

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ В ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ УСЛОВИИ СВЯЗНОСТИ ВНЕШНИХ СИЛОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

*Елисеев А.В.<sup>1,2</sup>, Кузнецов Н.К.<sup>2</sup>, Николаев А.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Иркутский государственный университет путей сообщения;*

<sup>2</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия*

**Ключевые слова:** структурные методы математического моделирования, механические колебательные системы, режимы динамического гашения колебаний, передаточные функции, динамическая податливость, динамические инварианты, связность внешних силовых возмущений.

**Аннотация.** Развивается методология структурного математического моделирования в задачах оценки, контроля и формирования динамических взаимодействий элементов технических объектов транспортного и технологического назначения, находящихся в условиях внешних силовых возмущений. Рассматривается задача отображения изменений структурных особенностей механических колебательных систем с двумя степенями свободы в виде многообразия динамических инвариантов. Рассмотрены структурные особенности механических колебательных систем, принимающие критические значения массоинерционных параметров и параметров жесткости элементов системы. В рамках концепции динамических инвариантов структурные особенности механических колебательных систем отображены интегральными характеристиками, обозначающими количество динамических особенностей в виде резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний координат объекта, положительных и отрицательных форм динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем при условии связности внешних силовых возмущений. Разработан подход в рамках методологии структурного математического моделирования для интерпретации структурных особенностей механических колебательных систем с помощью динамических инвариантов.

## DYNAMIC INVARIANTS IN THE EVALUATION OF STRUCTURAL FEATURES OF MECHANICAL OSCILLATORY SYSTEMS UNDER THE CONDITION OF CONNECTIVITY OF EXTERNAL FORCE DISTURBANCES

*Eliseev A.V.<sup>1,2</sup>, Kuznetsov N.K.<sup>2</sup>, Nikolaev A.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Irkutsk State Transport University;*

<sup>2</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Keywords:** structural methods of mathematical modeling, mechanical oscillatory systems, modes of dynamic damping of vibrations, transfer functions, dynamic compliance, dynamic invariants, connectivity of external force disturbances.

**Abstract.** The methodology of structural mathematical modeling is being developed in the tasks of evaluation, control and formation of dynamic interactions of elements of technical objects of transport and technological purposes under conditions of external force disturbances. The problem of displaying changes in the structural features of mechanical oscillatory systems with two degrees of freedom in the form of a variety of dynamic invariants is considered. Structural features of mechanical oscillatory systems taking critical values of mass-inertia parameters and stiffness parameters of system elements are considered. Within the framework of the concept of dynamic

invariants, structural features of mechanical oscillatory systems are represented by integral characteristics denoting the number of dynamic features in the form of resonances, modes of zeroing the amplitudes of the oscillation of the coordinates of the object, positive and negative forms of dynamic interactions of elements of mechanical oscillatory systems under the condition of connectivity of external force disturbances. An approach has been developed within the framework of the methodology of structural mathematical modeling for the interpretation of structural features of mechanical oscillatory systems using dynamic invariants.

**Введение.** В настоящее время значительное внимание уделяется проблемам безопасности технических объектов транспортного и технологического назначения в условиях вибрационного нагружения, проблемам обеспечения динамического качества взаимодействия элементов вибрационных технологических машин [1]. Решение широкого круга задач динамики, связанных с проблемами обеспечения динамического качества технологических вибрационных машин или работы технических объектов транспортного назначения в условиях вибрационных нагружений, предполагает разработку методологической базы, основы, позволяющей в рамках системного подхода проводить оценку, контроль и формирование динамических состояний механических колебательных систем, рассматриваемых в качестве расчетных схем широкого класса технических объектов [2-5]. Особое внимание в формировании динамических состояний вибрационных технологических машин уделяется учету неустойчивых связей как ключевого фактора специальных динамических режимов [7-13].

В рамках методологии структурного математического моделирования механическим колебательным системам, используемым в качестве расчетных схем технических объектов, сопоставляются схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. На основе структурной схемы для оценки динамических состояний объекта строится передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика которой, представляющая в физическом смысле динамическую податливость упругой системы в зависимости от частоты внешнего возмущения, отображает динамические особенности в виде частот резонанса, режимов обнуления амплитуд колебания оцениваемого объекта и форм динамического взаимодействия элементов механической колебательной системы. Приложение к системе дополнительной силы с учетом связности позволяет построить семейство амплитудно-частотных характеристик. В общем случае, зависящее от коэффициента связности сил, бесконечное семейство амплитудно-частотных характеристик может быть разбито на конечное множество так называемых динамических инвариантов, отображающих целочисленные особенности податливостей системы.

Вместе с тем, изменение структурных особенностей механических колебательных систем, выражающихся в достижении параметрами системы критических значений, может привести к изменению динамических свойств механической колебательной системы, которые могут быть отображены набором динамических инвариантов [14-19].

Статья посвящена разработке метода оценки динамических состояний механических колебательных систем в зависимости от структурных особенностей.

**I. Основные положения. Постановка задачи.** Рассматривается механическая колебательная система, образованная массоинерционным элементом  $m_1$ , отображающим объект оценки, и дополнительным массоинерционным элементом  $m_2$  (рис. 1). Массоинерционные элементы связаны между собой и с опорными поверхностями с помощью упругих элементов с жесткостями  $k_1, k_2, k_3$ . К элементу  $m_1$  приложено силовое возмущение  $Q_1$ , к элементу  $m_2$  – дополнительное силовое возмущение  $Q_2 = \gamma Q_1$ , где  $\gamma$  – коэффициент связности. Под воздействием синфазных силовых возмущений  $Q_1, Q_2$  элементы  $m_1, m_2$  совершает малые установившиеся колебания  $y_1, y_2$  относительно положения статического равновесия.

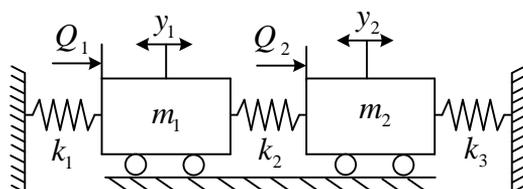


Рис. 1. Механическая колебательная система:  $m_1, m_2$  – массоинерционные элементы;  $k_1, k_2, k_3$  – жесткости упругих элементов;  $y_1, y_2$  – обобщенные координаты,  $Q_1, Q_2$  – внешние силы

При условии отсутствия дополнительной силы  $\gamma = 0$  система совершает малые вынужденные установившиеся колебания на частоте внешнего силового возмущения. Динамические особенности движения массоинерционного элемента  $m_1$  могут быть охарактеризованы с помощью динамической податливости, равной отношению амплитуды колебания массоинерционного элемента к амплитуде силового возмущения. Динамическая податливость как величина, зависящая от частоты внешнего возмущения, определяется параметрами системы, включая парциальные частоты и собственные частоты системы. Бесконечное множество динамических податливостей может быть разбито на конечное число подмножеств, условно называемых динамическими инвариантами, отображающих существенные особенности взаимодействия элементов механической колебательной системы. Приложение к массоинерционному элементу  $m_2$  семейства дополнительных силовых возмущений в зависимости от коэффициента связности определяет множество состояний, которые могут быть охарактеризованы набором динамических инвариантов. Вместе с тем, открытым является вопрос зависимости наборов динамических инвариантов от структурных особенностей механических колебательных систем, выражаемых в терминах предельных значений параметров исходной системы.

Задача заключается в оценке совокупности динамических состояний в зависимости от параметров механической колебательной системы.

**II. Математическая модель.** На основе использования известных методов [2-5], включающих построение системы дифференциальных уравнений в рамках формализма Лагранжа и интегральных преобразований Лапласа, расчетная схема может быть представлена структурной схемой эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (рис. 2), где  $\bar{Q}_1$  – является входным сигналом, а  $\bar{y}_1$  – выходным.

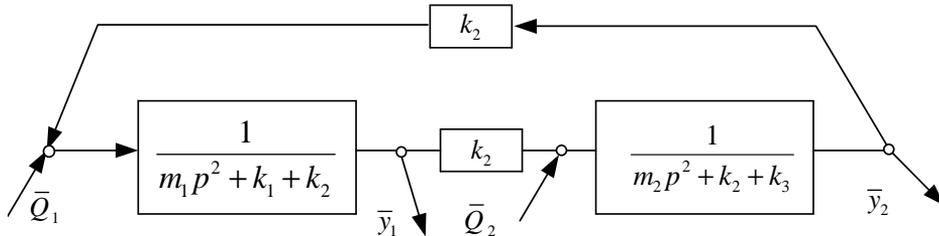


Рис. 2. Структурная схема механической колебательной системы.  $p=j\omega$  – комплексная переменная,  $j=\sqrt{-1}$ , символ «-» над переменной означает преобразование Лапласа [20]

На основе структурной схемы (рис. 2) с может быть построено передаточное отношение  $\bar{y}_1/\bar{Q}_1$ :

$$\bar{Q}_1 \neq 0, \bar{Q}_2 = \gamma \bar{Q}_1, W_{11}(\gamma, p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} \Big|_{\substack{z_1=0 \\ z_2=0}} = \frac{m_2 p^2 + k_2 + k_3 + \gamma k_2}{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2}. \quad (1)$$

Соответствующая амплитудно-частотная характеристика имеет вид:

$$W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{-m_2 \omega^2 + k_2 + k_3 + \gamma k_2}{m_1 m_2 \omega^4 - (m_2(k_1 + k_2) + m_1(k_2 + k_3))\omega^2 + k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3}. \quad (2)$$

В физическом смысле амплитудно-частотная характеристика отображает динамическую податливость. В зависимости от параметров системы и значений коэффициента связности амплитудно-частотные характеристики могут отображать множество динамические особенностей механической колебательной системы (рис. 3). В общем случае существенные особенности бесконечного множества амплитудно-частотных характеристик могут быть представлены с помощью конечного набора динамических инвариантов [19]. В свою очередь характеристики динамических инвариантов могут быть представлены выражениями вида  $S_i^j F_k^l$ , где  $i$  – количество состояний обнуления амплитуд колебаний,  $j$  – количество резонансов,  $k$  – количество отрицательных динамических форм взаимодействий,  $l$  – количество положительных форм взаимодействий. В наиболее обобщенной форме существенные особенности динамических состояний могут быть представлены в виде интегральной характеристики, равной сумме динамических особенностей.

В зависимости от уровня детализации представлений амплитудно-частотные характеристики (рис. 3,а-н) могут быть представлены в виде динамических инвариантов с характеристиками  $S_\infty^0 F_0^0, S_0^0 F_0^1, \dots, S_1^2 F_2^2$ . В наиболее обобщенной точки представленные характеристики могут быть

представлены в виде наборов характеристик  $J_\infty, J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7$ , отображающих с помощью индекса сумму динамических особенностей.

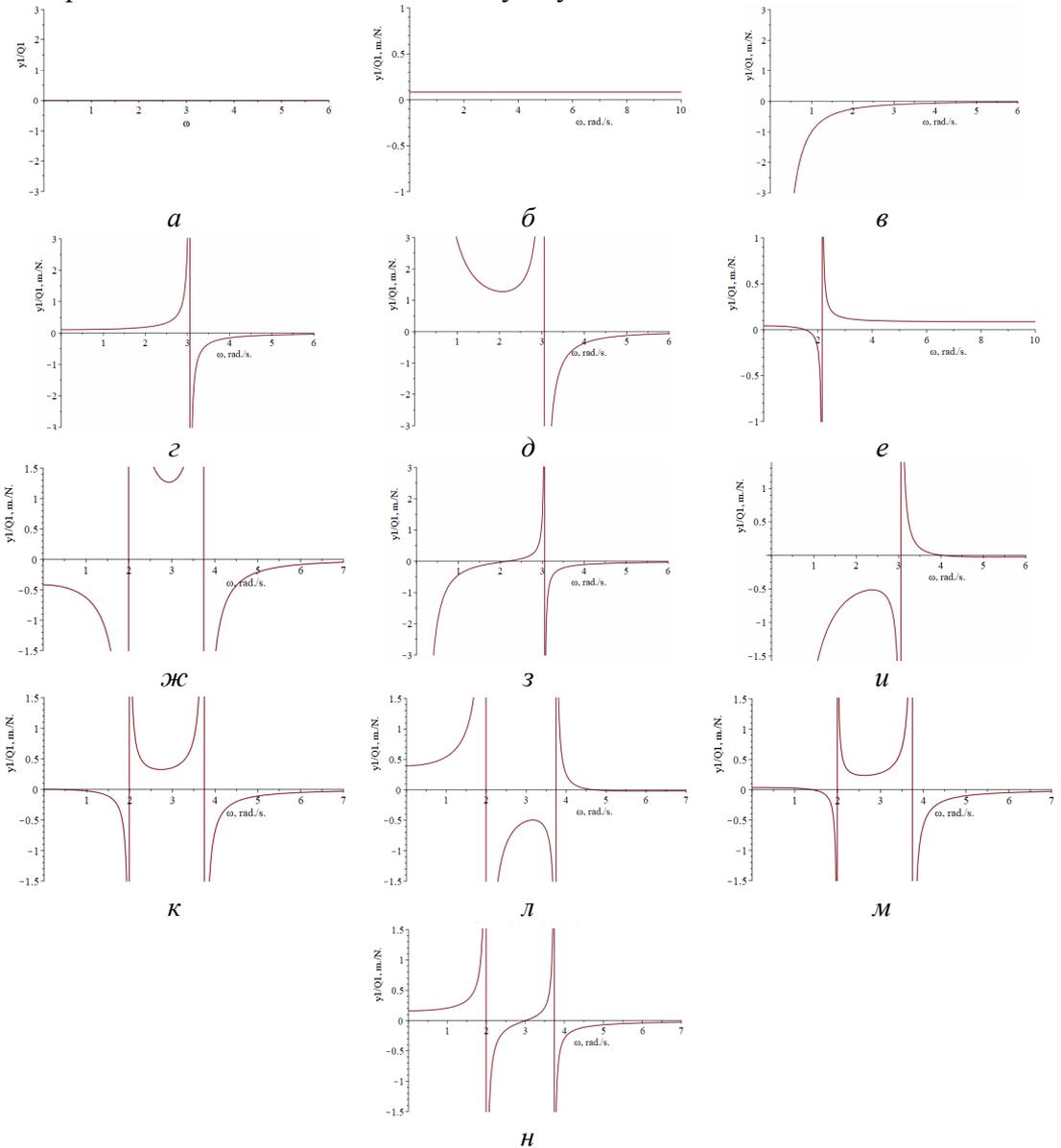


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики с заданными характеристиками динамических инвариантов. а)  $S_\infty^0 F_0^0$ , б)  $S_0^0 F_0^1$ , в)  $S_0^1 F_1^1$ , г)  $S_0^2 F_1^1$ , д)  $S_0^2 F_1^1$ , е)  $S_1^1 F_1^2$ , ж)  $S_0^2 F_2^1$ , з)  $S_1^1 F_2^1$ , и)  $S_1^2 F_2^1$ , к)  $S_1^2 F_2^1$ , л)  $S_1^2 F_2^2$ , м)  $S_1^2 F_2^2$ , н)  $S_1^2 F_2^2$

**III. Оценка связи динамических многообразий в зависимости от структурных особенностей механической колебательной системы.** В рамках разработанной концепции могут быть построены зависимости динамических многообразий состояний от параметров системы. В обобщенном виде особенности динамических совокупностей могут быть представлены в виде графа динамических многообразий (рис. 4).

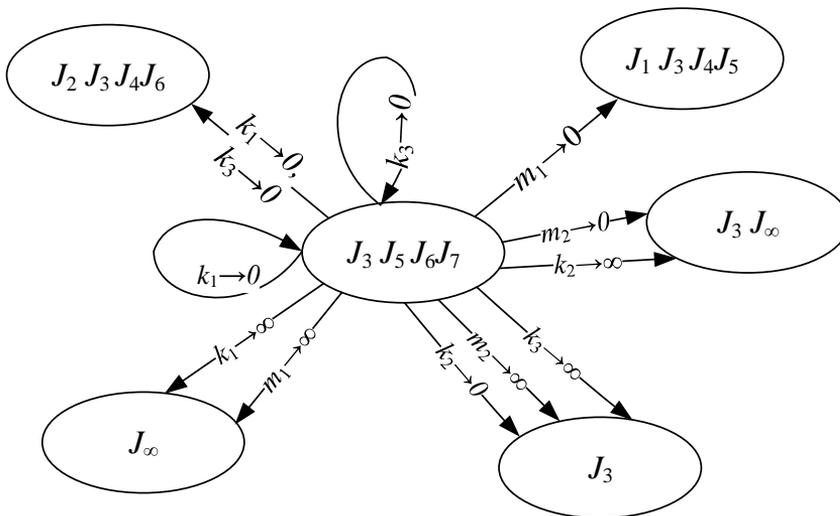


Рис. 4. Граф динамических многообразий

Совокупность динамических состояний, отображающая структуру механической колебательной системы (рис. 1) при условии, что собственные частоты отличны от нуля и различны представляются динамическими инвариантами с характеристиками  $J_3 J_5 J_6 J_7$ . Обнуление упругой связи с одной из опорных поверхностей  $k_1 \rightarrow 0$  или  $k_3 \rightarrow 0$  не изменяет многообразие динамических инвариантов. Вместе с тем, одновременное обнуление упругих связей с обеими опорным поверхностями  $k_1 \rightarrow 0, k_3 \rightarrow 0$  приводит к формированию механической колебательной системы, обладающей динамическим многообразием состояний с характеристиками  $J_2 J_3 J_4 J_6$ . Обнуление массоинерционного элемента  $m_1$  так же приводит к формированию механической колебательной системы со специфическим набором динамических инвариантов, обладающим характеристиками  $J_2 J_3 J_4 J_6$ . Неограниченное увеличение жесткости  $k_1 \rightarrow \infty$  или массы  $m_1 \rightarrow \infty$  приводит к запираанию система на любой частоте, что выражается динамическим инвариантом с характеристикой  $J_\infty$ . При выполнении одного из условий  $k_3 \rightarrow \infty, m_2 \rightarrow \infty, k_2 \rightarrow 0$  система обладает динамическим многообразием в виде  $J_3$ , что может быть охарактеризовано как редукция к системе с одной степенью свободы. Выполнение одного из условий  $m_2 \rightarrow 0, k_2 \rightarrow \infty$  приводит к динамическом многообразию  $J_3 J_\infty$ .

**Заключение.** Рассмотрена механическая колебательная система с двумя степенями свободы, находящаяся под воздействием связной совокупности силовых возмущений. В рамках методологии структурного математического моделирования введено понятие динамического инварианта, отображающего представление о структурных особенностях динамической податливости оцениваемого объекта механической колебательной системы, находящейся под воздействием внешних силовых возмущений, зависящих от коэффициента связности. Изменение коэффициента связности внешних возмущений формирует многообразие динамических податливостей

механической колебательной системы в виде конечного набора динамических инвариантов, количество динамических особенностей которых отображается интегральными характеристиками в виде кусочно-постоянных функций коэффициента связности.

На основе перебора возможных критических параметров механической колебательной системы устанавливается связь между структурными особенностями механической колебательной системы и многообразиями динамических податливостей в виде ориентированного графа. Вершинами графа служат совокупности характеристик динамических инвариантов или их интегральные характеристики. Направленными дугами служат критические параметры, отражающие структурные особенности механической колебательной системы.

Таким образом, разработан подход к оценке динамических податливостей системы, нагруженной связными силовыми возмущениями, в зависимости от структурных особенностей системы.

### Список литературы

1. Лончих П.А. Динамическое качество машин и оборудования как инструмент обеспечения надежности производства и конкурентоспособности процессов / П.А. Лончих, С.В. Елисеев. – Иркутск: Иркутский гос. технический ун-т, 2014. – 322 с.
2. Елисеев С.В. Методология системного анализа в задачах оценки, формирования и управления динамическим состоянием технологических и транспортных машин / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев, Р.С. Большаков, А.П. Хоменко – Новосибирск: Наука, 2021. – 679 с.
3. Eliseev S.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling In Problems Of Dynamics Of Technical Objects / S.V. Eliseev, A.V. Eliseev. – Cham, 2019. – 521 p.
4. Елисеев А.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей / А.В. Елисеев, В.В. Сельвинский, С.В. Елисеев. – Новосибирск: Наука, 2015. – 332 с.
5. Елисеев А.В. Динамика машин. Системные представления, структурные схемы и связи элементов / А.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, А.О. Московских. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 381 с.
6. Хоменко А.П. Упругие элементы в механических системах. Структурные интерпретации / А.П. Хоменко, С.В. Елисеев, А.И. Артюнин, А.В. Елисеев, Р.С. Большаков, Е.В. Каимов. – Депонированная рукопись № 230 – В 2013 02.08.2013.
7. Елисеев А.В. Особенности взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью в зависимости от дополнительной силы с неудерживающей связью // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 3. С. 9-15.
8. Елисеев А.В. Особенности реализации режима кратного подбрасывания в модельной задаче с неудерживающей связью при наличии вязкого трения // Наука в центральной России. 2013. № 2S. С. 42-47.
9. Елисеев С.В. Особенности возникновения зазора в механической системе с неудерживающей связью при импульсном воздействии / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2 (38). С. 36-45.

10. Елисеев С.В. Движение материальной частицы с подбрасыванием на примере модельной задачи с неударяющими связями / С.В. Елисеев, И.С. Ситов, А.В. Елисеев // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 3 (13). С. 53-58.
11. Елисеев С.В. Характеристики взаимодействия материальной частицы и поверхности колебания в зависимости от постоянной силы с учетом неударяющей связи / С.В. Елисеев, И.С. Ситов, А.В. Елисеев // Техника и технология: новые перспективы развития. 2012. С. 20-23.
12. Елисеев А.В. Технология оценки свойств динамического взаимодействия в контактах составных твердых тел // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1-2. С. 179-183.
13. Елисеев С.В. Обобщенные подходы в задачах определения контактных реакций в твердых телах при статических нагрузках с учетом неударяющих связей / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4 (40). С. 51-60.
14. Елисеев А.В. Проблема гашения колебаний в механических системах: системный анализ, моделирование, управление / А.В. Елисеев, А.П. Хоменко // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 5. С. 236-245.
15. Елисеев А.В. Системный подход в оценке динамических состояний технических объектов на основе методов структурного математического моделирования / А.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, А.С. Миронов // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2022. Т. 72. №1. С. 93-104.
16. Елисеев А.В. Формирование математических моделей вибрационных взаимодействий элементов технических средств транспортного и технологического назначения / А.В. Елисеев, А.С. Миронов, Елисеев С.В. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 1. С. 32-42.
17. Елисеев А.В. Системные подходы в обобщенной оценке динамических особенностей вибрационных взаимодействий элементов технических объектов транспортного и технологического назначения в условиях связанных силовых нагружений / А.В. Елисеев, Р.С. Большаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 1 (73). С. 39-52.
18. Елисеев А.В. Системные подходы в оценке динамических состояний механических колебательных систем: технология структурных преобразований / А.В. Елисеев, А.С. Миронов, С.В. Елисеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 1. С. 7-15.
19. Елисеев А.В. Системный подход к оценке динамических состояний технических объектов транспортного и технологического назначения: структурные схемы, передаточные функции, динамические инварианты / А.В. Елисеев, И.С. Ситов, Н.К. Кузнецов // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 7-19.
20. Лурье А.И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. – М.: Наука. 1959. – 368 с.

### References

1. Lontsikh P.A. Dynamic quality of machinery and equipment as a tool for ensuring the reliability of production and competitiveness of processes / P.A. Lontsikh, S.V. Eliseev. – Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2014. – 322 p.

2. Eliseev S.V. Methodology of system analysis in the tasks of assessment, formation and management of the dynamic state of technological and transport machines / S.V. Eliseev, A.V. Eliseev, R.S. Bolshakov, A.P. Khomenko – Novosibirsk: Science, 2021. – 679 p.
3. Eliseev S.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling In Problems Of Dynamics Of Technical Objects / S.V. Eliseev, A.V. Eliseev. – Cham, 2019. – 521 p.
4. Eliseev A.V. Dynamics of vibrational interactions of elements of technological systems taking into account unstoppable connections / A.V. Eliseev, V.V. Selvinsky, S.V. Eliseev. – Novosibirsk: Science, 2015. – 332 p.
5. Eliseev A.V. Dynamics of machines. System representations, structural schemes and connections of elements / A.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, A.O. Moskovskikh. – M.: Innovative mechanical engineering, 2019. – 381 p.
6. Khomenko A.P. Elastic elements in mechanical systems. Structural interpretations / A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, A.I. Artyunin, A.V. Eliseev, R.S. Bolshakov, E.V. Kaimov – Deposited manuscript No. 230 – In 2013 02.08.2013.
7. Eliseev A.V. Features of the interaction of a material particle with a vibrating surface depending on the additional force with an unstoppable bond / A.V. Eliseev // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. No. 3. P. 9-15.
8. Eliseev A.V. Features of the implementation of the multiple toss mode in a model problem with unstoppable coupling in the presence of viscous friction // Science in Central Russia. 2013. No. 2S. P. 42-47.
9. Eliseev S.V. Features of the occurrence of a gap in a mechanical system with an unstoppable coupling under pulsed action / S.V. Eliseev, A.V. Eliseev // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. No. 2 (38). P. 36-45.
10. Eliseev S.V. Motion of a material particle with tossing on the example of a model problem with unstoppable connections / S.V. Eliseev, I.S. Sitov, A.V. Eliseev // Mechanical engineering and life safety. 2012. No. 3 (13). P. 53-58.
11. Eliseev S.V. Characteristics of the interaction of a material particle and an oscillation surface depending on a constant force taking into account an unstoppable bond / S.V. Eliseev, I.S. Sitov, A.V. Eliseev // Technique and Technology: new prospects for development. 2012. P. 20-23.
12. Eliseev A.V. Technology for assessing the properties of dynamic interaction in the contacts of composite solids // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2014. No. 1-2. P. 179-183.
13. Eliseev S.V. Generalized approaches in the problems of determining contact reactions in solids under static loads taking into account unstoppable bonds / S.V. Eliseev, A.V. Eliseev // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. No. 4 (40). P. 51-60.
14. Eliseev A.V. The problem of vibration damping in mechanical systems: system analysis, modeling, control / A.V. Eliseev, A.P. Khomenko // Mechatronics, automation, control. 2022. Vol. 23. No. 5. P. 236-245.
15. Eliseev A.V. A systematic approach to assessing the dynamic states of technical objects based on structural mathematical modeling methods / A.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, A.S. Mironov // Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences. 2022. Vol. 72. No. 1. P. 93-104.
16. Eliseev A.V. Formation of mathematical models of vibration interactions of elements of technical means of transport and technological purpose / A.V. Eliseev, A.S.

- Mironov, Eliseev S.V. // Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies. 2022. No. 1. P. 32-42.
17. Eliseev A.V. System approaches in the generalized assessment of dynamic features of vibrational interactions of elements of technical objects of transport and technological purpose in conditions of connected force loads / A.V. Eliseev, R.S. Bolshakov // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2022. No. 1 (73). P. 39-52.
  18. Eliseev A.V. System approaches in the assessment of dynamic states of mechanical oscillatory systems: technology of structural transformations / A.V. Eliseev, A.S. Mironov, S.V. Eliseev // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science. 2022. No. 1. P. 7-15.
  19. Eliseev A.V. System approach to the assessment of dynamic states of technical objects of transport and technological purpose: structural schemes, transfer functions, dynamic invariants / A.V. Eliseev, I.S. Sitov, N.K. Kuznetsov // Systems. Methods. Technologies. 2022. No. 2 (54). P. 7-19.
  20. Lurie, A.I. Operational calculus and application in technical applications / A.I. Lurie. – М.: Science. 1959. – 368 p.

<b>Елисеев Андрей Владимирович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры математики ИрГУПС; доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении ИрННТУ	<b>Eliseev Andrey Vladimirovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of mathematics Department, associate professor of the Department of design and standardization in mechanical engineering
<b>Кузнецов Николай Константинович</b> – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении	<b>Kuznetsov Nikolai Konstantinovich</b> – doctor of technical sciences, professor of the Department of design and standardization in mechanical engineering
<b>Николаев Андрей Владимирович</b> – соискатель, НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования	<b>Nikolaev Andrey Vladimirovich</b> – candidate of scientific degree, Scientific and Educational Center of modern technologies, system analysis and modeling
eavsh@ya.ru	

*Received 29.06.2022*