

УДК 534.014,621.802

ВИБРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Елисеев А.В.¹, Копылов Ю.Р.², Николаев А.В.¹, Елисеев С.В.¹

¹*Иркутский государственный университет путей сообщения, г.Иркутск;*

²*Воронежский государственный технический университет, г.Воронеж*

Ключевые слова: вибрационные технологические процессы, неударяющие связи, функция зазора, вибрационное поле, вибрационное взаимодействие, вибрационные режимы, устройство преобразования движения.

Аннотация. Рассматривается задача оценки динамических свойств вибрационного поля технологических машин для упрочнения поверхностей длинномерных деталей с помощью рабочей среды из стальных шариков. Разработана математическая модель вибростенда с регулирующим устройством преобразования движения.

VIBRATIONAL TECHNOLOGICAL PROCESSES: MATHEMATICAL MODELS OF DYNAMICAL PROPERTIES OF TECHNICAL OBJECTS

Eliseev A.V.¹, Kopylov Yu.R.², Nikolaev A.V.¹, Eliseev S.V.¹

¹*Irkutsk state transport university, Irkutsk;*

²*Voronezh state technical university, Voronezh*

Keyword: vibrational technological processes, unilateral constraints of communication, function of the gap, vibrating box, vibrating interaction, vibration modes, conversion device movement.

Abstract. The problem of evaluation of the dynamic properties of the vibration field of technological machines for strengthening the surfaces of long parts using a working medium made of steel balls is considered. The mathematical model of the vibration stand with the regulating device of transformation of movement is developed.

Введение. Современные технологические процессы достаточно широко распространены в технике. Это связано с проблемами вибрационного упрочнения деталей, процессами вибрационного транспортирования материалов на предприятиях строительной индустрии, горнодобывающей промышленности [1].

Особенности вибрационных технологических процессов заключаются в том, что взаимодействия между рабочей средой и поверхностью рабочих органов вибрационных машин характеризуются неударяющим характером связей, что создает определенную специфику в динамических взаимодействиях. Специфика заключается в том, что между рабочей средой и вибрирующей поверхностью возникают отрывы, рабочая среда приобретает возможности локальных автономных движений и динамических соударений, что используется, в целом, для достижения технологических целей.

Достаточно подробное изложение особенностей динамических взаимодействий рабочих сред с вибрирующими поверхностями рассмотрено в работах [2-4].

Взаимодействие рабочей среды с вибрирующими поверхностями используется для реализации широкого класса технологических процессов, в которых решаются задачи вибрационного упрочнения, модификации поверхностных свойств деталей из различных материалов.

Необходимость детализированных представлений о взаимодействиях рабочей среды с обрабатываемой поверхностью инициирует разработку способов и средств оценки характеристик вибрационных полей вибростендов. Ряд новых идей в оценке динамических особенностей вибрационных полей представлен в публикациях [5-7].

Проводимые в последние годы, исследования, посвященные вопросам использования в структурах колебательных систем дополнительных связей, позволили выявить ряд новых динамических эффектов, расширить методологическую базу, изучить вопросы динамических взаимодействий механических колебательных систем с несколькими степенями свободы. Ряд конкретных результатов в этом направлении представлен в работах [8-11]. Обнаруженные особенности использования дополнительных связей служат обоснованием того, что эффективность использования вибрационных технологических процессов во многом зависит от возможностей формировать и управлять структурами параметров вибрационных полей, создаваемых рабочими органами технологических машин.

При всём разнообразии научных подходов и детализации представлений об особенностях оценки контроля и управления динамическим состоянием вибростендов нельзя не отметить необходимость активизации внимания к вопросам динамики систем с неустойчивыми связями [4,12-15].

В представленном докладе рассматриваются возможности развития методологической основы решения прикладных задач, связанных с вибрационными технологическими процессами характерными для многих отраслей современной промышленности. Основные результаты в расширении методологических позиций получены на основе введения понятий об обобщенной функции зазора, что позволило разработать технологию построения математических моделей в задачах динамики систем с неустойчивыми связями и предложить методологические подходы к разработке по определению и оценке критических условий, определяющих особенности режимов вибрационных полей технологических машин.

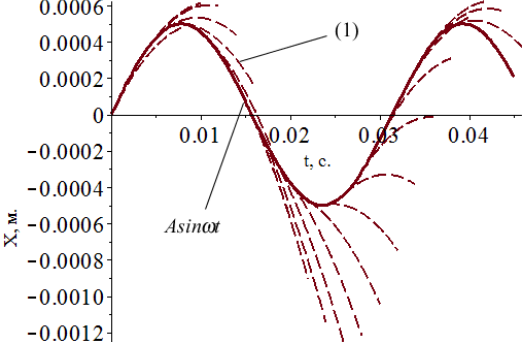
I. Общие положения. Постановка задач исследования. В целом, проблема реализаций вибрационных технологических процессов носит комплексный характер, поскольку технологические машины достаточно сложны и, в свою очередь, также содержат узлы и агрегаты, в которых между элементами существуют неустойчивые связи. Подходы к разрешению такой проблемы требуют не только учета условий поддержания устойчивых вибрационных процессов с подбрасыванием, но и одновременного учета формирования режимов динамических взаимодействий, которые проявляются

в реакциях связей и в контактных взаимодействиях составных структур механизмов и машин. Составные объекты имеют несколько частей, соединенных силами тяжести или дополнительными силами, а также упругими связями, в которых могут проявляться процессы нарушения контактов или значительные колебания величин контактных усилий.

Задачи исследования ориентированы на формирование теоретических представлений о динамических взаимодействиях твердого тела с вибрирующей поверхностью на основе разработки математических моделей при введении дополнительных внешних сил и упругих связей при учете неударяющего контакта. В плане практических приложений ставится задача разработки способ регулирования вибрационного поля технологической машины и средств измерения динамических особенностей вибрационного поля.

I. Метод функции зазора в задачах оценки динамических взаимодействий контактирующих твердых тел с учетом неударяющих связей. Подход к моделированию движения с учетом неударяющих связей на основе функции зазора включает параметризованную систему дифференциальных уравнений, функцию зазора и дифференциальные условия нарушения контакта. [4]. В табл.1 представлены основные элементы подхода на примере взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью на основе учета всевозможных форм движения частицы (рис. 1).

Табл. 1. Элементы метода функции зазора

I. Базовая модель	II. Параметрическая модель	III. Семейство возможных форм движения
$\begin{cases} \ddot{X}(t) = -g, t \geq t_0 \\ \dot{X}(t_0) = \dot{H}(t_0) \\ X(t_0) = H(t_0) \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{\partial^2 X_H(t, t_0)}{\partial t^2} = -g, t \geq t_0 \\ \left. \frac{\partial X_H(t, t_0)}{\partial t} \right _{t=t_0} = \omega A \cos(\omega t_0) \\ X_H(t, t_0) _{t=t_0} = A \sin(\omega t_0) \end{cases}$	
IV. Функция зазора:	V. Дифференциальные условия отрыва k -го порядка:	<p>Рис. 1. Семейство форм движения с отрывом: 1 – траектория отрыва, $A = 0,0005$ м, $\omega = 200$ рад/с</p>
$\begin{aligned} R_H(t, t_0) = \\ = X_H(t, t_0) - H(t) \end{aligned}$	$\begin{cases} \left. \frac{\partial^i R_H(t, t_0)}{\partial t^i} \right _{t=t_0} = 0, i < k \\ \left. \frac{\partial^k R_H(t, t_0)}{\partial t^k} \right _{t=t_0} > 0 \end{cases}$	

II. Особенности динамических свойств технических объектов. При оценке особенностей динамических свойств технического объекта его вибрационное поле рассматривается в качестве интегральной характеристики процесса динамических взаимодействий. В рамках подхода к управлению вибрационным полем посредством введения дополнительных связей с помощью устройства преобразования движения рассматривается

математическая модель, учитывающая режимы кратного подбрасывания рабочей среды и возможность приведения вибрационного поля твердого тела с режиму, обладающему признаками однородности и одномерности. На рис.2 представлена расчетная схема рабочего органа, представленного твердым телом, находящегося во взаимодействии с рабочей средой, представленной материальными точками.

На рис. 2 рабочий орган вибрационный машин представлен твердым телом (2, рис. 1) массы M с моментом инерции относительно центра тяжести J , с упругими элементами k_1, k_2 , закрепленными в точках A_1 и A_2 на расстоянии l_1 и l_2 от центра тяжести O . Считается, что центр тяжести и центр качания совпадают у данного твердого тела 1. Источником возбуждения колебаний служит гармоническая сила $Q_{l_0} = A_f \sin(\omega_f t)$, приложенная в точке A_{l_0} на расстоянии l_0 от точки O .

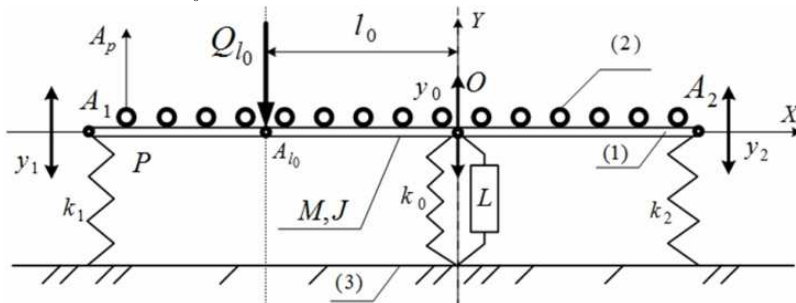


Рис. 2. Расчетная схема вибрационной технологической машины

Способом обеспечения режимов с кратным подбрасыванием служит установка амплитудных и частотных характеристик внешнего воздействия в определенное соотношение. Однородность и одномерность вибрационного поля достигается посредством реализации режима динамического гашения по угловой координате. Существенным фактором в настройке вибрационного поля служит учет массоинерционной характеристики устройства преобразования движения и определение точки приложения внешнего возмущающего фактора. Детальное изложение соответствующих математических моделей представлено в работах[4,16-18].

Заключение. Следует отметить ряд выводов.

1. Одним из актуальных направлений в разработке инновационных подходов, связанных с разработкой новых технологических процессов, является использование возможностей динамических взаимодействий вибрирующих рабочих органов машин и рабочих сыпучих смесей, обеспечивающих новые формы модификации свойств поверхностей обрабатываемых деталей, транспортирование материалов, их сортировку, классификацию и др.

2. Разработан математический аппарат технологии оценки особенностей динамических взаимодействий, определения устойчивых динамических состояний и условий реализации вибрационных движений материалов в вибрационных формах динамического взаимодействия, сопровождаемых

фазами отрыва, соударений и других видов взаимодействий. Разработаны методологические основы построения и расчета специфических форм измерения, контроля и формирования необходимых динамических состояний в динамических взаимодействиях рабочих органов и сыпучих сред.

3. Разработана технология построения математических моделей вибрационных технологических машин, отражающие специфику формирования вибрационных полей, возможностей их формирования и коррекции.

Список литературы

1. Вибрации в технике: справочник в 6-ти томах / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение. 1981. Т.4. Вибрационные процессы и машины. 1981. – 504 с.
2. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. – М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных технологий, 2006. – 176 с.
3. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 568 с.
4. Елисеев А.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неударяющих связей / А.В. Елисеев, В.В. Сельвинский, С.В. Елисеев // Новосибирск: Наука, 2015. – 332 с.
5. Елисеев А.В. Математическое моделирование в задачах обеспечения эффективности режимов виброупрочнения / Елисеев А.В., Трофимов А.Н., Пнёв А.Г. // Научно-технические и виброволновые технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий [электронный ресурс]: материалы междунар. Науч. симпозиума технологов машиностроителей (Ростов-н -Дону, 26-28 сент. 2018) / отв. ред. М.А. Томаркин; Донской гос. техн. ун-т. Электрон. тестовые дан. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – 299 с.
6. Eliseev A.V. Possibilities of dynamic correction of structure of vibration fields of working elements of technological machines / A.V. Eliseev, Yu.R. Kopylov, S.V. Eliseev // International Conference on Recent Advances in Engineering, Technology and Applied Sciences, November 23th, 2017, USA, Detroit: Scientific public organization "Professional science", 2017. 336p. (p. 65-71).
7. Alexey Orlenko, Andrey Eliseev, Sergey Eliseev Localization of vibration effects: the possibilities of dynamic damping of vibrations / A. Orlenko, A. Eliseev, S. Eliseev // Vibroengineering PROCEDIA. 27-th International Conference on VIBROENGINEERING: «Vibration in Transportation Engineering – Problems and Applications». Katowice, Poland. 26-28 September, 2017. Volume 13, p. 132-135.
8. Елисеев С.В. Методологические подходы в системном анализе и математическом моделировании механических колебательных систем / С.В. Елисеев, А.И. Артюнин и др. – Ирк. гос. ун-т путей сообщ. – Иркутск, 2013. – 96 с. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 07.02.13 № 37 – В 2013.
9. Елисеев С.В. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования / С.В. Елисеев, А.П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2014. – 357 с.
10. Елисеев С.В. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем / С.В. Елисеев, А.И. Артюнин. – Новосибирск: Наука, 2016. – 459 с.
11. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи): монография; отв. ред. А.И. Артюнин. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – 692с.
12. Патент №2624757 РФ. Способ управления структурой вибрационного поля вибрационной технологической машины на основе использования эффектов динамического гашения и устройство для его осуществления / Елисеев С.В., Елисеев А.В., Каимов Е.В., Нгуен Д.Х., Вьонг К.Ч. – Оpubл. 25.01.2016.
13. Елисеев С.В. Подходы к оценке особенностей вибрационных полей при взаимодействии рабочей среды с рабочим органом технологических машин / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев,

- А.С. Миронов // OPEN INNOVATION: сборник статей IV Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС "Наука и Просвещение", 2018. – 318с.
14. Елисеев А.В. Метод определения условий нарушения контакта при вибрационных нагружениях с учетом неударживающих связей / А.В. Елисеев, А.И. Артюнин, И.С. Ситов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2017. – №1(53). – С.26-34.
 15. Елисеев А.В. Математическое моделирование как основа построения рациональных вибрационных технологических процессов / А.В. Елисеев, А.И. Артюнин, Д.Х. Нгуен, К.Ч. Вьонг // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 4. Технические и естественные науки. Рост. гос. ун.-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2016. С.247-250.
 16. Елисеев А.В. Неударживающие связи в динамических взаимодействиях сыпучей среды и вибрирующей поверхности: научно-методологическое обоснование технологии вибрационного упрочнения / А.В. Елисеев, А.Г. Пнев, В.Б. Кашуба, И.С. Ситов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – №3(23). – С. 17-31.
 17. Елисеев А.В. Некоторые подходы к обоснованию схемы инерционного возбуждения в технологических вибрационных машинах / А.В. Елисеев, Л.А. Мамаев, И.С. Ситов // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – №4(28). – С.16-24.
 18. Ситов И.С. Теоретические основы процессов взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью с неударживающими связями / И.С. Ситов, А.В. Елисеев // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – №4(16). – С. 17-28.

References

1. Vibration in engineering: Handbook in 6 volumes / Ed. the Council: V.N. Chelomey (pred.). – M.: Mechanical Engineering. 1981. Vol. 4. Vibration processes and machines. 1981. – 504 p.
2. Panovko G.Ya. Dynamics of vibration technological processes. – M.-Izhevsk: SRC "Regulatory and chaotic dynamics", Institute of computer technologies, 2006. – 176 p.
3. Kopylov Yu.R. Dynamics of vibroimpact hardening. – Voronezh: Scientific book, 2011. – 568 p.
4. 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.
5. Eliseev A.V. Mathematical modeling in problems of effective modes vibropresarea / A.V. Eliseev, A.N. Trofimov, A.G. Pnev // High-tech and webrevolve processing technology details of high-tech products [electronic resource]: proceedings of the international. Scientific. Symposium of technologists of machine builders (Rostov-on-Don, September 26-28. 2018) / resp. edited by M.A. Tamarkin; Donskoy state technical. un-ty. Electron. test data. Rostov-on-Don: DSTU, 2018. – 299 p.
6. Eliseev A.V. Possibilities of dynamic correction of structure of vibration fields of working elements of technological machines / A.V. Eliseev, Yu.R. Kopylov, S.V. Eliseev // International Conference on Recent Advances in Engineering, Technology and Applied Sciences, November 23th, 2017, USA, Detroit: Scientific public organization "Professional science", 2017. 336p. (p. 65-71).
7. Alexey Orlenko, Andrey Eliseev, Sergey Eliseev Localization of vibration effects: the possibilities of dynamic damping of vibrations / A. Orlenko, A. Eliseev, S. Eliseev // Vibroengineering PROCEDIA. 27-th International Conference on Vibroengineering: «Vibration in Transportation Engineering – Problems and Applications». Katowice, Poland. 26-28 September, 2017. Volume 13, p. 132-135.
8. Eliseev S.V. Methodological approaches in system analysis and mathematical modeling of mechanical oscillatory systems / S.V. Eliseev, A.I. Artyunin et al. – Irkutsk state transport university. – Irkutsk, 2013. – 96 p. – Rus. – Dep. in VINITI 07.02.13 № 37-in 2013.
9. Eliseev S.V. Dynamic oscillation: the concept of feedback and structural methods of mathematical modeling / S.V. Eliseev, A.P. Khomenko. – Novosibirsk: Science, 2014. – 357 p.
10. Eliseev S.V. Applied theory of oscillations in problems of dynamics of linear mechanical systems / S.V. Eliseev, A.I. Artyunin. – Novosibirsk: Science, 2016. – 459 p.
11. Eliseev S.V. Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of movements, vibration interactions, lever connections): monograph; resp. edited by A.I. Artyunin. – Irkutsk: Irkutsk state transport university, 2018. – 692p.

12. Patent No. 2624757 of the Russian Federation. A method of controlling the structure of the vibration field of the vibration machine technology based on the use of dynamic damping effects and the device for its implementation / Eliseev S.V., Eliseev A.V., Kaimov E.V., Nguyen D.H., Vyong Q.C. – Publ. 25.01.2016.
13. Eliseev S.V. Approaches to evaluation of vibration fields in the interaction of working medium with the working body of technological machines / S.V. Eliseev, A.V. Eliseev, A.S. Mironov // Open innovation: collection of articles IV International scientific-practical conference. – Penza: Science and Education, 2018. – 318p.
14. Eliseev, A.V. Method of determination conditions of non-breaking of contact under vibration loadings taking into account unilateral constraints relations / A.V. Eliseev, A.I. Artyunin, I.S. Sitov. // Modern technologies. System analysis. Modeling. – Irkutsk: ISTU, 2017. – №1 (53). – P. 26-34.
15. Eliseev A.V. Mathematical modeling as a basis for building a rational vibration technology processes / A.V. Eliseev, A.I. Artyunin, D.H. Nguyen, Q.C. Vyong // Collection of scientific papers "Transport: science, education, production". Volume 4. Technical and natural Sciences. Growth. Rostov state transport university. Rostov-na-Donu, 2016. – P. 247-250.
16. Eliseev A.V. Not-holding connections in the dynamic interactions of the granular medium and the vibrating surface: the scientific-methodological substantiation of the technology of vibration reinforcement / A.V. Eliseev, A.G. Pnev, V.B. Kashuba, I.S. Sitov // System. Methods. Technologies. – 2014. – №3 (23). – P. 17-31.
17. Eliseev A. V. Some approaches to the substantiation of schemes of inertial excitation of technological vibration machines / A.V. Eliseev, L.A. Mamaev, I.S. Sitov // System. Methods. Technologies. – 2015. – №4 (28). – P. 16-24.
18. Sitov I.S. Theoretical basis of the interaction of the material particle with a vibrating surface with unilateral constraints such / I.S. Sitov, A.V. Eliseev // System. Methods. Technologies. – 2012. – №4 (16). – P. 17-28.

Сведения об авторах:

Information about authors:

<p>Елисеев Андрей Владимирович – к.т.н., старший научный сотрудник, Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения, г.Иркутск</p>	<p>Andrey V. Eliseev – candidate of technical science, senior researcher, Scientific and educational center of modern technologies, system analysis and modeling of Irkutsk state transport university, Irkutsk</p>
<p>Копылов Юрий Романович – д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г.Воронеж</p>	<p>Yuriy R. Kopylov – doctor of technical sciences, professor of department of mechanical engineering, Voronezh state technical university, Voronezh</p>
<p>Николаев Андрей Владимирович – соискатель, Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения, г.Иркутск</p>	<p>Andrey V. Nikolaev – applicant, Scientific and educational center of modern technologies, system analysis and modeling of Irkutsk state transport university, Irkutsk</p>
<p>Елисеев Сергей Викторович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник – директор, Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения, г.Иркутск</p>	<p>Sergey V. Eliseev – doctor of technical Sciences, Professor, chief research officer-Director, Scientific and educational center of modern technologies, system analysis and modeling of Irkutsk state transport university, Irkutsk</p>

Получена 01.11.2018