

УДК 534.014, 621.802

О МОДЕЛИРОВАНИИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И МАШИНАХ С УЧЕТОМ НЕУДЕРЖИВАЮЩИХ СВЯЗЕЙ

¹Елисеев А.В., ²Копылов Ю.Р.¹ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщений», Иркутск,
e-mail: eavsh@ya.ru;²ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж,
e-mail: urkopulov@mail.ru

Предлагается подход к построению математических моделей вибрационного взаимодействия элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей. Рассмотрены математические модели для режимов кратного подбрасывания рабочей среды с учетом дополнительных постоянных сил и сил вязкого трения. Представлены элементы методологического базиса исследования режимов на основе функции зазора. Предложен метод определения условий безззорного колебания составных твердых тел. Рассмотрена математическая модель, отражающая особенности процесса колебания нескольких твердых тел без нарушения контакта. Разработаны технические средства контроля вибрационного поля технологических процессов и машин.

Ключевые слова: неудерживающие связи, вибрационное упрочнение, вибрация сыпучей среды, непрерывное подбрасывание, безззорное колебание

ABOUT MATHEMATIC MODELING OF CONTACT INTERACTION IN THE VIBRATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MACHINERY TAKING INTO ACCOUNT UNILATERAL CONSTRAINTS

¹Eliseev A.V., ²Kopylov Y.R.¹FGBOU VPO «Irkutsk State Transport University», Irkutsk, e-mail: eavsh@ya.ru;²FGBOU VPO «Voronezh State Technical University», Voronezh, e-mail: urkopulov@mail.ru

An approach to the construction of mathematical models of vibrating elements interaction of technological systems with unilateral constraints is offered. Mathematical models for multiple modes tossing working environment, taking into account additional permanent forces and viscous friction, are considered. Elements of the methodological basis of research modes based on the function of the gap are presented. A method for determining the conditions of gapless vibration of composite solids is proposed. A mathematical model of the fluctuation of several solids without breaking the contact is reviewed. Technical device for vibration field controlling of technological processes and machines is developed.

Keywords: unilateral constraints, vibration hardening, vibration granular medium, continuous tossing

Вибрационные технологические процессы получили широкое распространение в производственных системах, относящихся к различным отраслям техники. Вибрация активно используется в процессах вибрационного переноса и технологиях обработки материалов, таких как вибрационное резание, виброгалтовка, вибрационное упрочнение, вибросепарация и др.

Во многих случаях вибрационное взаимодействие рассматривается как факт воздействия на состояние взаимодействующих сторон контакта соприкасающихся тел и возникающих при этом связей. В меньшей степени изучены особенности неудерживающих связей, которые характерны для технологических процессов виброупрочнения и вибрационного транспортирования.

Постановка задачи. Общие положения. Особенности реализации режимов вибрирующей поверхности с элементами рабочей среды. Рассматриваются подходы

к построению математических моделей, отражающих особенности динамических взаимодействий, характерных для технологических процессов вибрационного упрочнения. Технологические эффекты достигаются в периодических виброударных контактах рабочей среды из мелких стальных шариков и вибрирующей рабочей поверхности обрабатываемой детали. Предложены некоторые фрагменты общей концепции математического моделирования технологического процесса вибрационного взаимодействия материальной частицей с вибрирующей поверхностью, на основе использования представлений о соударении без упругого отскока. Рассматривается вариант, когда рабочая среда представлена одной материальной частицей.

Методологический базис исследования включает в себя закономерности формирования траектории с непрерывным подбрасыванием, длительность которого

кратна периоду вибрации контактирующей поверхности, характеристики и аналитические соотношения, определяющие условия отрыва и движения материальных частиц, особенности контактных взаимодействий и влияние ряда технологических факторов, связанных с учетом возникающих сил сопротивления со стороны рабочей среды [1÷9].

В качестве примера на рис. 1 приведены варианты графиков траекторий, для которых варьирование настроечных параметров приводит к нарушению возможности реализации режима с кратным подбрасыванием.

На основе использования функции зазора [2] получены аналитические зависимости амплитуды реализации кратного режима от параметров. С учетом влияния сил вязкого трения предложена и разработана методика исследования возможности реализации режимов кратного подбрасывания [3]. В частности, установлено, что силы вязкого трения могут выступать фактором регуляризации режима непрерывного подбрасывания.

Особенности оценки условий динамического контакта для составного твердого тела с учетом неудерживающего характера связей. Особый интерес представляет развитие обобщенных представлений о контактных взаимодействиях, которые не сопровождаются нарушением

контакта. В качестве контактирующих элементов рассматриваются твердые тела конечных размеров, для которых смещение допускается только вдоль нормали к контактной поверхности.

Для ряда модельных задач разработана методика оценки условий сохранения динамического контакта. На рис. 2 показана математическая модель, в которой условие нарушения контакта определяется параметрами массоинерционных и упругих связей. Для реализации метода оценки условий сохранения контакта вводится понятие о полной и динамической реакциях. Критерием сохранения контакта выступает положительность полной контактной реакции. Критическим состоянием считается состояние, когда полная контактная реакция равна нулю.

В основе метода определения условий движения без нарушения контакта лежит построение амплитудно-частотной характеристики передаточной функции с входного воздействия на динамическую компоненту контактной реакции. Сравнение амплитуды колебания динамической реакции со статической реакцией для различных параметров механической системы формирует аналитический инструментарий для исследования условий беззачерных колебаний.

В зависимости от параметров системы условие контактного движения принимает вид:

$$\sqrt{\frac{(m_2 k_1 \omega_1^2)^2 + (p_2 k_1 \omega_1)^2}{(k_1 - (m_1 + m_2) \omega_1^2)^2 + ((p_1 + p_2) \omega_1)^2}} \times A_1 < m_2 g + f_c. \quad (1)$$

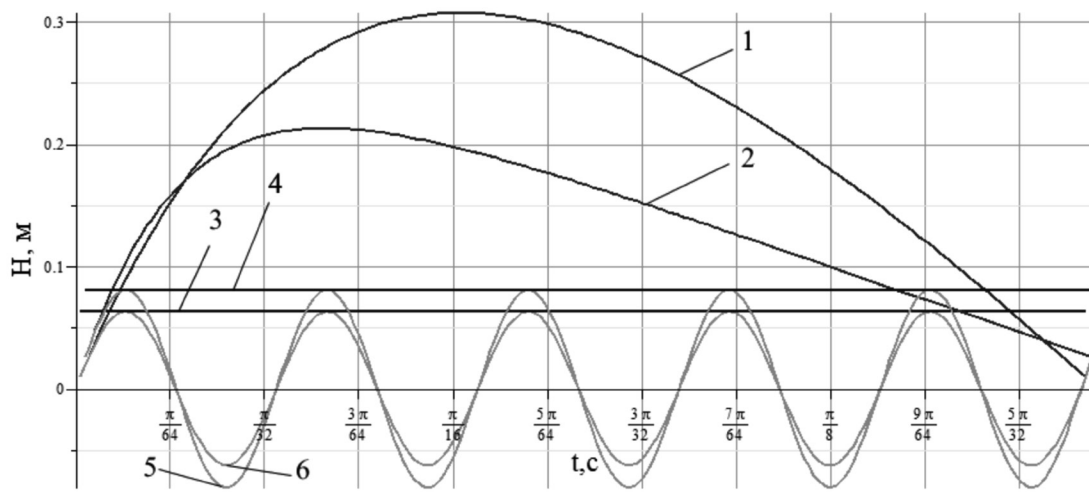


Рис. 1. Графики подлетов для кратных режимов подбрасывания с разными коэффициентами
 $p_1 = 6 \text{ кг/с}$, $p_2 = 18 \text{ кг/с}$, $m = 1 \text{ кг}$, $\omega = 60 \text{ рад/с}$, $A_1 = 0,06 \text{ м}$, $A_2 = 0,08 \text{ м}$

Неравенство (1) может быть представлено в виде множества параметров системы в виде амплитудно-частотной области контакта. На рис. 3 представлено множество I амплитуд и частот, обеспечивающих только контактное колебание составного твердого тела на промежутке установившегося движения.

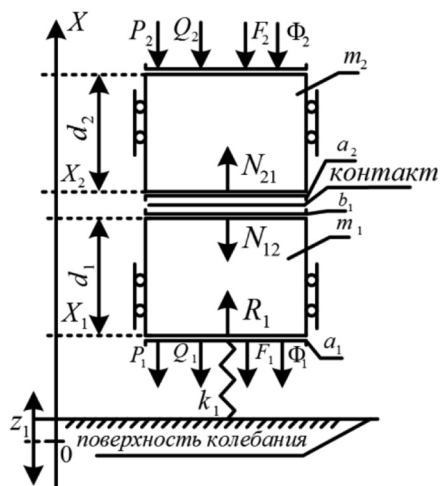


Рис. 2. Составное твердое тело на упругом колеблющемся основании Z_1 . P_i – силы вязкого трения, Q_i – силы тяжести, F_i – постоянные силы, N_{12} , N_{21} – полные контактные реакции, a_2 , b_1 – контактные поверхности

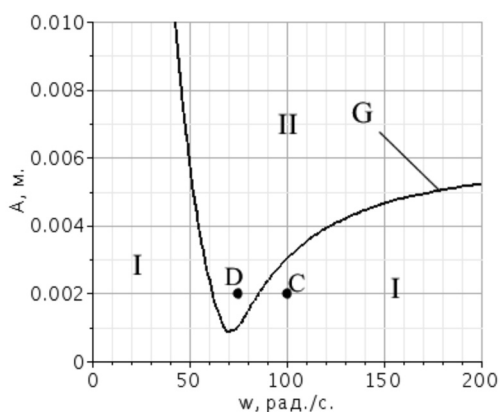


Рис. 3. Амплитудно-частотная область контакта. I – область контакта, II – область возможного зазора, G – линия уровня N_{21}^z для функции $A_1 \cdot A(\omega)$, C – контакт, D – возможный отрыв

Сформированное неравенство (1) определяет разбиение амплитудно-частотной области на подобласти различных режимов колебания составного твердого тела в зависимости от дополнительной постоянной силы, являющейся фактором контактного движения с учетом массы элементов.

Предлагаемая методика обобщается на многомерные модельные задачи. На рис 4 представлена механическая система с несколькими составными частями, зажатыми между поверхностями посредством упругих элементов. Контакт между частями носит неудерживающий характер.

Предлагаемая модель рассматривается как переходная к модели слоя материальных частиц.

Некоторые приложения. Возможности контроля вибрационного поля. Вибрационное поле реального технологического процесса или машины формируется в результате взаимного влияния разнородных факторов. Длительная работа технологической машины может привести к отклонению характеристик от допустимых значений. На основе проведения теоретических и экспериментальных исследований [8, 9] для контроля характеристик вибрационного поля разработана, апробирована и запатентована конструкция датчика (рис. 5) определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах [10].

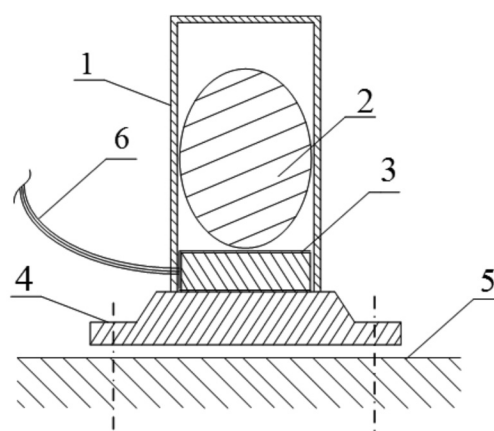


Рис. 5. Датчик определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах: поверхность вибростола(5), цилиндрический корпус (1); инерционные элементы рабочей среды (2); пьезоэлектрический элемент (3); крепежный элемент (4); токовыводы (6)

Техническая применимость и реализация датчика обоснована теоретическими результатами и модельным экспериментом. На основе опытного образца получены и обработаны графики форм сигналов для соответствующих режимов движения опорной поверхности экспериментальной установки.

Разработанный методологический базис исследования контактного взаимодействия с учетом неударяющих связей был применен к рассмотрению комплекса вопросов связанных с обоснованием выбора параметров работы вибрационного стенда, на котором реализуется процесс виброупрочнения лопасти вертолета [8].

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать ряд предварительных выводов.

1. Предлагается обобщенный подход к исследованию сложного контактного взаимодействия в механической колебательной системе, содержащей составные твердые тела, находящиеся под внешним кинематическим и силовым воздействием. Основой подхода служит метод функция зазора и условия, детализирующие отрыв материальной частицы от рабочей поверхности колебания.

2. Новизна предлагаемого подхода заключается в постановке задачи на определение условий сохранения сложного контакта между фрагментами составных твердых тел, входящих в состав механической системы на промежутке установившегося движения, в предположении неударяющего характера связей.

3. Предлагаемый метод исследования динамического контактного взаимодействия расширяется на системы с несколькими степенями свободы.

4. Выявленные особенности и характер зависимости контактного взаимодействия позволяют регулировать условия реализации контакта для требуемого частотного диапазона. В качестве безразмерных параметров регулирования могут выступать обобщенные параметры системы.

5. Разработанный датчик точечного контроля параметров вибрационного поля выступает как элемент технологии регулирования технологического процесса в задачах

увеличения эффективности работы вибрационных технологических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев А.В. Режимы подбрасывания материальной частицы на вибрирующей поверхности в модельной задаче с неударяющими связями / Елисеев С.В., Елисеев А.В. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3(35). – С. 86–96.
2. Елисеев А.В. Теоретические основы процессов взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью с неударяющими связями / И.С. Ситов, А.В. Елисеев // Системы. Методы. Технологии. 2012. – № 4(16). – С. 19–29.
3. Елисеев А.В. Определение коэффициента вязкого трения для режима кратного подбрасывания материальной частицы в модельной задаче с неударяющей связью / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 1. – С. 22–27.
4. Елисеев А.В. Исследование взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью при наличии силы вязкого трения в модельной задаче с неударяющими связями / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 1. – С. 69–77.
5. Елисеев А.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. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – № 4. – С. 51–60.
6. Елисеев, А.В. Определение контактных реакций в составных твердых телах при динамических нагрузках с учетом неударяющих связей / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2014. – № 1. – С. 45–54.
7. Елисеев А.В. Технология оценки свойств динамических взаимодействий в контактах составных твердых тел / А.В. Елисеев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1–2. – С. 179–183.
8. Елисеев А.В. Неударяющие связи в динамических взаимодействиях сыпучей среды и вибрирующей поверхности: научно-методологическое обоснование технологии вибрационного упрочнения / А.В. Елисеев, С.В. Елисеев, А.Г. Пнев, В.Б. Кашуба, И.С. Ситов // Системы. Методы. Технологии. БрГУ. № 3(23). – Братск, 2014. – С. 17–31.
9. Елисеев А.В. Математические модели динамики вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неударяющих связей / С.В. Елисеев, А.В. Елисеев / Ирк. гос. ун – т путей сообщ. – Иркутск, 2015. – 158 с.: ил. – Библиогр.: 56 назв. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 21.01.2015 № 14- В2015.
10. Патент РФ 148250. Датчик определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах / А.В. Елисеев, А.И. Артюнин, С.В. Елисеев, Е.В. Каимов; Заявл 05.05.2014. Оpubл. 27.11.2014. Бюл. № 33.