей производить оценку динамических свойств механических колебательных систем, в состав которых включены особые структурные образования. Такого рода образования из типовых элементов называются диадами и используются в математическом моделировании объектов, расчетные схемы отображаются структурами, в том числе и колебательными, что предполагает возможность выявления новых динамических свойств и эффектов. Развиваются методологические позиции, создающие потенциал для описания и формирования динамических свойств диад как структурообразующих фундаментальных элементов механических колебательных систем. Цель работы заключается в развитии метода разработки математических моделей для оценки динамических состояний, формируемых начальными условиями задания движения при обеспечении существования характерных точек распределения амплитуд колебаний в виде «узлов колебаний» в режиме безударных колебаний массоинерционных элементов системы. Используются методы структурного математического моделирования, показаны возможности создания режимов, исключающих при определенных начальных условиях возбуждения свободных колебаний эффекты соприкосновения элементов. Получены аналитические соотношения, определяющие вероятность реализации предлагаемых режимов. Приводятся результаты вычислительного моделирования, сформулировано заключение о других направлениях развития спектра динамических свойств. Показаны возможности реализации динамических состояний, при которых массоинерционные элементы диады в своих движениях обеспечивают проявления характерных условно неподвижных точек. Рассмотрены допустимые изменения динамических свойств диады путем введения дополнительных связей, реализуемых массоинерционными элементами различных типов, в том числе и устройствами преобразования движений.

Ключевые слова: диада, структурные образования, характерные точки, преобразование движения, приведенные массы, центр масс.

A. V. Eliseev, S. V. Eliseev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
Received: March 22, 2019

PECULIARITIES OF DYNAMIC PROPERTIES OF A DYAD IN APPROACHES FROM THE PERSPECTIVES OF MEZOMECHANICS



Abstract. *The article considers the main abstract theorems of the scientific approach that makes it possible to evaluate the dynamic properties of mechanical oscillatory systems, which include special structural formations. These types of formations from typical elements are called dyads and are used in mathematical modeling of objects, whose computational schemes are displayed by structures, including vibrational ones, which provides for identifying new dynamic properties and effects. The authors develop methodological viewpoints, which create the possibility of description and formation of the dynamic properties of dyads as the structure-forming fundamental elements of mechanical oscillatory systems. The purpose of the work is to elaborate a method of developing mathematical models to estimate dynamic states formed by the initial conditions of the motion specification, provided that the characteristic points of the distribution of oscillation amplitudes exist in the form of "oscillation nodes" in the mode of shockless oscillations of mass-inertial elements of the system. With this aim in view, methods of structural mathematical modeling are used. The paper shows the possibilities of creating modes that exclude the effects of the contact of elements under certain initial conditions for the excitation of free oscillations. Analytical relationships have been obtained that determine the implementability of the proposed modes. The article provides the results of computational modeling; a conclusion has been drawn up on possible directions for the development of a spectrum of dynamic properties. The authors show the implementability of dynamic states, in which mass-inertial elements of the dyad in their movements ensure manifestations of characteristic conditionally fixed points. They propose the possibilities of changing the dynamic properties of the dyad by introducing additional constraints implemented by mass-inertial elements of various types, including motion translation devices.*

Keywords: *dyad, structural formations, characteristic points, motion translation devices, reduced masses, center of masses.*

Введение

Задачи динамики машин, работающих в условиях интенсивного динамического нагружения, приобретают в настоящее время большую актуальность в связи с необходимостью обеспечения надежности и качества реализации производственных процессов [1, 2].

Многие особенности свойств машин начинают обрабатываться уже на стадиях выбора и обоснования принципиальных конструкторских решений, что находит отражение в расчетных схемах в виде механических колебательных систем.

Задачи оценивания динамических свойств широкого спектра технологических эффектов с использованием расчетных схем в виде механических колебательных систем характерны для вибрационных технологических машин, многих транспортных устройств различного назначения и предполагают использование методов математического моделирования [3, 4]. В ряде работ отражена развернутая детализация представлений в области оценки динамических свойств машин [5–7].

Вместе с тем некоторые вопросы, касающиеся динамики механических колебательных систем, еще не получили достаточной степени детализации свойств, связанных с появлением определенных динамических эффектов, формированием структурных образований, получивших название «диады» [8, 9].

В отдельных работах рассматривались некоторые проблемы, возникающие при учете названных динамических особенностей [5–7]. Под диадами в них понимаются структурные образования, которые можно соотносить с мезоструктурами, обладающими характерными и идентифицируемыми свойствами, определяющими спектр динамических особенностей механических колебательных систем [10–13].

Кроме того, представлены некоторые особенности диад, отражающие возможности обоб-

щения свойств механических колебательных систем [14, 15].

Использование диад и структур, обладающих подобными свойствами, может стать основой оригинальных подходов в задачах оценки свойств механических колебательных систем как расчетных схем мезоструктур, отражающих динамические эффекты, происходящие в достаточно сложных механических объектах или их агрегатах и узлах.

В данной работе исследуется ряд основных положений, определяющих фундаментальные свойства диад, их особенности и характерные формы проявления динамических свойств.

Основные положения. Постановка задачи

Рассматривается структурное образование в форме диады, представляющей собой механическую колебательную систему с двумя степенями свободы. Массоинерционные элементы m_1 и m_2 , формирующие диаду, совершают малые свободные поступательные колебания вдоль общей прямой. Они соединены пружиной с жесткостью k и длиной l , внешние воздействия отсутствуют. Фактором, возмущающим колебания, служат только начальные смещения, начальные скорости равны нулю. Массоинерционные элементы диады совершают колебания относительно статических положений, зависящих в общем случае от начальных условий. В качестве обобщенного варианта рассматривается диада, содержащая в своей структуре дополнительную оригинальную связь, реализованную устройством преобразования движения с массоинерционной характеристикой L (L – приведенная масса механизма) [16].

В процессе свободных колебаний диады в структуре механической колебательной системы возможно возникновение характерных точек, обладающих специальными свойствами. К таким точкам можно, например, отнести неподвижные точки, или равномерно движущиеся точки, или точки, отражающие динамические особенности,



связанные с формированием реакций со стороны упругих элементов системы.

Наравне с возникновением в структуре диады характерных точек, по сути являющихся частичными признаками механической колебательной системы, интерес представляют структурные особенности диады, отражающие ее метрические свойства, как факторы реализации динамических режимов. Так, с одной стороны, начальные условия определяют амплитуды свободных колебаний элементов диады, с другой стороны, в силу конечности упругого элемента диады, возникают соударения при условии превышения амплитудами критических значений, что оказывает воздействие на форму свободных колебаний.

В дополнение к особенностям формирования структурных и динамических свойств диады интересна также роль дополнительных связей, введенных в структуру диады с помощью устройства преобразования движения.

Задачей исследования является разработка на основе использования структурных методов математического моделирования подхода к определению характерных особенностей структурного образования, учитывающих дополнительные связи, сформированные взаимодействием элементов диады в процессе свободных колебаний.

Математическая модель диады

Исследуется диада, образованная двумя массами m_1, m_2 и упругим элементом k_0 (рис. 1).

Зафиксирована инерциальная система координат с началом в точке O . В качестве обобщенных координат используются величины y_1 и y_2 смещений относительно положений статического равновесия:

$$y_1 = y_{r1} - y_{s1}, \quad y_2 = y_{r2} - y_{s2}. \quad (1)$$

где y_{r1}, y_{r2} – координаты m_1, m_2 ; y_{s1}, y_{s2} – координаты m_1, m_2 при условии $y_{s2} = y_{s1} + l$.

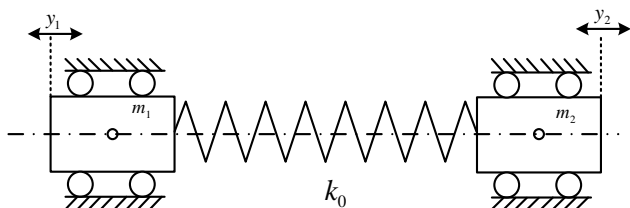


Рис. 1. Диада, образованная массонерционными элементами m_1 и m_2 и упругим элементом k_0 .

Потенциальная и кинетическая энергии в обобщенных координатах имеют вид

$$\Pi = \frac{1}{2} k_0 (y_2 - y_1)^2, \quad T = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2. \quad (2)$$

Уравнения Лагранжа второго рода выглядят так

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + k_0 y_1 - k_0 y_2 = 0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_0 y_2 - k_0 y_1 = 0; \end{cases} \quad (3)$$

начальные условия –

$$y_1(0) = y_{10}, y_2(0) = y_{20}, \dot{y}_1(0) = 0, \dot{y}_2(0) = 0. \quad (4)$$

Преобразование Лапласа системы дифференциальных уравнений (3) с учетом начальных условий (4) приводит к алгебраической системе в изображениях

$$\begin{pmatrix} m_1 p^2 + k_0 & -k_0 \\ -k_0 & m_2 p^2 + k_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 p y_{10} \\ m_2 p y_{20} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Решение системы (5) имеет вид

$$\bar{y}_1 = \frac{y_{10} p^2 + y_{00} \omega_0^2}{p(p^2 + \omega_0^2)}, \quad \bar{y}_2 = \frac{y_{20} p^2 + y_{00} \omega_0^2}{p(p^2 + \omega_0^2)}, \quad (6)$$

где $y_{00} = \frac{m_1 y_{10} + m_2 y_{20}}{m_1 + m_2}$, $\omega_0^2 = \frac{k}{m_{\text{ГП}}}$, $m_{\text{ГП}} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$.

Характерные точки диады

В рамках развиваемого подхода движение характерной точки определяется на основе условий совместности алгебраической системы, объединяющей изображение дифференциальных уравнений движения диады с учетом начальных условий и условий, отражающих особенности характерной точки диады.

В рассматриваемом варианте неподвижная точка диады выбирается из параметрического семейства вида

$$y_\lambda = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2, \quad (7)$$

где параметры λ_1, λ_2 , удовлетворяющие условию $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, определяют возможное положение искомой точки. Критерием выбора точки из параметрического семейства (7) служит условие равенства нулю скорости:

$$\dot{y}_\lambda = \lambda_1 \dot{y}_1 + \lambda_2 \dot{y}_2 = 0. \quad (8)$$

Преобразование Лапласа выражения (8) приводит к выражению:

$$p(\lambda_1 \bar{y}_1 + \lambda_2 \bar{y}_2) = \lambda_1 y_1(0) + \lambda_2 y_2(0). \quad (9)$$

Совместность условий (5) и (9) относительно искомых изображений \bar{y}_1, \bar{y}_2 влечет тождество к нулю определителя расширенной системы в зависимости от p

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 p & \lambda_2 p & \lambda_1 y_{10} + \lambda_2 y_{20} \\ m_1 p^2 + k_0 & -k_0 & m_1 p y_{10} \\ -k_0 & m_2 p^2 + k_0 & m_2 p y_{20} \end{vmatrix} \equiv 0. \quad (10)$$

Тождество (10) эквивалентно условиям

$$k(y_{10} - y_{20})(\lambda_1 m_2 - \lambda_2 m_1) = 0. \quad (11)$$



Если для начальных смещений справедливо $y_{10} - y_{20} = 0$, то упругий элемент в начальный момент времени не деформирован, следовательно, колебание не реализуется.

Выполнение неравенства $y_{10} - y_{20} \neq 0$ влечет $\lambda_1 m_2 - \lambda_2 m_1 = 0$. С учетом соотношения $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ параметры неподвижной точки находятся по следующим формулам, фактически, определяя центр масс диады:

$$\lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}. \quad (12)$$

Аналогично характерная точка может быть определена из условия равномерности движения:

$$\ddot{y}_\lambda = 0 \text{ или } \ddot{\bar{y}}_\lambda = 0. \quad (13)$$

Условия (13) в изображениях примут вид

$$\lambda_1 p^2 \bar{y}_1 + \lambda_2 p^2 \bar{y}_2 = \lambda_1 p y_{10} + \lambda_2 p y_{20}. \quad (14)$$

В силу равенства начальных скоростей нулю условия (9) и (14) эквивалентны.

Наравне с условиями неподвижности в качестве признака для определения характерной точки может быть выбрано условие равенства нулю суммы динамических реакций со стороны упругих элементов.

Рассмотрим вспомогательную механическую колебательную систему (рис. 2), построенную на основе диады (рис. 1) путем внесения дополнительной массы m_3 . Предполагается, что упругий элемент k_0 условно разбивается искомой точкой на два упругих элемента с жесткостями k_1, k_2 , зависящими от длин l_1, l_2

$$k_1 = \frac{\kappa}{l_1}, k_2 = \frac{\kappa}{l_2}, \quad (15)$$

где l_1 и l_2 – длины, полученных после разделения упругих элементов, κ – некоторый параметр.

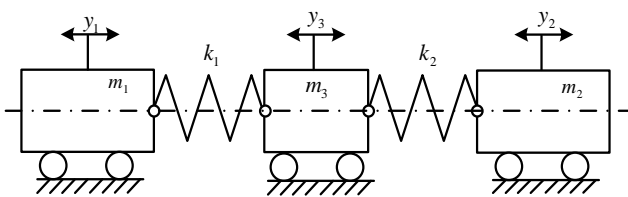


Рис. 2. Вспомогательная механическая колебательная система, образованная на основе рассматриваемой диады

Величины динамических реакций R_1 и R_2 , приложенных к массе m_3 со стороны упругих элементов k_1 и k_2 равны

$$R_1 = -k_1(y_3 - y_1), R_2 = k_2(y_2 - y_3). \quad (16)$$

В искомой точке y_3 должно выполняться условие $R_1 + R_2 = 0$:

$$-k_1(y_3 - y_1) + k_2(y_2 - y_3) = 0. \quad (17)$$

В изображениях уравнение (17) примет вид

$$k_1 \bar{y}_1 + k_2 \bar{y}_2 - (k_1 + k_2) \bar{y}_3 = 0. \quad (18)$$

Потенциальная и кинетическая энергии системы

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} k_1 (y_3 - y_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - y_3)^2, \\ \Gamma &= \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Система уравнений Лагранжа 2-го рода имеет вид

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_1 y_3 = 0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_2 y_2 - k_2 y_3 = 0; \\ m_3 \ddot{y}_3 - k_1 y_1 - k_2 y_2 + (k_1 + k_2) y_3 = 0; \end{cases} \quad (20)$$

начальные условия –

$$\begin{aligned} y_1(0) = y_{10}, y_2(0) = y_{20}, y_3(0) = y_{30}, \\ \dot{y}_1(0) = 0, \dot{y}_2(0) = 0, \dot{y}_3(0) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

В изображениях система дифференциальных уравнений (20) учетом условия (18) на характерную точку может быть представлена в виде

$$\begin{pmatrix} -k_1 & -k_2 & k_1 + k_2 \\ m_1 p^2 + k_1 & 0 & -k_1 \\ 0 & m_2 p^2 + k_2 & -k_2 \\ -k_1 & -k_2 & m_3 p^2 + k_1 + k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \bar{y}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ m_1 p y_{10} \\ m_2 p y_{20} \\ m_3 p y_{30} \end{pmatrix}.$$

Наличие искомой характерной точки предполагает совместность системы уравнений (21). Это, в свою очередь, означает, что при нулевом начальном смещении дополнительной массы m_3 тождество нулю определителя от p

$$\begin{vmatrix} -k_1 & -k_2 & k_1 + k_2 & 0 \\ m_1 p^2 + k_1 & 0 & -k_1 & m_1 p y_{10} \\ 0 & m_2 p^2 + k_2 & -k_2 & m_2 p y_{20} \\ -k_1 & -k_2 & m_3 p^2 + k_1 + k_2 & 0 \end{vmatrix} \equiv 0. \quad (22)$$

Упрощение (22) приводит к выражению

$$-m_3 p^3 (m_1 m_2 p^2 (k_1 y_{10} + k_2 y_{20}) + k_1 k_2 (m_1 y_{10} + m_2 y_{20})) \equiv 0. \quad (23)$$

Тождество (22) эквивалентно системе

$$\begin{cases} k_1 y_{10} + k_2 y_{20} = 0; \\ m_1 y_{10} + m_2 y_{20} = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Система (23) имеет ненулевое решение с учетом, что $k_i = \frac{\kappa}{l_i}$ при условии

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (25)$$



Таким образом, характерная точка, в которой выполнено равенство нулю суммы динамических реакций, также представляет собой центр масс диады.

Вместе с тем интересными для рассмотрения являются характерные точки диады при наличии дополнительных связей, реализуемых встроенным устройством преобразования движения с массоинтерционным параметром L .

Определение характерных точек диады, содержащей устройство преобразования движения

Определим характерную точку диады с учетом встроенного устройства преобразования движения из условия на скорость. Представлена расчетная схема диады с дополнительной связью (рис. 3).

Потенциальная и кинетическая энергии в обобщенных координатах имеют вид

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} k_0 (y_2 - y_1)^2, \\ T &= \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} L (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2. \end{aligned} \quad (26)$$

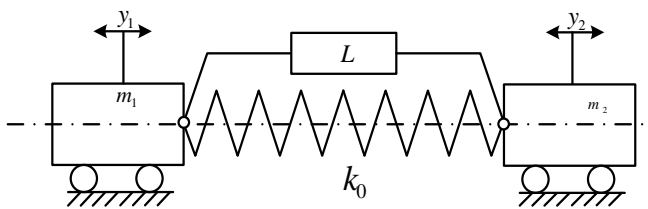


Рис. 3. Расчетная схема диады с дополнительной связью, реализованной устройством преобразования движений

Уравнения Лагранжа 2-го рода в изображенных имеет вид:

$$\begin{pmatrix} (m_1 + L)p^2 + k_0 & -k_0 \\ -k_0 & (m_2 + L)p^2 + k_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_1 + L)py_{10} \\ (m_2 + L)py_{20} \end{pmatrix} \quad (27)$$

Положение характерной точки $y_{L,\lambda}$ с нулевой скоростью находится из условий

$$\dot{y}_{L,\lambda} = \lambda_1 \dot{y}_1 + \lambda_2 \dot{y}_2 = 0, \quad (28)$$

где для искомой точки $y_{L,\lambda} = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2$ выполняется условие $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$.

В изображениях условие (28) принимает вид $p(\lambda_1 \bar{y}_1 + \lambda_2 \bar{y}_2) = \lambda_1 y_1(0) + \lambda_2 y_2(0)$.

Условия совместности системы уравнений (27) и линейного выражения (29) влечет тождественное равенство нулю определителя соответствующей расширенной системы:

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 p & \lambda_2 p & \lambda_1 y_{10} + \lambda_2 y_{20} \\ (m_1 + L)p^2 + k_0 & -k_0 & (m_1 + L)py_{10} \\ -k_0 & (m_2 + L)p^2 + k_0 & (m_2 + L)py_{20} \end{vmatrix} = 0. \quad (30)$$

Тождественное равенство нулю определителя (30) (19) эквивалентно условиям

$$k_0 (y_{10} - y_{20})(L\lambda_1 - L\lambda_2 + \lambda_1 m_2 - \lambda_2 m_1) = 0. \quad (31)$$

Если $y_{10} - y_{20} = 0$, то колебание диады не реализуется. Если $y_{10} - y_{20} \neq 0$, то выполняется равенство $L\lambda_1 - L\lambda_2 + \lambda_1 m_2 - \lambda_2 m_1 = 0$, которое с учетом условия $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ определяет параметры λ_1 и λ_2 неподвижной точки:

$$\lambda_1 = \frac{m_1 + L}{m_1 + m_2 + 2L}, \quad \lambda_2 = \frac{m_2 + L}{m_1 + m_2 + 2L}. \quad (32)$$

Определяем характерную точку, отвечающую условиям нулевой суммарной динамической реакции со стороны упругих элементов. Рассматривается вспомогательная система (рис. 4), построенная на основе системы, представленной на рис. 3, образованная образованной путем добавления массы m_3 между упругими элементами k_1 и k_2 (см. рис. 3).

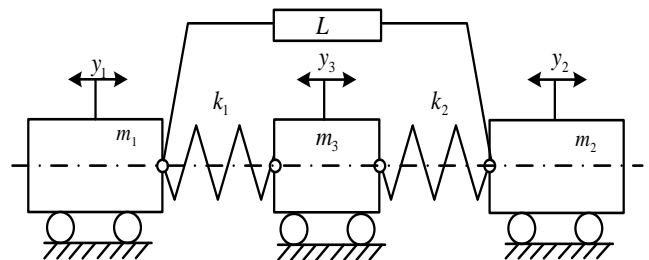


Рис. 4. Вспомогательная механическая система с устройством для преобразования движения

Потенциальная и кинетическая энергии системы

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} k_1 (y_3 - y_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - y_3)^2, \\ T &= \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2 + \\ &+ \frac{1}{2} L (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2. \end{aligned} \quad (33)$$

Уравнение Лагранжа 2-го рода имеет вид

$$\begin{cases} (m_1 + L)\ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_1 y_3 = 0; \\ (m_2 + L)\ddot{y}_2 + k_2 y_2 - k_2 y_3 = 0; \\ m_3 \ddot{y}_3 - k_1 y_1 - k_2 y_2 + (k_1 + k_2) y_3 = 0; \end{cases} \quad (34)$$

начальные условия –

$$\begin{aligned} y_1(0) &= y_{10}, y_2(0) = y_{20}, y_3(0) = y_{30}, \\ \dot{y}_1(0) &= 0, \dot{y}_2(0) = 0, \dot{y}_3(0) = 0, \\ y_1(0) &= y_{10}, y_2(0) = y_{20}, y_3(0) = y_{30}, \\ \dot{y}_1(0) &= 0, \dot{y}_2(0) = 0, \dot{y}_3(0) = 0. \end{aligned} \quad (35)$$



Преобразование (17), (34) приводит к системе

$$\begin{pmatrix} -k_1 & -k_2 & k_1+k_2 \\ (m_1+L)p^2+k_1 & 0 & -k_1 \\ 0 & (m_2+L)p^2+k_2 & -k_2 \\ -k_1 & -k_2 & m_3p^2+k_1+k_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \bar{y}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ (m_1+L)py_{10}+(m_1+L)y_{11} \\ (m_2+L)py_{20}+(m_2+L)y_{21} \\ m_3py_{30}+m_3y_{31} \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Совместность системы (36) с учетом равенства начального смещения массы m_3 нулю приводит к тождеству

$$\begin{vmatrix} -k_1 & -k_2 & k_1+k_2 & 0 \\ (m_1+L)p^2+k_1 & 0 & -k_1 & (m_1+L)py_{10} \\ 0 & (m_2+L)p^2+k_2 & -k_2 & (m_2+L)py_{20} \\ -k_1 & -k_2 & m_3p^2+k_1+k_2 & 0 \end{vmatrix} \equiv 0. \quad (37)$$

Тождественное равенство определителя нулю (37) эквивалентно условиям

$$\begin{cases} k_1y_{10}+k_2y_{20}=0; \\ (m_1+L)y_{10}+(m_2+L)y_{20}=0. \end{cases} \quad (38)$$

Существование решения системы (38) с учетом $k_i = \frac{\kappa}{l_i}$ позволяет получить условия на соотношения длин l_1, l_2 упругих элементов, определяющих положение массоинерционного элемента m_3 , характеризующего точку нулевой динамической реакции:

$$\frac{m_2+L}{m_1+L} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (39)$$

Таким образом, искомые параметры характерной точки, особенностью которой является нулевая суммарная динамическая реакция со стороны упругих элементов, находятся по формулам

$$l_{1,L} = \frac{m_2+L}{m_1+m_2+2L}l, \quad l_{2,L} = \frac{m_1+L}{m_1+m_2+2L}l. \quad (40)$$

Найденные величины $l_{1,L}, l_{2,L}$ определяют положение характерной точки, которая также может быть интерпретирована как положение приведенного центра масс диады, зависящее от массоинерционного параметра L устройства преобразования движения.

Безударные режимы свободных колебаний диады

Начальные условия формируют режим свободных колебаний диады. Вместе с тем увеличение начального раствора между массами приводит к режиму с соударениями. Интересно критическое расстояние между массами диады в начальный момент времени, не превышение которого обеспечивает безударный режим свободных колебаний диады.

1. Рассмотрим диаду, образованную двумя массами и одним упругим элементом (3). Структура решения имеет вид

$$\bar{y}_1 = \frac{y_{10}P^2 + y_{00}\omega_0^2}{p(p^2 + \omega_0^2)}, \quad \bar{y}_2 = \frac{y_{20}P^2 + y_{00}\omega_0^2}{p(p^2 + \omega_0^2)}, \quad (41)$$

где $y_{00} = \frac{m_1y_{10} + m_2y_{20}}{m_1 + m_2}$, $\omega_0^2 = \frac{k}{m_{\text{ГП}}}$, $m_{\text{ГП}} = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2}$.

Решение (3) (1) во временной области будет выглядеть как

$$y_1 = y_{00} - \frac{m_2}{m_1 + m_2}(y_{20} - y_{10})\cos\omega_0 t, \quad (42)$$

$$y_2 = y_{00} + \frac{m_1}{m_1 + m_2}(y_{20} - y_{10})\cos\omega_0 t.$$

Амплитуды колебаний масс m_1 и m_2 составляют соответственно

$$A_1 = -\frac{m_2(y_{20} - y_{10})}{m_1 + m_2}, \quad A_2 = \frac{m_1(y_{20} - y_{10})}{m_1 + m_2}. \quad (43)$$

Исходя из конечности длины l упругого элемента, можно полагать, что безударный режим диады при колебании на собственной частоте реализуется при условиях

$$|A_1| + |A_2| < l \quad \text{или} \quad |y_{20} - y_{10}| < l. \quad (44)$$

Представленное условие определяет максимальный раствор между массами в начальный момент времени для реализации безударного режима колебания диады.

2. Рассмотрим диаду с учетом встроенного устройства для преобразования движения L . Структура решения принимает вид

$$\bar{y}_{1,L} = \frac{y_{10}P^2 + y_{00,L}\omega_{0,L}^2}{p(p^2 + \omega_{0,L}^2)}, \quad (45)$$

$$\bar{y}_{2,L} = \frac{y_{20}P^2 + y_{00,L}\omega_{0,L}^2}{p(p^2 + \omega_{0,L}^2)}$$

где

$$m_{\text{ГП},L} = \frac{(m_1+L)(m_2+L)}{m_1+m_2+2L},$$

$$y_{00,L} = \frac{(m_1+L)y_{10} + (m_2+L)y_{20}}{m_1+m_2+2L},$$

$$\omega_{0,L}^2 = \frac{k}{m_{\text{ГП},L}}$$

являются приведенными характеристиками диады, отражающими понятие массы, центра масс и частоты свободных колебаний. Во временной области формы движения массоинерционных элементов примут вид

$$y_{1,L} = y_{00,L} - \frac{(m_2+L)(y_{20} - y_{10})}{m_1+m_2+2L}\cos\omega_{0,L}t, \quad (46)$$

$$y_2 = y_{00,L} + \frac{(m_1+L)(y_{20} - y_{10})}{m_1+m_2+2L}\cos\omega_{0,L}t;$$



амплитуды колебаний составят

$$A_{1,L} = -\frac{(m_2 + L)(y_{20} - y_{10})}{m_1 + m_2 + 2L}, \quad (47)$$

$$A_{2,L} = \frac{(m_1 + L)(y_{20} - y_{10})}{m_1 + m_2 + 2L}.$$

Критическими начальными смещениями, обеспечивающими безударное движение диады, выступают варианты значений

$$y_{20} - y_{10} = l \text{ или } y_{20} - y_{10} = -l. \quad (48)$$

Это означает, что начальные смещения для безударного режима свободных колебаний диады должны удовлетворять условиям

$$|y_{20} - y_{10}| \leq l. \quad (49)$$

Выражение (49) показывает, что учет L не изменяет начальные условия, обеспечивающие безударный режим колебания.

Вместе с тем для отсутствия смещения относительно неподвижной точки необходимо выполнение условий

$$(m_1 + L)y_{10} + (m_2 + L)y_{20} = 0, \quad (50)$$

их можно представить в виде

$$\frac{y_{20}}{y_{10}} = -\frac{m_1 + L}{m_2 + L},$$

$$\frac{y_{20}}{y_{10}} = -\frac{m_1 + L}{m_2 + L}. \quad (51)$$

В таком случае, величины критических смещений, в частности, имеют вид

$$\hat{y}_{10,L} = \frac{-l(m_2 + L)}{m_1 + m_2 + 2L}, \quad \hat{y}_{20,L} = \frac{l(m_1 + L)}{m_1 + m_2 + 2L}. \quad (52)$$

Начальные смещения (52), соответствующие (51), зависят от массоинерционной характеристики устройства преобразования движения L .

3. Распределение амплитуд колебания масс диады с учетом устройства преобразования движения. Без ограничения общности полагается, что для масс выполнено неравенство

$$m_1 \leq m_2$$

$$m_1 \leq m_2. \quad (53)$$

При его выполнении справедлива система неравенств

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2} \leq \frac{m_1 + L}{m_1 + m_2 + 2L} \leq \frac{1}{2} \leq$$

$$\leq \frac{m_2 + L}{m_1 + m_2 + 2L} \leq \frac{m_2}{m_1 + m_2}. \quad (54)$$

В свою очередь, условия (54) определяют соотношения между амплитудами колебаний A_1 , A_2 и $A_{1,L}$, $A_{2,L}$:

$$|A_1| \geq |A_{1,L}| \geq \frac{|y_{20} - y_{10}|}{2} \geq |A_{2,L}| \geq |A_2|. \quad (55)$$

Таким образом, встраивание устройства преобразования движения в диаду изменяет амплитуду колебания масс и задает систему соотношений между амплитудами колебания масс.

Аналогично условия (54) определяют соотношения между геометрическими характеристиками положения приведенного центра масс диады в соответствии с неравенствами

$$l_1 \geq l_{1,L} \geq \frac{l}{2} \geq l_{2,L} \geq l_2, \quad (56)$$

где $l_{1,L}$, $l_{2,L}$ – расстояния от масс m_1, m_2 до центра приведенных масс, при рассмотрении диады в положении статического равновесия, т. е. $l_1 = l_{1,0}$, $l_2 = l_{2,0}$.

Система соотношений (56) может быть охарактеризована величиной Δl , которая является оценкой вариативности геометрических характеристик диады при изменении массоинерционной характеристики устройств преобразования движения L в диапазоне $[0, \infty)$:

$$\Delta l = \lim_{L \rightarrow 0} l \frac{m_2 + L}{m_1 + m_2 + 2L} - \lim_{L \rightarrow \infty} l \frac{m_2 + L}{m_1 + m_2 + 2L} =$$

$$= \frac{l}{2} \cdot \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}.$$

$$\Delta l = \lim_{L \rightarrow 0} l \frac{m_2 + L}{m_1 + m_2 + 2L} - \lim_{L \rightarrow \infty} l \frac{m_2 + L}{m_1 + m_2 + 2L} =$$

$$= \frac{l}{2} \cdot \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}. \quad (57)$$

Если L считать фиксированным, то величину диапазона изменения переменной $l_{1,\hat{L}}$ при изменении $\hat{L} \in [0, L]$ можно представить как

$$\Delta l_0 = l_{1,L} - l_{1,0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \frac{2L}{m_1 + m_2 + 2L} l. \quad (58)$$

В свою очередь, величина диапазона изменения переменной $l_{1,\hat{L}}$ при изменении $\hat{L} \in [L, \infty)$ будет иметь вид

$$\Delta l_\infty = l_{1,\infty} - l_{1,L} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_2 + 2L} l. \quad (59)$$

Для Δl_∞ и Δl_0 справедливо выполнение равенства

$$|\Delta l_\infty| + |\Delta l_0| = \Delta l. \quad (60)$$

Отношение величин Δl_∞ к Δl_0 определяется как

$$\lambda = \frac{\Delta l_\infty}{\Delta l_0} = -\frac{1}{2} \frac{m_1 + m_2}{L}. \quad (61)$$

Представленная выражением (61) величина λ отражает особенности зависимости массоинерционной



нерционных характеристик диады при варьировании параметра L из текущего состояния до нуля и до бесконечности.

В качестве характеристики чувствительности положения приведенного центра масс диады к изменению массоинерционного параметра устройства преобразования движения L может быть рассмотрена функция $\frac{\partial l_{1,L}}{\partial L}$:

$$\frac{\partial l_{1,L}}{\partial L} = -\frac{(m_2 - m_1)l}{(m_1 + m_2 + 2L)^2}. \quad (62)$$

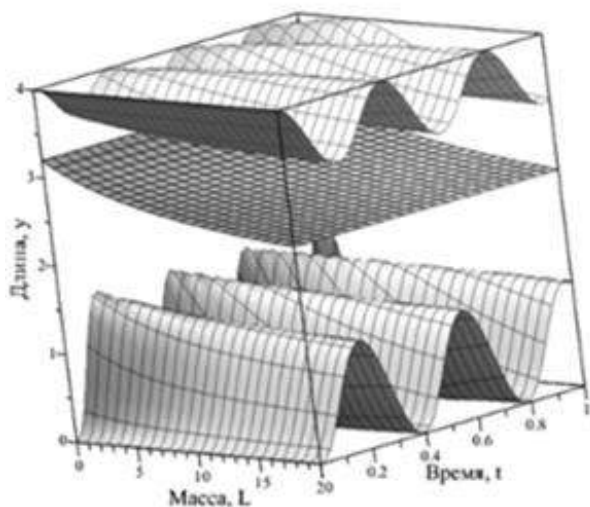
Наличие в числителе выражений (57) и (62) разницы масс $m_2 - m_1$ позволяет интерпретировать асимметрию масс как фактор вариативности динамических и структурных характеристик диады.

Анализ структурных и динамических особенностей диады в зависимости от параметров связи

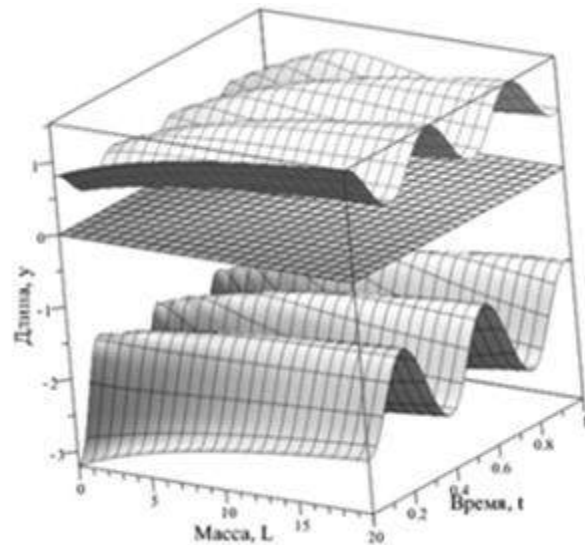
Динамическое состояние, формируемое свободным движением, определяется рядом приведенных неравенств и выражений – (55), (56), (62).

В качестве промежуточных элементов в диаде могут использоваться дополнительные связи, формируемые свойствами инерционных элементов, взаимодействующих между собой в определенном соответствии с величиной параметра L . Приведенные инерционные свойства могут быть сформированы с помощью введения в структуру диады специальных механизмов или устройств для преобразования движений.

Положение неподвижной точки зависит от параметров самой системы, общие представления об особенностях расположения характерных точек дают трехмерные графики (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Поверхности координат масс диады и положения неподвижной точки в зависимости от параметра L и момента времени t для семейства диад, приведенных к общему: а – интервалу; б – центру масс

По оси абсцисс откладывается время процесса колебания, по оси ординат – значение параметра L , по оси аппликат – значения обобщенных координат двух масс диады и положение центра масс для каждого момента времени $t \in [0; 1]$ и значения $L \in [0..20]$.

Семейство диад приведено к общему пространственному интервалу, границы которого определяют крайние положения колеблющихся масс (см. рис. 5, а). Зажатая между синусоидальными поверхностями монотонно убывающая поверхность по параметру L отражает тенденцию смещения приведенного центра масс к средней точке диады.

Кроме того, здесь представлено то же семейство диад, в которых приведенный центр масс установлен в координату аппликаты, равную нулю (см. рис. 5, б).

В таком варианте представления семейства диад синусоидальные поверхности, монотонные по параметру $L \in [0..20]$, отражают тенденцию к изменению занимаемого диадой пространственного интервала, зависящего от величины $m_2 - m_1$, характеризующей асимметрию диады.

При более детальном рассмотрении графиков можно отметить увеличение периода колебаний диады с ростом массоинерционного параметра L .

В свою очередь, особенности восприимчивости рассматриваемых характеристик диады к



изменению параметра L отражаются функцией чувствительности (62).

Структура выражения (62), определяющая чувствительность положения неподвижной точки при свободных колебаниях к параметру L , такова, что при малых значениях L в окрестности малых масс m_1, m_2 могут наблюдаться существенные изменения локальных свойств чувствительности системы.

При дальнейшем увеличении масс тенденции к локальным существенным изменениям свойств уже не наблюдаются. Функция чувствительности в зависимости от m_1 и m_2 элементов диады также представлена на графиках (рис. 6, 7).

Если воспользоваться изометрическим графиком функции чувствительности (рис. 6) и провести пару плоскостей $m_2 = 1$ кг и $m_2 = 6$, то будут получены следующие графики зависимостей (рис. 7).

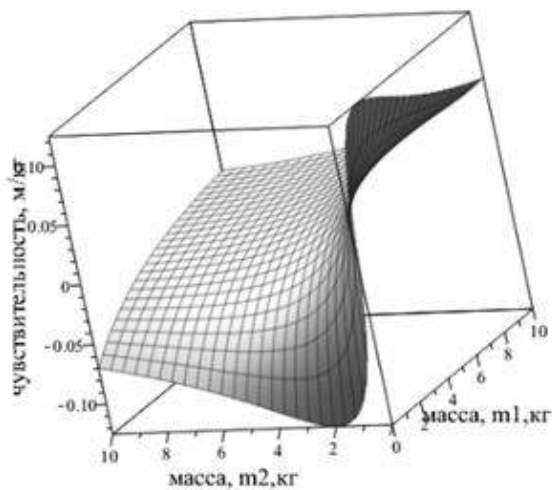


Рис. 6. График чувствительности приведенного центра масс диады ($l = 1$ м) в зависимости от масс диады при фиксированном параметре $L = 1$ кг

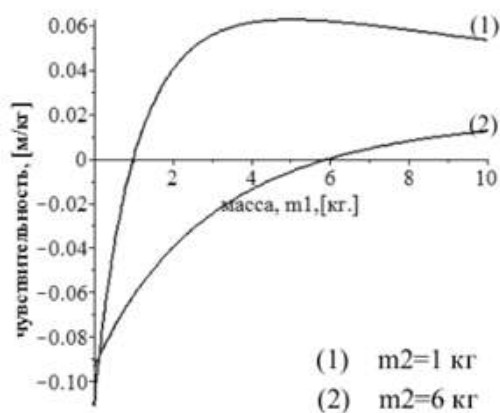


Рис. 7. График чувствительности приведенного центра масс диады ($l = 1$ м) на интервале $m_1 \in [0...10]$:
1 линия $m_2 = 1$ кг, 2 линия $m_2 = 6$ кг

К особенностям полученных графиков следует отнести наличие точек с нулевой чувствительностью, где происходит пересечение графиком оси абсцисс, и точек с экстремальной чувствительностью, где реализуется локальный максимум при изменении массы m_1 .

С учетом приведенных данных анализ выражений (49), (55), (56), (62) позволяет говорить о существовании определенной структуры отношений в диаде.

Так, при задании начальных условий, обеспечивающих реализацию свободных колебаний, по мере увеличения параметра L будут наблюдаться структурные изменения элементов диады, отражаемые в изменении амплитуд колебаний и в перераспределении неподвижных точек.

В свою очередь, динамические изменения связаны с изменением частоты свободных колебаний диады по мере роста параметра L .

Заключение

Предложена формализованная концепция обоснования существования характерных точек и режимов диады. Под характерным режимом понимается режим свободных колебаний диады, совершаемых колебаний вокруг точки, обладающей некоторыми свойствами: неподвижность в заданной системе координат при условии, что начальные скорости равны нулю; совпадение с центром масс; определение границ физической реализации диады.

Рассмотрены варианты обоснования возможности существования неподвижной точки, основанные на предположении о том, что подвижность точки обеспечивается моногармоничностью и синфазностью колебания и условиями динамического равновесия в характерной точке. При этом понимается, что динамическое равновесие обеспечивается динамическими реакциями связи в характерной точке (реакции связи равны по величине и направлены в противоположные стороны). Обоснование возможности существования неподвижной точки могут быть развиты также на основе более формальных представлений о свойствах линейной системы.

Разработан метод определения параметров начальных возмущений, при которых возможна реализация характерной формы движения элементов диады.

Установлено, что аналитические условия, определяющие граничные состояния реализации характерных режимов диады, одновременно определяют и возможности рассмотрения вопросов, связанных с неустойчивыми связями.

Выявлено, что положение неподвижной точки, определяющее форму свободных движе-



ний, зависит от параметров дополнительной связи и может изменяться в зависимости от параметров устройства преобразования движения, что предопределяет возможность настройки или коррекции динамических свойств диады.

Показано, что динамические и структурные особенности диады, отражающие представления о характерных точках и режимах колебаний, предопределяются асимметрией массоинерционных

элементов диады в соотношении с массоинерционными параметрами дополнительных связей.

Исследование проведено в рамках научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ «Разработка методов для оценки динамических свойств движений элементов механических колебательных систем с учетом связности движений и проявления их форм самоорганизации при действии вибрационных возмущений» № АААА-А16-116112350118-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фортов В.Е., Махутов Н.А. Машиностроение России: Состояние и развитие. М. : ОЭММПУ РАН, 2010. 72 с.
2. Лapidус Б. М. Стратегические тренды развития железнодорожного транспорта // Бюл. Объедин. учен. совета ОАО «РЖД». 2015. № 6. С. 2–9.
3. Rocard Y. Dynamique generale des vibrations. Paris : Masson, 1949. 179 p.
4. Clarence W. de Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
5. Karnovsky, I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing, Switzerland, 2016. 708 p.
6. Banakh L., Kempner M. Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure. Berlin : Heidelberg: Springer, 2010. 262 p.
7. Ганиев Р.Ф. Кононенко В.О. Колебания твердых тел. М. : Наука, 1976. 432 с.
8. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник для техн. спец. вузов. Минск : Дизайн ПРО, 2004. 640 с.
9. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М. : Недра, 1986. 144 с.
10. Елисеев А.В. Диады в механических системах: особенности динамических свойств. Ч. I. // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 7 (126). С. 26–38.
11. Елисеев А.В. Диады в механических системах: особенности динамических свойств. Ч. II // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 8. С. 22–37.
12. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
13. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи) : монография. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. 692 с.
14. Елисеев С.В., Каргапольцев С.К. Отображение особенностей соединения механических элементов в теории механических цепей // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XIX Байкал. Всерос. конф. Иркутск, 2014. С. 100–108.
15. Елисеев С.В., Каргапольцев С.К., Кашуба В.Б. Структурные преобразования – отображение динамических взаимодействий в колебательных процессах // Вестн. СамГУПС. 2016. № 4 (34). С. 11–21.
16. Елисеев С.В., Орленко А.И., Нгуен Д.Х. Устройства для преобразования движения в структуре диады механической колебательной системы // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 17. № 3 (90). С. 46–59.
17. Елисеев С.В., Орленко А.И., Елисеев А.В. Структурные образования в механических колебательных системах: диады, их свойства, возможности изменения динамических состояний // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 56–63.
18. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко и др. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2008. С. 523.

REFERENCES

1. Fortov V.E., Makhutov N.A. Mashinostroenie Rossii: Sostoyanie i razvitie [Mechanical Engineering of Russia: State and Development]. Moscow: OEMMPU RAN Publ., 2010. 72 p.
2. Lapidus B. M. Strategicheskie trendy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta [Strategic trends in the development of railway transport]. *Byul. Ob"edin. uchen. soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Academic Council of JSC Russian Railways], 2015. No. 6. Pp. 2–9.
3. Rocard Y. Dynamique generale des vibrations. Paris : Masson, 1949. 179 p.
4. de Silva C. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
5. Karnovsky, I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing, Switzerland, 2016. 708 p.
6. Banakh L., Kempner M. Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure. Berlin : Heidelberg: Springer, 2010. 262 p.
7. Ganiev R.F. Kononenko V.O. Kolebaniya tverdykh tel [Oscillations of solid bodies]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 432 p.
8. Tarasik V. P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem : uchebnik dlya tekhn. spets. vuzov [Mathematical modeling of technical systems: a textbook for engineering university students]. Minsk : Dizain PRO Publ., 2004. 640 p.
9. Vaisberg L.A. Proektirovanie i raschet vibratsionnykh grokhotov [Design and calculation of vibrating screens]. Moscow: Nedra Publ., 1986. 144 p.
10. Eliseev A.V. Diady v mekhanicheskikh sistemakh: osobennosti dinamicheskikh svoistv [Dyads in mechanical systems: features of dynamic properties]. Part I. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017. Vol. 21. No. 7 (126). Pp. 26–38.
11. Eliseev A.V. Diady v mekhanicheskikh sistemakh: osobennosti dinamicheskikh svoistv [Dyads in mechanical systems: features of dynamic properties]. Part II. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017. Vol. 21. No. 8. Pp. 22–37.
12. Eliseev S.V., Artyunin A.I. Prikladnaya teoriya kolebanii v zadachakh dinamiki lineinykh mekhanicheskikh sistem [Applied



theory of oscillations in problems of the dynamics of linear mechanical systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016. 459 p.

13. Eliseev S.V. Prikladnoi sistemnyi analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizhenii, vibratsionnye vzaimodeistviya, rychazhnye svyazi): monografiya [Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of movements, vibration interactions, lever linkages): a monograph]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 692 p.

14. Eliseev S.V., Kargapol'tsev S.K. Otobrazhenie osobennosti soedineniya mekhanicheskikh elementov v teorii mekhanicheskikh tsepei [Presentation of specific aspects of the connection of mechanical elements in the theory of mechanical chains]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: tr. XIX Baikal. Vseros. Konf [Information and mathematical technologies in science and management: Proc. of XIX Baikal All-Russian conf.]*. Irkutsk, 2014. Pp. 100–108.

15. Eliseev S.V., Kargapol'tsev S.K., Kashuba V.B. Strukturnye preobrazovaniya – otobrazhenie dinamicheskikh vzaimodeistviy v kolebatel'nykh protsessakh [Structural transformations are the display of dynamic interactions in oscillatory processes]. *Vestnik SamGUPS*, 2016. No. 4 (34). Pp. 11–21.

16. Eliseev S.V., Orlenko A.I., Nguen D.Kh. Ustroistva dlya preobrazovaniya dvizheniya v strukture diady mekhanicheskoi kolebatel'noi sistemy [Motion translation devices in the structure of the dyad of a mechanical oscillatory system]. *Vestn. Donsk. gos. tekhn. un-ta [Vestnik of DSTU]*, 2017. Vol. 17. No. 3 (90). Pp. 46–59.

17. Eliseev S.V., Orlenko A.I., Eliseev A.V. Strukturnye obrazovaniya v mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistemakh: diady, ikh svoistva, vozmozhnosti izmeneniya dinamicheskikh sostoyanii [Structural formations in mechanical oscillatory systems: dyads, their properties, changeabilities of dynamic states]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2017. No. 3 (54). Pp. 56–63.

18. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. et al. Dinamicheskii sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob"ektov [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical facilities]. Irkutsk: IGU Publ., 2008. Pp. 523.

Информация об авторах

Authors

Елисеев Андрей Владимирович – к. т. н., доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eavsh@ya.ru

Елисеев Сергей Викторович – д. т. н., профессор, советник при ректорате по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Andrei Vladimirovich Eliseev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eavsh@ya.ru

Sergei Viktorovich Eliseev – Doctor of Engineering Science, Professor, Rectorate Adviser for Academic Affairs, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Для цитирования

For citation

Елисеев А. В. Особенности динамических свойств диады в подходах с позиций мезомеханики / А. В. Елисеев, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 23–33. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).23–33

Eliseev A. V., Eliseev S. V., Sizykh V. N. Osobennosti dinamicheskikh svoistv diady v podkhodakh s pozitsii mezomekhaniki [Peculiarities of dynamic properties of a dyad in approaches from the perspectives of mezo mechanics]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2, pp. 23–33. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).23–33

УДК 621.8.034

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).33–40

А. Г. Пермяков², В. И. Шастин¹, С. К. Каргапольцев¹, А. В. Лившиц¹, В. В. Лгалов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²АО «Иркутский релейный завод», г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 18 марта 2019 г.

УДАЛЕНИЕ ЗАУСЕНЦЕВ С ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Аннотация. Статья посвящена актуальным вопросам исследования процесса кавитационного удаления заусенцев с поверхности малогабаритных деталей коммутационной техники. Цель исследования заключается в разработке метода обработки деталей в жидкой среде при возбуждении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности и оценки их воздействия на объект исследования. Предложена методика и разработано лабораторное оборудование для проведения экспериментальных исследований. Выявлены наиболее функционально и практически значимые факторы, влияющие на активность процесса обработки, позволяющие многократно увеличить его эффективность. Рассмотрены возможные варианты обработки деталей из различных материалов, наиболее широко используемых в изделиях коммутационной техники. Исследовано влияние избыточного гидростатического давления и активизирующих добавок в рабочую среду в виде абразивных материалов и химически активных компонентов. Сформулированы технологические рекомендации удаления заусенцев с труднодоступных внутренних поверхностей, в том числе в пересекающихся каналах малого диаметра, и притупления острых кромок. Приведено описание