

УДК 621.534, 62.752, 629.4.015

ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Елисеев С.В., Миронов А.С., Вьонг К.Ч.

Иркутский государственный университет путей сообщения, г.Иркутск

Ключевые слова: механические колебательные системы, структурные схемы, передаточные функции, вибрационные поля, дополнительные связи.

Аннотация. На основе обзора и сравнительного анализа состояния теоретических и прикладных исследований и разработок определены доминанты направлений в развитии методологических основ решения задач динамики технических объектов, работающих в условиях интенсивного динамического нагружения.

Цель доклада заключается в разработке ряда общих положений и принципов обобщенного подхода к построению математических моделей транспортных и технологических машин. Предлагается метод структурного математического моделирования, в рамках которого расчетной схеме технического объекта, представленной механической колебательной системой с несколькими степенями свободы, сопоставляется структурная схема эквивалентной, в динамическом отношении системы автоматического управления. Разработана технология построения структурных схем технических объектов, передаточных функций систем, отображающих особенности динамических свойств взаимодействия элементов при различных видах вибрационных нагрузок.

Получены аналитические соотношения, позволяющие детализировать представления об алгоритмах формирования коррекции и настройки вибрационных полей рабочих органов технологических машин. Обоснованы обобщенные представления о специфике динамических эффектов, которые проявляются при одновременном совместном действии нескольких вибрационных нагружений.

QUESTION OF DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL BASES FOR THE SOLUTION OF PROBLEMS OF DYNAMICS OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

Eliseev S.V., Mironov A.S., Vuong Q.C.

Irkutsk state university of railway engineering, Irkutsk

Keywords: mechanical vibration system, block diagrams, transfer functions, vibrational fields, additional relationships.

Abstract. On the basis of the review and comparative analysis of the state of theoretical and applied research and development identified the dominant directions in the development of methodological foundations of solving problems of the dynamics of technical objects operating under intense dynamic loading.

The purpose of the report is to develop a number of General provisions and principles of a generalized approach to the construction of mathematical models of transport and technological machines. The method of structural mathematical modeling is proposed, in which the design scheme of a technical object, represented by a mechanical oscillatory system with several degrees of

freedom, is compared to the structural scheme of the equivalent, in the dynamic relation of the automatic control system. The developed technology of creation of structural schemes of technical objects, the transfer functions of the system that displays the dynamical properties of the interaction of elements in various kinds of vibration loads.

The obtained analytical relation allowing for a detailed view about algorithms of formation and correction settings of the vibration fields of the working bodies of technological machines. The generalized ideas about the specificity of dynamic effects, which are manifested at the simultaneous joint action of several vibration loads, are substantiated.

Введение. Вибрации машин и узлов относятся к числу динамических состояний и эффектов, сопровождающих работу технологических транспортных машин различного значения. Большое значение уделяется оценке, контролю и нормированию уровня вибраций транспортных средств. Среди которых, доминирующее положение занимают такие объекты как автомобили [1–3], и подвижной состав железных дорог [4–6]. Вибрации транспортных средств создают дополнительные нагрузки для ответственных узлов транспортных объектов, что требует создания и поддержания активной соответствующих действий в системах диагностики и поддержания нормированных состояний многих узлов, агрегатов и объектов [7].

1. Технологические машин во многих отраслях промышленности также работают в условиях интенсивного динамического нагружения. Это относится к оборудованию горнодобывающих отраслей промышленности, строительной индустрии, химической промышленности и др. В последние годы большим интересом пользуются разработки вибрационных технологических процессов, в том числе и тех, в которых модификация поверхностей крупногабаритных и тяжелонагруженных деталей, формируется в условиях вибрационных взаимодействий с вибрирующей рабочей средой [8–12].

Создание технических объектов, предназначенных для работы при повышенных уровнях вибрационного фона и динамических нагрузок, является сложной комплексной проблемой, требующих предварительных научно-исследовательских и инженерно-технических разработок. Ряд основных требований и условий, выполнение которых способствует созданию эффективных и конкурентоспособных машин, нашло отражение в работах [13, 14]. Практика создания сложных технических объектов, работающих в условиях динамического нагружения, предполагает проведение на предварительных стадиях достаточно детализированных исследований, связанных с выявлением возможных особенностей работы технических объектов, разработки математических моделей, создающих основ оценки и прогнозирования динамических свойств и качества создаваемого технического продукта.

2. Многие технические объекты транспортного и технологического назначения на стадиях разработки, модернизации и реконструкции требуют существенной корректировки широкого спектра характеристик, параметров, свойств, что инициирует поиски и разработки специфических способов, средств, приемов и подходов локального значения, позволяющих добиваться существенной экономии средств, расходуемых на создание конкурентно-

способной материально-технической базы современного машиностроения. В последние годы технический и технологический базис современного производства развивается более динамично, что требует соответствующего отношения к повышению надежности работы оборудования и обеспечения безопасности его эксплуатации персоналом. Это предопределяет, по существу, непрерывный процесс усовершенствования, модернизации, изобретательства и рационализма в решении возникающих технических проблем и задач.

3. Создание современной техники опирается на развитие методологического базиса, формируемого методами инженерной механики, теории автоматического управления, системного анализа и математического моделирования, что особенно характерно для транспортного и технологического машиностроения.

Внимание к задачам оценки, контроля и управления, коррекции и настройки динамических состояний получило отражение в работах ведущих российских специалистов Артоболевского И.И., Фролова К.В., Ганиева Р.Ф., Лурье А.И., Блехмана И.И., Вейца В.Л., Вульфсона И.И., Коловского М.В. и др. Теоретические разработки стимулируют развитие изобретательского потенциала; это сопровождается ростом внимания к инновационным подходам и вопросам практической реализации новых научно-технических концепций.

4. Рост динамических нагрузок, повышение скоростей движения рабочих органов; увеличение мощностей приводов сопровождается проявлениями вибрационных процессов или вибраций. Это, в свою очередь, стимулирует развитие новых подходов в области теоретического осмысления сложных процессов динамических взаимодействий элементов технических объектов. Современные машины, в большинстве случаев, представляют собой, по существу, системы автоматического управления, что позволяет в реальных масштабах времени решать задачи оценки, контроля, изменения и управления динамическими состояниями различных машин. Такие средства реализуются в определенных конструктивно-технических с применениями широкого спектра специальных средств, реализуемых в виде амортизаторов, динамических гасителей и др. [11, 15–18].

В предлагаемом докладе на основе обзора и сравнительного анализа теоретических и прикладных работ в области динамики транспортных и технологических машин развивается методологический базис обобщенного подхода к различным задачам динамики технических объектов, работающих в условиях интенсивного динамического нагружения. Это связано, в частности, с технологией детализированной разработки построения математических моделей различных транспортных и технологических машин, рассматриваемых в форматах методов структурного математического моделирования.

I. Особенности построения математических моделей технических объектов. Во многих случаях оценка динамических свойств технологических машин, разработка способов и средств изменения и управления

динамическими состояниями проводится с использованием соответствующих расчетных схем в виде механических колебательных систем с несколькими степенями свободы. Для изменения динамических свойств систем вводятся дополнительные связи, реализуемые различными механизмами и устройствами для преобразования движения [19–22].

На рис. 1, а, б приведены примеры наиболее распространенных видов механических колебательных систем (цепного типа – рис. 1, а) и с использованием рабочего органа в виде твердого тела, совершающего плоское движение (рис. 1, б).

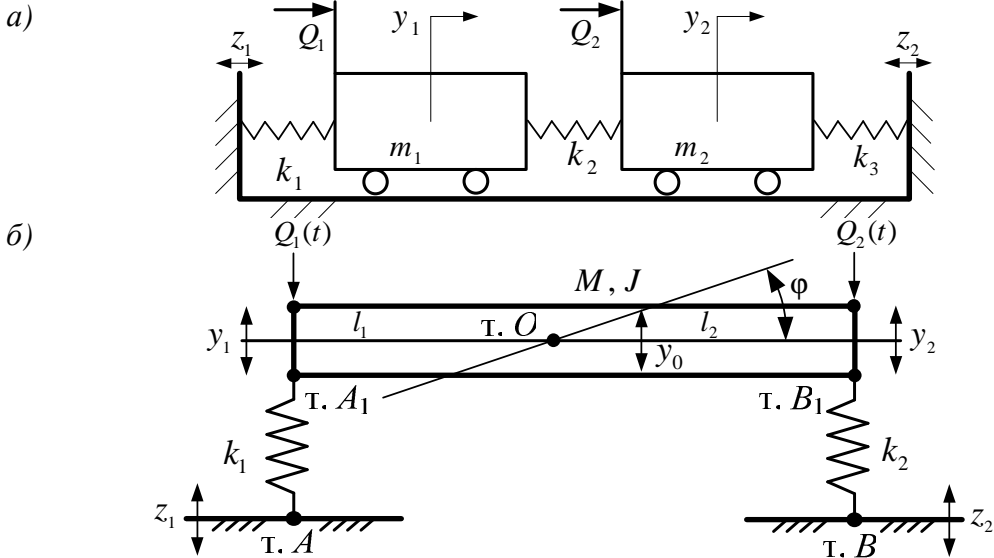


Рис. 1. Расчетные схемы технических объектов с двумя степенями свободы

Математическая модель на основе расчетных схем (рис. 1, а, б) может быть получена использованием формализма уравнений Лагранжа 2-го рода [18]. Полученные системы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка с постоянными коэффициентами после преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях трансформируются в соответствующие в системы уравнений в операторной форме:

$$\bar{y}_1(m_1 p^2 + k_1 + k_2) - k_2 \bar{y}_2 = k_1 \bar{z}_1 + \bar{Q}_1, \quad (1)$$

$$\bar{y}_2(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2 \bar{y}_1 = k_3 \bar{z}_2 + \bar{Q}_2, \quad (2)$$

что для случая по рис. 1, б, соответственно составит:

$$\bar{y}_1[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] + \bar{y}_2(Mab - Jc^2)p^2 = k_1 \bar{z}_1 + \bar{Q}_1, \quad (3)$$

$$\bar{y}_2[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] + \bar{y}_1(Mab - Jc^2)p^2 = k_2 \bar{z}_2 + \bar{Q}_2, \quad (4)$$

где $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$, $b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$, $c = \frac{1}{l_1 + l_2}$.

На рис. 1, а, б приняты обозначения M, J – масса и момент инерции твердого тела (рис. 1, б); m_1, m_2 – массы элементов (рис. 1, а); k_1, k_2, k_3 – коэффициенты жесткости упругих элементов; $\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{Q}_1, \bar{Q}_2$ – факторы

внешних возмущений; $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); значок $\langle - \rangle$ над переменной означает ее изображение по Лапласу.

2. Для оценки динамических свойств исходных систем, разработки способов и средств изменения динамических состояний технических объектов определенными преимуществами обладают методы структурного математического моделирования [18]. В рамках такого подхода механической колебательной системе (рис. 1, а, б) сопоставляется структурная схема эквивалентной, в динамическом отношении, системы автоматического управления (рис. 2, а, б). Построение структурных математических моделей проводится на основе уравнений (3), (4).

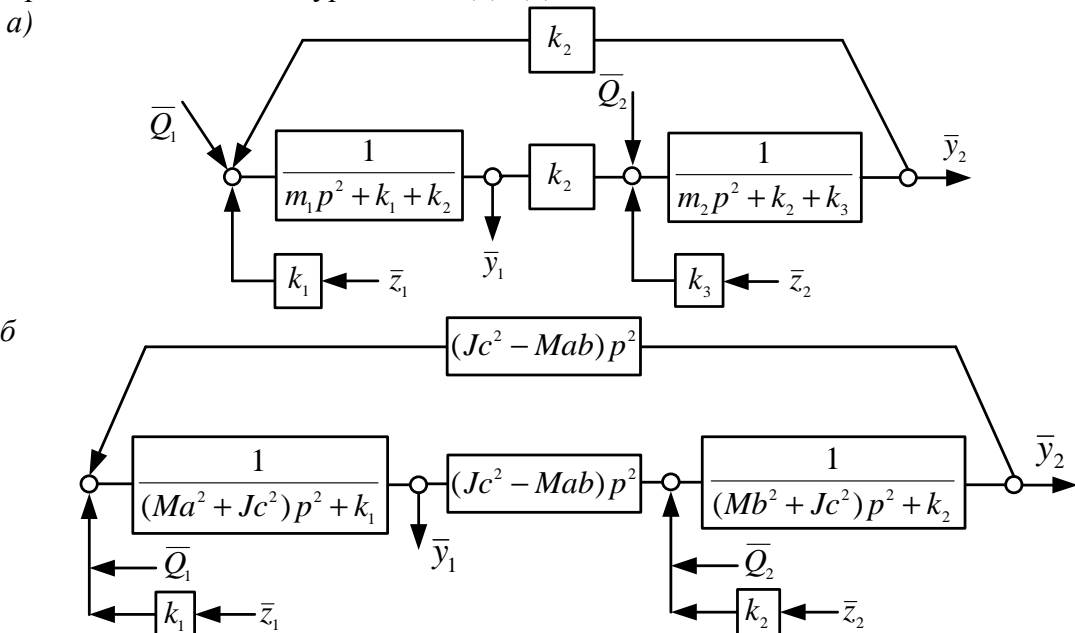


Рис. 2. Структурная математическая модель системы по рис. 1, а (а) и по рис. 1, б (б)

Из рис. 2, а следует, что система имеет по два парциальных блока, которые связаны между собой в цепной системе звеном, отражающим упругую связь k_2 ; для случая по рис. 2, б межпарциальная связь имеет инерционный тип $(Jc^2 - Mab)p^2$.

II. Определение динамических свойств системы. Приведенные на рис. 2, а, б структурные схемы могут быть преобразованы в соответствии с правилами аналитического аппарата теории автоматического управления [18] с выделением конкретного инерционного звена, рассматриваемого в качестве объекта, динамическое состояние которого оценивается. Предполагается, что механическая колебательная система обладает линейными свойствами; силы сопротивления, исчезающие малы, а сама система совершает малые колебания относительно положения статического равновесия; внешние возмущающие факторы являются гармоническими функциями.

При рассмотрении технологических вибрационных машин (вибростендов) внешние возмущающие факторы, по существу, рассматриваются как воздействия со стороны вибровозбудителей.

Построение математической модели вибростенда предполагает возможности оценки распределения по длине рабочего органа амплитуд колебаний точек в промежуточных позициях. Наиболее просто вибрационное поле может быть оценено на основе передаточных функций межпарциальных связей.

1. Для случая совместного действия силовых факторов \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 ($\bar{z}_1 = \bar{z}_2 = 0$) и учета связности возмущений, определяемых условием:

$$\bar{Q}_2 = \alpha \cdot \bar{Q}_1, \quad (5)$$

получим, что

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + \alpha(Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}, \quad (6)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] + (Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}, \quad (7)$$

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] + (Jc^2 - Mab)p^2}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + \alpha(Jc^2 - Mab)p^2}, \quad (8)$$

где частотное характеристическое уравнение системы:

$$A(p) = [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] \cdot [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] - [(Jc^2 - Mab)p^2]^2. \quad (9)$$

Выражение (8) представляет собой отношение амплитуд колебаний граничных точек (A_1), (B_1) рабочего органа (рис. 1, б). Зная отношение $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}$,

можно определить особенности распределения амплитуд колебаний по рабочему органу вибростенда и, таким образом, сформировать детализированное представление о структуре и параметрах вибрационного поля.

2. Если $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, то вибрационное поле на данной частоте имеет вид прямой, параллельной рабочему органу. В этом случае возвратно-колебательные угловые движения рабочего органа становятся равными нулю, и рабочий орган совершает только поступательные колебательные движения.

Если отношение амплитуд колебаний будет отрицательным, например, $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = -\frac{1}{2}$, то рабочий орган будет совершать только угловые колебания с равными амплитудами относительно центральной точки. То есть поступательные вертикальные колебательные движения не реализуются. В работах [23, 24] приводятся детализированные данные об особенностях настройки вибрационных полей.

3. Наличие на рабочем органе вибростенда точки, относительно которой возникают угловые колебания твердого тела, можно рассматривать, как реализацию режима динамического гашения колебаний. Очевидно, что существуют частоты, при которых режим динамического гашения колебаний реализуется для граничных точек (A_1), (B_1) рабочего органа; такие точки называют также узлами колебаний.

III. Введение дополнительных связей. Реализация технологических процессов вибрационной обработки деталей требует создания определенных условий взаимодействия обрабатываемой детали с рабочей сыпучей средой, что возможно лишь при соответствующей настройке вибрационных полей рабочих органов [10].

Примеры введения дополнительных связей, создающих условия для настройки и коррекции вибрационных полей приведены на рис. 3.

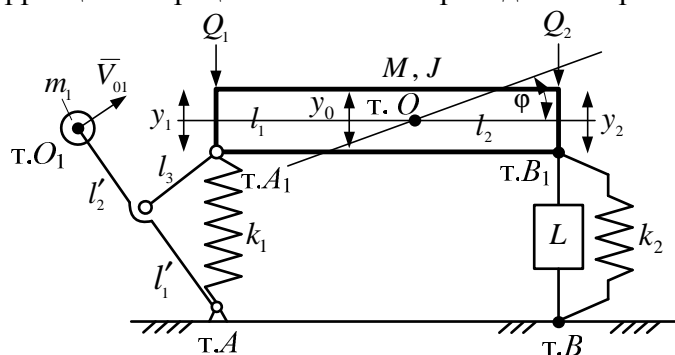


Рис. 3. Принципиальная схема вибрационной технологической машины с дополнительными связями

Дополнительные связи реализуются стержневым механизмом с дополнительной массой m_1 (точки крепления – тт. (A), (A_1)), а также – устройством для преобразования движения с приведенной массой L на основе несамотормозящегося винтового механизма. Структурная математическая модель системы с дополнительными связями приведена на рис. 4.

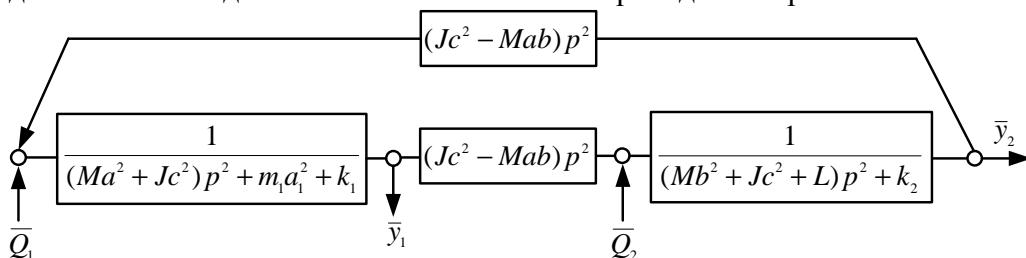


Рис. 4. Структурная математическая модель (структурная схема) вибрационной технологической машины с дополнительными связями

На рис. 4 принят ряд обозначений: L – приведенная масса устройства для преобразования движения, $L = \frac{J_0}{r_{cp}^2 \tan^2 \beta}$ (J_0 – момент инерции гайки-маховика, β – угол наклона винтовой линии, r_{cp} – средний радиус винтовой

линий); m_1 – масса пригрузки; a_1 – коэффициент, определяемый геометрией контура рычажного механизма. Полагая, что внешние воздействия \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 связаны соотношением:

$$\bar{Q}_2 = \alpha \cdot \bar{Q}_1. \quad (10)$$

Запишем выражения для передаточной функции межпарциальной связи

$$W'_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + m_1a_1^2 + k_1] + (Jc^2 - Mab)p^2}{(Mb^2 + Jc^2 + L)p^2 + k_2 + \alpha(Jc^2 - Mab)p^2}. \quad (11)$$

На основе выражения (11) могут быть построены алгоритмы формирования структуры и параметров вибрационного поля. Как было упомянуть выше, узел колебаний рабочего органа, если иметь в виду его положение на рабочем органе или на продолжениях линий рабочего органа, то частота, на которой определяется положение узла колебаний, совпадает с частотой динамического гашения колебаний.

В данном случае, когда в системе реализуется одновременное действие двух силовых факторов \bar{Q}_1 и $\alpha\bar{Q}_1$, частота динамического гашения колебаний определяется из уравнения в виде полинома, сформированного числителя или знаменателя передаточной функции межпарциальных связей. Детализированные представления об особенностях вибрационного поля рабочего органа в вибростенде с дополнительными связями можно найти в работе [11].

Заключение. Технологические вибрационные машины, реализующие технологические процессы, настроенные на взаимодействие рабочей сыпучей среды и поверхностей деталей, а также машины, предназначенные для вибрационного транспортирования материалов, классификации и сортировки смесей, обработки бетонных панелей и др. Для повышения их эффективности требуют достаточно точной настройки вибрационных органов. Такие подходы основаны на построении соответствующих математических моделей, обеспечивающих оценку, контроль и возможности соответствующих изменений динамических состояний рабочих органов.

Как показывают исследования, механические колебательные системы, как расчетные схемы вибростендов, обладают хорошей совместимостью с основными формами проявления динамических свойств, необходимых для контролирования и формирования динамических характеристик технологических процессов.

Предлагается технология и методический базис построения математических моделей для оценки и корректировки динамических состояний вибрационных технологических машин на основе методов структурного математического моделирования. В рамках такого подхода исходной механической колебательной системе, рассматриваемой в качестве расчетной схемы вибростенда, сопоставляется структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления.

Передаточные функции, получаемые при анализе структурных схем, позволяют реализовать алгоритмы оценки, коррекции и изменения вибрационных полей в необходимых направлениях настройки. Предложены подходы и приемы получения аналитических соотношений, определяющих условия эффективной работы вибрационных технологических машин.

Список литературы

1. Ротенберг Р.В. Колебания автомобиля. Колебания и плавность хода. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
2. Дербаремдикер А.Д. Амортизаторы транспортных машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 200с.
3. Хачатуров А.А. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др.: под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 536 с.
4. Ромен Ю.С. Математическое моделирование при исследовании взаимодействия экипажа и пути // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 11. – С. 62-64.
5. Ромен Ю.С. Динамики железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. – М.: ВМГ-Принт, 2014. – 210 с.
6. Коган А.Я. Аналитическая оценка уровня вибраций пути под проходящими поездами, сформированными из однотипных экипажей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 3. – С. 3-10.
7. Орленко А.И. Комплексная диагностика тягового двигателя электровоза / А.И. Орленко, М.Н. Петров, О.А. Терегулов; под ред. проф. М.Н. Петрова; КриЖТ ИрГУПС. – Красноярск: КриЖТ ИрГУПС, 2016. – 218 с.
8. Панов Г.Я. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий: учебное пособие. – М.: изд-во МГТУ Н.Э. Баумана, 2008. – 192с.
9. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. – Воронеж: Научная книга, 2011. – 568 с.
10. Елисеев А.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неустойчивых связей / А.В. Елисеев, В.В. Сельвинский, С.В. Елисеев. – Новосибирск: Наука, 2015. – 332 с.
11. Неустойчивые связи в динамических взаимодействиях сыпучей среды и вибрирующей поверхности: научно-методологическое обоснование технологии процессов вибрационного упрочнения / С.В. Елисеев, В.Б. Кашуба, А.Г. Пнев и др. // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 17-31.
12. Методика расчета параметров вибрационного технологического комплекса / Е.В. Каимов, А.Г. Пнев, С.В. Елисеев и др. – Иркутск, 2015. – 30 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 05.10.2015, №159.
13. Махутов, Н.А. Построение научных основ, методов и систем мониторинга рисков природно-техногенных опасностей для объектов железнодорожного транспорта / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – №1. – С. 9-26.
14. Фортов В.Е. О роли академических и отраслевых научных школ в реализации инновационных и стратегических задач Российских железных дорог / В.Е. Фортов, В.И. Колесников // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – №3. – С. 1-7.
15. Галиев И.И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей / И.И. Галиев, В.А. Нехаев, В.А. Николаев. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 340 с.
16. Говердовский В.Н. Проблемы и перспективы создания виброзащиты для высокоскоростного железнодорожного транспорта / В.Н. Говердовский, А.Н. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 4 (24). – С. 86-92.

17. Говердовский В.Н. Развитие теории и методов проектирования машин с системами инфранизкочастотной виброзащиты: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.02 / Говердовский Владимир Николаевич. – Новосибирск, 2006. – 42 с.
18. Елисеев С.В. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем / С.В. Елисеев, А.И. Артюнин. – Новосибирск: Наука, 2016. – 459 с.
19. Елисеев С.В. Динамика механических колебательных систем с дополнительными связями / С.В. Елисеев, Л.Н. Волков, В.П. Кухаренко. – Новосибирск: Наука, 1988. – 206 с.
20. Хоменко А.П. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем / А.П. Хоменко, С.В.Елисеев, Ю.В. Ермошенко. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 288 с.
21. Механизмы в упругих колебательных системах: особенности учета динамических свойств, задачи вибрационной защиты машин, приборов и оборудования / А.П. Хоменко, С.В. Елисеев, А.И. Артюнин и др. – Иркутск, 2013. – 187 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 15.08.2013, № 243.
22. Структурные математические модели в задачах динамики механических колебательных систем / А.П. Хоменко, С.В. Елисеев, А.И. Артюнин и др. – Иркутск, 2015. – 213 с. – Деп. В ВИНТИ РАН 30.03.2015, № 62.
23. Вьюнг К.Ч. Новые возможности изменения динамических состояний вибрационных технологических машин // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 25-31.
24. Елисеев С.В. Рычажные связи в задачах коррекции динамического состояния вибростенда / С.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, К.Ч. Вьюнг // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 9 (140). – С. 28-41.

References

1. Rotenberg R.V. Vibrations of the car. Fluctuations and smoothness of the course. - M.: Mechanical engineering, 1972. - 392 p.
2. Derbaremdiker A.D. Absorbers of transport machines. - M: Mechanical engineering, 1985. – 200p.
3. Khachaturov A.A. Dynamics of the system road – tyre – vehicle – driver / A.A. Khachaturov, V.L. Afanasiev, V.S. Vasiliev, etc.: edited by A.A. Khachaturov. - M.: Mechanical Engineering, 1976. - 536 p.
4. Romen Yu.S. Mathematical modeling in the study of the interaction of the crew and the way // Railway transport. - 2017. - № 11. - P. 62-64.
5. Romen Yu.S. Dynamics of the train crew rail track. Methods of calculation and testing. - Moscow: VMG-Print, 2014. - 210 p.
6. Kogan A.Ya. Analytical assessment of the vibration level of the track under passing trains formed from the same type of crews // Bulletin of research Institute of railway transport. - 2013. - № 3. - P. 3-10.
7. Orlenko A.I. Complex diagnostics of traction motor of electric locomotive / A.I. Orlenko, M.N. Petrov, O.A. Teregulov; ed. by prof. M.N. Petrov. - Krasnoyarsk: KIRT ISTU, 2016. - 218 p.
8. Panovko YA.G. Introduction to the theory of mechanical oscillations. M.: Nauka; gl. red. fiz.-mat. lit., 1991. 256 p.
9. Kopylov Yu.R. Dynamics of vibro-impact strengthening. - Voronezh: Scientific book, 2011. - 568p.
10. Eliseev A.V., Sel'vinskij V.V., Eliseev S.V. Dynamics of vibrational interactions of elements of technological systems with allowance for non-retentive links. Novosibirsk: Nauka, 2015. 332 p.
11. Not-holding connections in the dynamic interactions of the granular medium and the vibrating surface: the scientific-methodological substantiation of the technology of vibrational processes of hardening / S.V. Eliseev, V.B. Kashuba, A.G. Pnev, etc. // System. Methods. Technologies. - 2014. - № 3 (23). - P. 17-31.
12. Methods of calculation of parameters of the vibration technological complex / E.V. Kaimov, A.G. Pnev, S.V. Eliseev, etc. – Irkutsk, 2015. - 30 p. - DEP. in VINITI RAS 05.10.2015, № 159.

13. Mahutov N.A. Construction of scientific bases, methods and systems for monitoring the risks of natural and man-made hazards for railway transport facilities / N.A. Makhutov, M.M. Gadenin // Bulletin of the joint scientific Council of "Russian Railways". - 2015. - №1. - P. 9-26.
14. Fortov V.E. On the role of academic and branch scientific schools in the implementation of innovative and strategic tasks of Russian Railways / V.E. Fortov, V.I. Kolesnikov // Bulletin of the joint academic Council of "Russian Railways". - 2015. - №3. - P. 1-7.
15. Galiev I.I. methods and means of the railway crews / I.I. Galiev, V.A. Nekhaev, V.A. Nikolaev. – M.: Study-methodical centre on education on railway transport, 2010. - 340 p.
16. Goverdovsky V.N. Problems and prospects of creating vibration protection for high-speed rail transport / V.N. Goverdovsky, A.N. Trofimov // Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2009. - № 4 (24). – P. 86-92.
17. Goverdovsky V.N. Development of the theory and methods of designing machines with infra-low-frequency vibration protection systems: autoref. diss. ... doc. tech. sciences: 05.02.02 / Goverdovsky Vladimir Nikolaevich. - Novosibirsk, 2006. – 42 p.
18. Eliseev S.V. Applied theory of oscillations in problems of dynamics of linear mechanical systems / S.V. Eliseev, A.I. Altunin. - Novosibirsk: Science, 2016. - 459 p.
19. Eliseev S.V. Dynamics of mechanical oscillatory systems with additional connections / S.V. Eliseev, L.N. Volkov, V.P. Kukhareno. - Novosibirsk: Science, 1988. - 206 p.
20. Khomenko A.P. System analysis and mathematical modeling in mechatronics vibration isolation systems / A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko. – Irkutsk: Irkutsk state transport university, 2012. - 288 p.
21. Mechanisms in elastic vibration systems: features of accounting of dynamic properties, the problem of vibration protection of machines, instruments and equipment / A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, A.I. Altunin, etc. – Irkutsk, 2013. - 187 p. - DEP. in VINITI RAS 15.08.2013, № 243.
22. Structural mathematical models in problems of dynamics of mechanical oscillatory systems / A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, A.I. Artyunin, etc., Irkutsk, 2015. - 213 p. - DEP. IN VINITI RAS 30.03.2015, № 62.
23. Vuong Q.C. New opportunities to change the dynamical States of vibrational technological machines // System. Methods. Technologies. - 2018. - № 2 (38). - P. 25-31.
24. Eliseev S.V. lever ties in tasks of correcting the dynamic state of the shaker / S.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, Q.C. Vuong // Vestnik of Irkutsk state technical university. - 2018. - № 9 (140). - P.28-41.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Елисеев Сергей Викторович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник – директор	Sergey V. Eliseev – doctor of technical Sciences, Professor, chief research officer-Director
Миронов Артем Сергеевич – соискатель	Artem S. Mironov – postgraduate
Вьонг Куанг Чык – аспирант	Vuong Quang Chyk – graduate student
Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения, г.Иркутск	Scientific and educational center of modern technologies, system analysis and modeling of Irkutsk state transport university, Irkutsk

Получена 26.10.2018