

колебаниями твердых тел // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 2 (42). С. 8 – 15.

12. Елисеев С.В., Баландин О.А. О влиянии связей по ускорению на динамические свойства механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин: сб. ст. М.: РАН; Наука, 1974. № 2. С. 16-19.

13. Елисеев С.В., Московских А.О., Большаков Р.С., Савченко А.А. Возможности интеграции методов теории цепей и теории автоматического управления в задачах динамики машин [Электронный ресурс] // Наука и образование: электрон. науч.-техн. изд. 2012. № 5. С. 25-26. URL: <http://technomag.edu.ru> (дата обращения: 15.10.2014).

References

1. Kreinin G.V., Bessonov A.P., Voskresenskii V.V. Kinematics, dynamics and accuracy of mechanisms. M.: Mashinostroenie, 1984. 216 p.

2. Zinov'ev V.A., Bessonov A.P. Bases of dynamics of engine units. M.: Mashinostroenie, 1964. 240 p.

3. Shchepetil'nikov V.A. Equilibration of mechanisms. M.: Mashinostroenie, 1982. 256 p.

4. Bessonov A.P. Bases of dynamics of mechanisms with a variable mass of links. M.: Nauka, 1967. 280 p.

5. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. Dynamic synthesis in the generalized problems of vibroprotection and a vibration insulation of technical objects. Irkutsk: IGU, 2008. 523 p.

6. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. Applied tasks of the structural theory of vibroprotective systems: monografiya. Novosibirsk: Nauka, 2011. 394 p.

7. Belokobyl'skii S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. Mechanisms in elastic oscillatory systems: features of the accounting of dynamic

properties, problems of vibration protection of machines, devices and equipment: monografiya. SPb.: Politekhnik, 2013. 364 p.

8. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Artyunin A.I., Parshuta E.A., Kaimov E.V. Mechanisms in elastic oscillatory systems: features of the accounting of dynamic properties, problems of vibration protection of machines, devices and equipment. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 187 p. Dep. v VINITI 15.08.2013 № 243 – V 2013.

9. Belokobyl'skii S.V., Mamaev L.A., Kashuba V.B., Sitov I.S. Vibration technology machine with controllable dynamic state for the surface treatment upregulating media // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2009. № 1. P. 5.

10. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Bol'shakov R.S. The method of structural transformation and its applications in the dynamics of vibroprotective systems. Determination of reactions of ties // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2014. № 1 (41). P. 8-23.

11. Khomenko A.P., Eliseev S.V. Possibilities of equivalent representations of mechanical systems with angular oscillations of rigid bodies // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2014. № 2 (42). P. 8 – 15.

12. Eliseev S.V., Balandin O.A. About influence of ties on speedup on dynamic properties of mechanical systems // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin: sb. st. M.: RAN; Nauka, 1974. № 2. P. 16-19.

13. Eliseev S.V., Moskovskikh A.O., Bol'shakov R.S., Savchenko A.A. Abilities to integrate methods of the theory of chains and the theory of automatic control in problems of dynamics of machines [Elektronnyi resurs] // Nauka i obrazovanie: elektron. nauch.-tekhn. izd. 2012. № 5. P. 25-26. URL: <http://technomag.edu.ru> (data obrashcheniya: 15.10.2014).

УДК 534.014, 621.802

Измерительные устройства для фиксации условий вибрационного взаимодействия при неударивающих связях

А.В. Елисеев^{1 а}, В.Б. Кашуба^{2 б}, Е.В. Каимов^{1 с}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

²Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^аeavsh@ya.ru, ^бnauka@brstu.ru, ^сeliseev_s@inbox.ru

Статья поступила 5.10.2014, принята 20.11.2014

Рассматривается новый подход в разработке датчиков для оценки и контроля параметров технологических процессов упрочнения деталей при взаимодействии сыпучей среды с вибрирующей поверхностью. Показано, что предлагаемое решение отличается от известных подходов тем, что датчик фиксирует и воспроизводит процессы вибрационных воздействий, происходящих непосредственно при вибрационном упрочнении. Получены аналитические отношения, определяющие граничные условия взаимодействия. Приведены данные о конструкции датчика и информация о динамических свойствах датчика, полученная на основе экспериментального исследования опытного образца. Развиваются подходы, связанные с разработкой датчиков упрощенной конструкции, назначением которых является визуализация основных характеристик самого процесса вибрационного взаимодействия, в предположении, что соблюдение таких условий необходимо для обеспечения вибрационного процесса. Рассматриваются вопросы разработки измерительных средств контроля параметров процесса вибрационного упрочнения больших размеров изделий, в которых необходимые свойства поверхностного слоя формируются в процессе непрерывных соударений элементов сыпучей среды и вибрирующей поверхности. Обрабатываемый объект жестко связан с вибрирующей поверхностью, а вибрации создаются с помощью вибрационного стенда, параметры колебаний которого в ходе технологического процесса должны контролироваться и подстраиваться в соответствии с требованиями обеспечения качества упрочняемого слоя. Сыпучая среда в данном случае представляет собой мелкие твердые частицы, образующие слой в несколько сантиметров на поверхности обрабатываемого объекта.

Ключевые слова: вибрационное взаимодействие, виброупрочнение, измерение вибраций, вибрационное соударение, вибрационные технологии.

Measuring devices for fixing vibration interaction conditions with unilateral constraints

A. V. Eliseev^{1 a}, V. B. Kashuba^{2 b}, E. V. Kaimov^{1 c}

¹Irkutsk State Transport University; 15, Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

²Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^aeavsh@ya.ru, ^bnauka@brstu.ru, ^celiseev_s@inbox.ru

Received 5.10.2014, accepted 20.11.2014

To evaluate and control the parameters of technological hardening process a new approach in the development of sensors has been studied under interaction of the granular medium with a vibrating surface. It has been shown that the solution proposed is different from the conventional approaches in that the sensor captures and reproduces the processes of vibration actions occurring directly at vibration hardening. Analytical relationships that define the boundary conditions of interaction have been received. The data on the sensor structure and the information on the sensor dynamic properties, obtained on the basis of experimental research of the prototype, have been given in the article. To visualize the main characteristics of the vibration interaction process the approaches related to the development of sensors with simplified design are being developed under the assumption that meeting such conditions is necessary to ensure the vibration process. Issues of the development of measuring means to control the parameters of the vibration hardening process in large-sized products have been examined. The required surface layer properties are formed in the process of the continuous collision of the granular medium elements and the vibrating surface in such large-sized products. The object processed is rigidly connected to the vibrating surface, and the vibrations are generated by means of vibration of the stand. The oscillation parameters of the stand must be monitored and readjusted in accordance with the requirements of providing a reinforcing layer quality during the technical process. The granular medium in this case is small, hard particles, forming a layer of a few centimeters at the surface of the object under processing.

Key words: vibration interaction, vibration hardening, vibration measurement, vibration collision, vibration technology.

Введение. Контроль технологических процессов, связанных с использованием эффектов вибрационных взаимодействий, является достаточно сложной проблемой, с которой сталкиваются в конкретных задачах вибрационного транспортирования, перемещения, ударного взаимодействия с целью упрочнения поверхностей и др. [1–3].

Несмотря на значительное число теоретических исследований, посвященных методам построения математических моделей с детализированными представлениями о формах и особенностях взаимодействий, возникающих при вибрационных контактах, многие вопросы экспериментального изучения процессов еще не получили должного развития. В частности, это относится к технике и технологии измерения параметров непрерывных технологических процессов. Некоторые вопросы измерения и обработки результатов испытаний нашли отражение в работах [4–6]. Вместе с тем, контроль параметров технологических процессов, в которых физико-механические эффекты взаимодействия сводятся к формированию определенных свойств поверхности при непрерывных соударениях, не всегда требует точных знаний о количественных параметрах вибраций, но должен обеспечивать определенные формы или режимы динамических взаимодействий в целом.

В большей степени представляет интерес наличие устойчивых процессов соударений, характеризующихся признаками динамической устойчивости, во время технологического цикла.

В предлагаемой статье развиваются подходы, связанные с разработкой датчиков упрощенной конструкции, назначением которых является визуализация основных характеристик самого процесса вибрационного взаимодействия в предположении, что соблюдение

таких условий необходимо для обеспечения вибрационного процесса.

Общие положения. Постановка задачи исследования. Рассматриваются вопросы разработки измерительных средств контроля параметров процесса вибрационного упрочнения большегабаритных изделий, в которых необходимые свойства поверхностного слоя формируются в процессе непрерывных соударений элементов сыпучей среды и вибрирующей поверхности. Обрабатываемый объект жестко связан с вибрирующей поверхностью, а вибрации создаются с помощью вибрационного стенда, параметры колебаний которого в ходе технологического процесса должны контролироваться и поднастраиваться в соответствии с требованиями обеспечения качества упрочняемого слоя. Сыпучая среда в данном случае представляет собой мелкие твердые частицы, образующие слой в несколько сантиметров на поверхности обрабатываемого объекта.

Динамические процессы установившихся взаимодействий представляют собой периодические подбрасывания частиц; такие частицы могут быть стальными шариками диаметром несколько миллиметров, иметь фазу свободного полета (или подлета), фазу частичного пролеживания с последующим возобновлением цикла. Математические модели для изучения особенностей периодических процессов отрыва, полета, отскока чаще всего имеют упрощенный вид, когда движение поверхности считается гармоническим, а особенности ударных взаимодействий заранее определяются показателями качества обрабатываемой поверхности [7]. Особенности периодических режимов, в которых длительность фазы свободного подлета кратна периоду колебания поверхности, рассмотрены в работах [8–10]. На

рис. 1 представлена характерная траектория подбрасывания материальной частицы с перебрасыванием через несколько периодов колебания опорной поверхности с учетом сил вязкого трения между частицей и средой.

Выбор согласованных между собой амплитуды и частоты колебания опорной поверхности в определенном соотношении позволяет обеспечивать режим кратного периодического подбрасывания (рис. 2) [8].

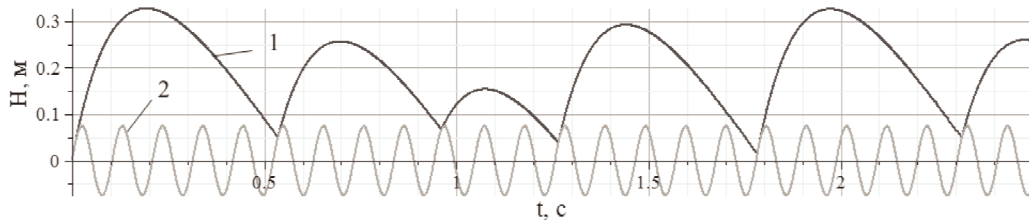


Рис. 1. Характерная траектория подбрасывания с перелетом частицы через несколько периодов. 1 — траектория подбрасывания частицы; 2 — траектория поверхности колебания с амплитудой $A = 0,74$ м, $\omega = 60$ рад/с, $p = 14$ кг/с

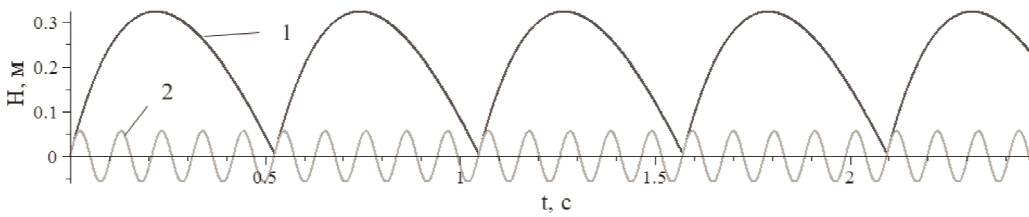


Рис. 2. Траектория подбрасывания частицы при реализации режима с кратным подбрасыванием

На рис. 3 показаны траектории полета частиц, дающих представление об особенностях влияния сил трения на движение материальной частицы [8].

Разрабатываемые математические модели, описанные в научной литературе, в том числе в работах [8–10], дают возможность оценивать влияние на параметры процессов взаимодействия с учетом действия различных факторов, среди которых существенную роль играют сопротивление рабочей среды, частота и амплитуда колебаний, возможность возникновения взаимодействий, создаваемых контактами в структуре вибрирующего слоя.

Наиболее рациональными с точки зрения эффективности взаимодействия представляются параметры процессов, в которых частицы имеют минимальное время пролеживания. В таких ситуациях подпрыгивание шарика или материальной частицы идет непрерывно, а процессы соударения после окончания фазы полета происходят с высокими параметрами ударного взаимодействия.

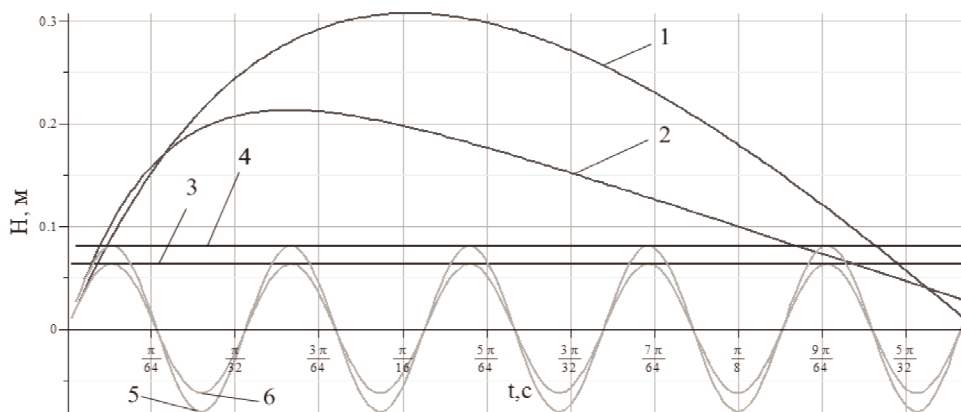


Рис. 3. Графики полетов для кратных режимов подбрасывания с разными коэффициентами: $p_1 = 6$ кг/с, $p_2 = 18$ кг/с, $m = 1$ кг, $\omega = 60$ рад/с, $A_1 = 0,06$ м, $A_2 = 0,08$ м

Аналитические подходы позволяют с достаточной для практических приложений точностью оценивать влияние отдельных факторов, если речь идет о траекториях отдельных частиц.

к параметрам механической колебательной системы, в частности, к особенностям сил вязкого трения, массам частиц и др. На рис. 4 представлены графики, отражающие особенность влияния сил вязкого трения на высоту полета частиц. Графики (1–3, рис. 4) отображают высоту полета для частиц различных масс [10].

Однако распространение полученных выводов на закономерности движения слоя требует определенной осторожности. Это обусловлено чувствительностью ключевых характеристик движения траектории частиц

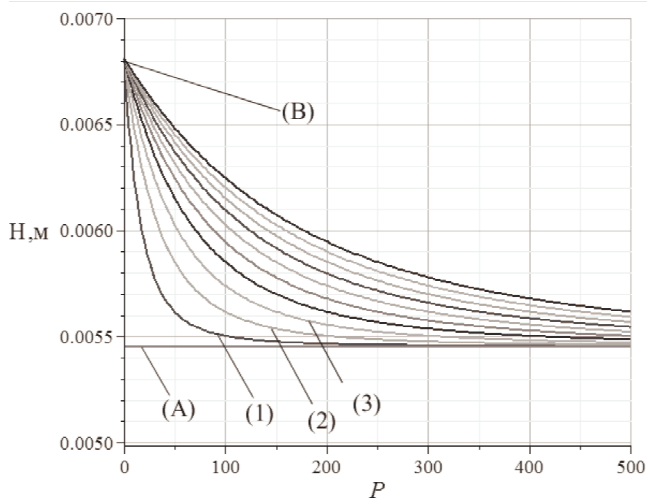


Рис. 4. Высота подбрасывания материальной частицы в зависимости от коэффициента трения ρ

Силы вязкого трения существенным образом влияют и на длительность полета материальных частиц. На рис. 5 представлены графики уменьшения длительности полета частиц с различными массами по мере роста коэффициента вязкого трения. Влияние вязкого трения на фазу отрыва носит сложный характер и определяется интенсивностью колебания $\frac{g}{\omega^2 A}$. В зависимости от значения интенсивности фаза отрыва может либо приближаться, либо удаляться от $\frac{\pi}{2}$ по мере роста коэффициента вязкого трения.

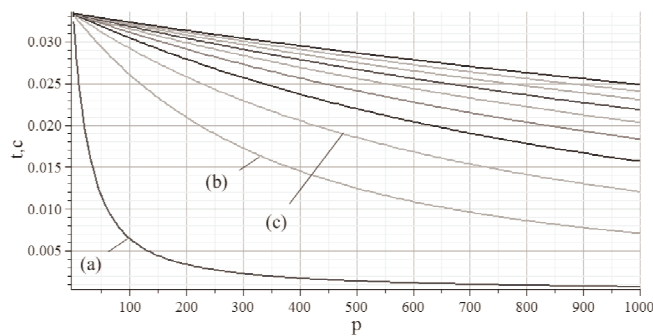


Рис. 5. Длительность полета для частиц различной массы в зависимости от коэффициента трения ρ

На рис. 6 представлены примеры зависимости фазы отрыва от вязкого трения. Для кривых из множества I показатель интенсивности меньше 1, для кривых из множества II — больше 1.

Таким образом, влияние вязкого трения на режим движения определяется интенсивностью колебания опорной поверхности.

Сопоставление данных, полученных на основе аналитических соотношений, отражает следующие обстоятельства. Изменение небольшого количества факторов приводит к разнообразию процессов и создает трудности в получении точных рекомендаций по поддержанию или поднастройке технологических процессов, хотя информация о качественном разнообразии процессов вибрационного взаимодействия, формах

траекторий, фазовых соотношениях достаточно адекватна реальным процессам и подтверждается практическими экспериментами. В связи с этим возникает ряд вопросов, решение которых может создать определенные основы для разработки средств получения информации о качественных характеристиках процесса вибрационных взаимодействий в их интеграционных взаимодействиях.

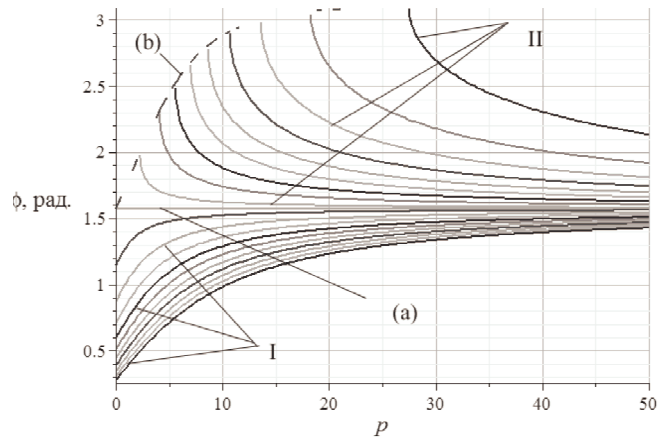


Рис. 6. Фаза отрыва в зависимости от коэффициента трения ρ

Задача исследования заключается в разработке принципов построения и способов конструирования датчиков, фиксирующих усредненные свойства вибрационных процессов, отражающих особенности взаимодействия слоя частиц.

Принципы построения и конструктивные особенности датчиков. Существующие методы исследования и используемые датчики фиксируют параметры вибрационного процесса путем измерения перемещения, скорости, ускорения, резкости отдельных точек вибростола или отдельных точек обрабатываемой детали. Что касается качества обработки детали, то представление об этом формируется на основе опытных данных, полученных из сопоставления параметров вибрационных взаимодействий и результатов оценки свойств упрочняемой поверхности детали. Приведем некоторые сведения об используемых способах измерений.

Известен пьезоэлектрический акселерометр [11], включающий корпус, состоящий из основания и крышки. На основании установлен чувствительный элемент, выполненный в виде монолитного многослойного конденсатора из пьезоэлектрических пластин с электродами и коммутационными шинами вдоль монолита, каждая из которых соединена с электродами одной полярности, отличающийся тем, что в пьезоэлектрических пластинах со стороны одной из электродных поверхностей, идентичных относительно основания, выполнены металлизированные хордовые канавки, диффузно заполненные металлическими коммутационными шинами.

Данный акселерометр позволяет повысить коэффициент преобразования по заряду и точность измерения параметров вибрации. Вместе с тем он не обеспечивает регистрацию вибрационных режимов с нарушением контакта между фрагментами составных твердых тел.

Известен пьезоэлектрический датчик [12], включающий корпус и инерционное тело, выполненный в

виде втулки пьезоэлемент, закрепленный между корпусом и инерционным телом, и средство для опоры пьезоэлемента по крайней мере по одной из кромок, отличающийся тем, что дополнительно введено средство для опоры аналогичной кромки противоположного торца пьезоэлемента, выполненное в виде кольцевой канавки на корпусе или инерционном теле, в которой размещено упругое разжимное кольцо с обеспечением его защемления между кромкой пьезоэлемента и противоположной ей поверхностью канавки.

Такое устройство обеспечивает надежность функционирования датчика при воздействии интенсивных знакопеременных виброударных ускорений, но не может идентифицировать вибрационный режим технологической машины в процессе колебания составных твердых тел.

Интерес представляет пьезоэлектрический акселерометр [13], содержащий поджатые к основанию корпуса пьезочувствительный элемент, работающий на сжатие-растяжение, и инерционный элемент из монокристаллического диэлектрика, отличающийся тем, что инерционный элемент выполнен из пьезоэлектрического материала. При этом указанные элементы соединены электрически параллельно, а их векторы поляризации ориентированы вдоль оси чувствительности акселерометра и направлены в разные стороны.

Упомянутыми датчиками регистрируются только частотные характеристики движения измеряемой поверхности технологических вибрационных машин. В меньшей степени отражаются процессы взаимодействия частиц сыпучих материалов с опорной поверхностью вибрационной машины. Вместе с тем для ряда технологических процессов необходимым является в первую очередь отрыв рабочей среды, представленной гранулированной сыпучей смесью, от опорной поверхности вибрационной машины.

При определенных характеристиках работы вибрационной машины опорная поверхность колебания может и не обеспечивать, в силу сложного характера колебания, требуемых параметров вибрационного поля. К примеру, при разбалансировке или износе элементов вибрационной машины могут возникать узлы колебаний, в которых не происходит подбрасывание сыпучего материала. В связи с этим возникает задача по контролю за соответствием вибрационного поля граничным допустимым значениям параметров технологического процесса. Таким требованием в ряде случаев выступает необходимость обеспечения обязательного отрыва сыпучего материала от опорной поверхности колебания. Под граничными условиями понимаются такие параметры вибрационной технологической машины, при которых реализуется режим подбрасывания сыпучей смеси. Для ряда вибрационных машин необходимой фазой технологического процесса служит состояние, при котором в каждой точке вибрирующей опорной поверхности обязательным является отрыв частиц сыпучей смеси.

Особенности датчика. Предлагаемое измерительное устройство представляет собой датчик, который в миниатюре воспроизводит процесс вибрационного взаимодействия шариков в специальной малогабарит-

ной камере. Эта камера оснащена чувствительными элементами, фиксирующими взаимодействие в нужных направлениях и позволяющими определить граничные параметры режима взаимодействия тел гранулированных сыпучих материалов с опорной горизонтальной поверхностью в вибрационных технологических машинах.

Датчик имеет корпус и крепежный элемент с установленным в основании пьезоэлементом, работающим на сжатие-растяжение, токовыводы, соединенные со сторонами пьезоэлемента, и элементы рабочей среды. Отличается тем, что элементы рабочей среды, в зависимости от амплитуды и частоты колебания опорной поверхности технологической машины, периодически ударяются о пьезоэлемент, и возникающее напряжение на токовыводах регистрирует вибрационный режим, обеспечивающий подбрасывание гранулированной сыпучей смеси.

В результате происходит регистрация режима подбрасывания сыпучей смеси на колеблющейся поверхности, который является необходимой фазой производственного процесса. Подбрасывание сыпучей смеси происходит одновременно с подбрасыванием элементов рабочей среды датчика, который безотрывно прикреплен к вибрирующей опорной поверхности технологической машины. Таким образом, режим, обеспечивающий подбрасывание сыпучей смеси на опорной поверхности в области установки датчика, одновременно вызывает и подбрасывание инерционных элементов рабочей среды датчика. Инерционные элементы рабочей среды датчика совершают удары по пьезоэлементу, вызывая кратковременные всплески напряжения на концах токовыводов. Полученные сигналы могут быть распознаны соответствующей аппаратурой, к примеру, цифровым осциллографом. Снятие данных с датчика в процессе работы технологической машины позволяет определить реализацию режима виброподбрасывания в точке установки датчика. Установка нескольких датчиков позволяет определить реализацию режима виброподбрасывания для нескольких точек вибрационного поля опорной поверхности технологической машины.

Конструкция предлагаемого датчика определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах показана на рис. 7.

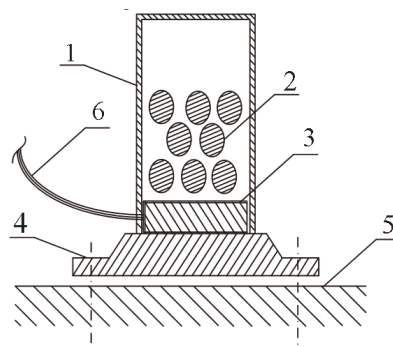


Рис. 7. Датчик определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах: поверхность вибростол 5; цилиндрический корпус 1; инерционные элементы рабочей среды 2; пьезоэлектрический элемент 3; крепежный элемент 4; токовыводы 6

Предлагаемый датчик (рис. 7) установлен на вибрирующее основание 5 технологической машины. посредством крепежного элемента 4 датчик крепится на горизонтальное вибрирующее основание 5. Вертикальный цилиндрический корпус 1 неподвижно устанавливается с помощью крепежного элемента 4. Внутри корпуса 1 на крепежном элементе 4 фиксируется пьезоэлектрический элемент 3. Сверху пьезоэлектрического элемента внутри корпуса 1 помещаются инерционные элементы рабочей среды 2.

Токовыводы 6 позволяют передавать электрический сигнал, возникающий в результате деформации пьезоэлектрического элемента, в регистрирующую аппаратуру.

Оценка возможностей измерительного устройства. Особенности датчика (рис. 7) заключаются в том, что при возмущении со стороны колеблющегося основания 5 вибрационной технологической машины происходит изменение контактной реакции между инерционными элементами рабочей среды 2 и пьезоэлектрическим элементом 3. Изменение контактной реакции приводит к деформации пьезоэлектрического элемента, что влечет изменение напряжения, которое посредством токовыводов 6 регистрируется соответствующей аппаратурой, оцифровывается и становится доступным для представления в графическом виде и анализа. При малых частотах и амплитудах колебания опорной поверхности вибрационной технологической машины генерируется характерный сигнал, соответствующий контактному взаимодействию инерционных элементов рабочей среды датчика 2 и пьезоэлектрического элемента. По мере увеличения частоты и амплитуды колебания опорной поверхности возникает режим нарушения контакта между инерционными элементами 2 и пьезоэлектрическим 3. Возникновение отрыва инерционного тела 2 и последующий удар о пьезоэлектрический элемент 3 приводят к проявлению признаков ударного взаимодействия.

Сравнение характерного спектра, соответствующего контактному колебанию инерционного тела, со спектром, соответствующим ударному взаимодействию, позволяет зарегистрировать режим с ударами.

В качестве области применения датчика для определения граничных параметров взаимодействий для технологических вибрационных систем следует привести технологический вибрационный процесс виброупрочнения лонжерона лопасти вертолета посредством рабочей среды, образованной большим количеством стальных шариков. В основе расчетов лежит математическая модель взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью [14] для случая горизонтальной поверхности, совершающей вертикальные колебания. Технологическая вибрационная машина имеет возможность регулирования амплитуды и частоты колебания опорной поверхности вибрирующих секций. Для первичной настройки режима виброупрочнения выбирают такие граничные параметры вибрационных режимов, чтобы во всех точках поверхности колеблющихся секций реализовался режим подбрасывания рабочей среды. Установка датчика на технологическую опорную поверхность колебания позволяет провести

предварительную настройку технологического процесса путем регулирования амплитуды и частоты колебания опорной поверхности и, в частности, для фиксированных параметров ответить на вопрос, реализуется ли в точке установки датчика режим подбрасывания рабочей среды или параметры системы таковы, что режим подбрасывания не реализуется. Если при определенных параметрах вибростенда установленный датчик регистрирует ударный режим, то считается, что граничные параметры взаимодействия определены и соответствуют текущим параметрам вибрационной машины.

Техническая применимость и реализация датчика определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах может быть обоснована теоретическими результатами и модельным экспериментом. При рассмотрении гармонического колебания поверхности при наличии только гравитационных сил область параметров, обеспечивающих отрыв материальной точки от поверхности, определяется условием

$A\omega^2 > g$, где A, ω — амплитуда и частота колебания поверхности. Таким образом, можно утверждать, что отрыв инерционного элемента происходит одновременно с отрывом сыпучей смеси от опорной поверхности вибрационной машины при условии, что рассматриваются только гравитационные силы [9].

Для подтверждения возможности получения технического результата разработаны экспериментальный прототип датчика и лабораторная виброустановка. Получены и обработаны графики форм сигналов для соответствующих режимов движения опорной поверхности экспериментальной установки.

Опытный образец датчика приведен рис. 8. Основными элементами конструкции датчика служат цилиндрический корпус 1, сыпучая смесь, образованная стальными шариками 2, встроенный в основание корпуса пьезочувствительный элемент 3, токовыводы 4.

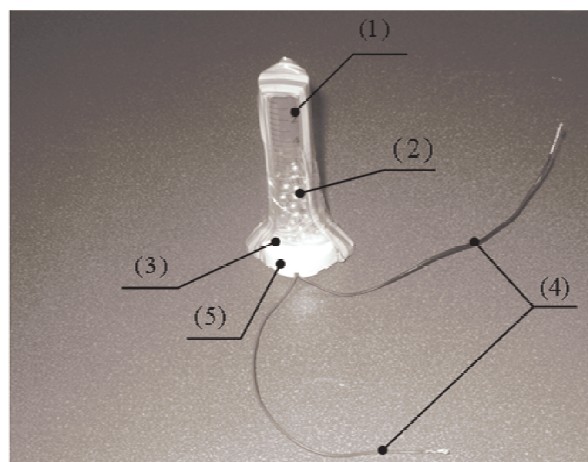


Рис. 8. Датчик определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах

Для определения критического режима работы вибростенда датчик устанавливается на рабочем столе. На рис. 9 представлен вариант установки опытного образца датчика 1 на модельную вибрационную машину 2.

Для наглядного описания процесса регистрации критического режима виброупрочнения технологиче-

ской машины на рис. 10 представлен общий контур генерации и передачи сигнала с датчика на устройство вывода.

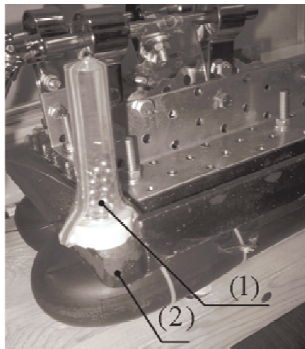


Рис. 9. Датчик определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах

На рис. 10 отображены опытный вибростенд 1, на секцию которого установлен контейнер 5, наполненный смесью стальных шариков; на секцию вибростенда установлен датчик 2 регистрации критических параметров; оборудование 3 регистрирует сигналы, поступающие с датчика, и позволяет отображать форму сигнала на устройстве вывода 4.

Пример характерных форм сигналов, поступающих с датчика в режиме с подбрасыванием рабочей среды из нескольких стальных шариков, представлен на рис. 11.

Таким образом, работа вибростенда в режиме подбрасывания рабочей среды отчетливо проявляется через формирование характерные сигналов, регистрируемых датчиками.

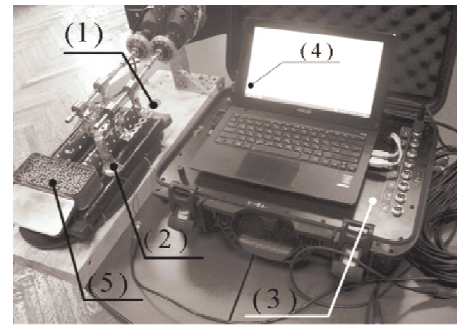


Рис. 10. Общий контур регистрации сигналов: 1 — опытный вибростенд, 2 — датчик регистрации критических параметров, 3 — оборудование по регистрации сигналов с датчика, 4 — устройство вывода сигналов, 5 — контейнер со стальными шариками

Полезность датчика определения граничных параметров взаимодействия тел в вибрационных системах заключается в возможности определения режима подбрасывания сыпучих материалов в точках опорной поверхности и, как следствие, в возможности контроля, настройки и регулирования режимов работы технологических линий вибрационных машин.

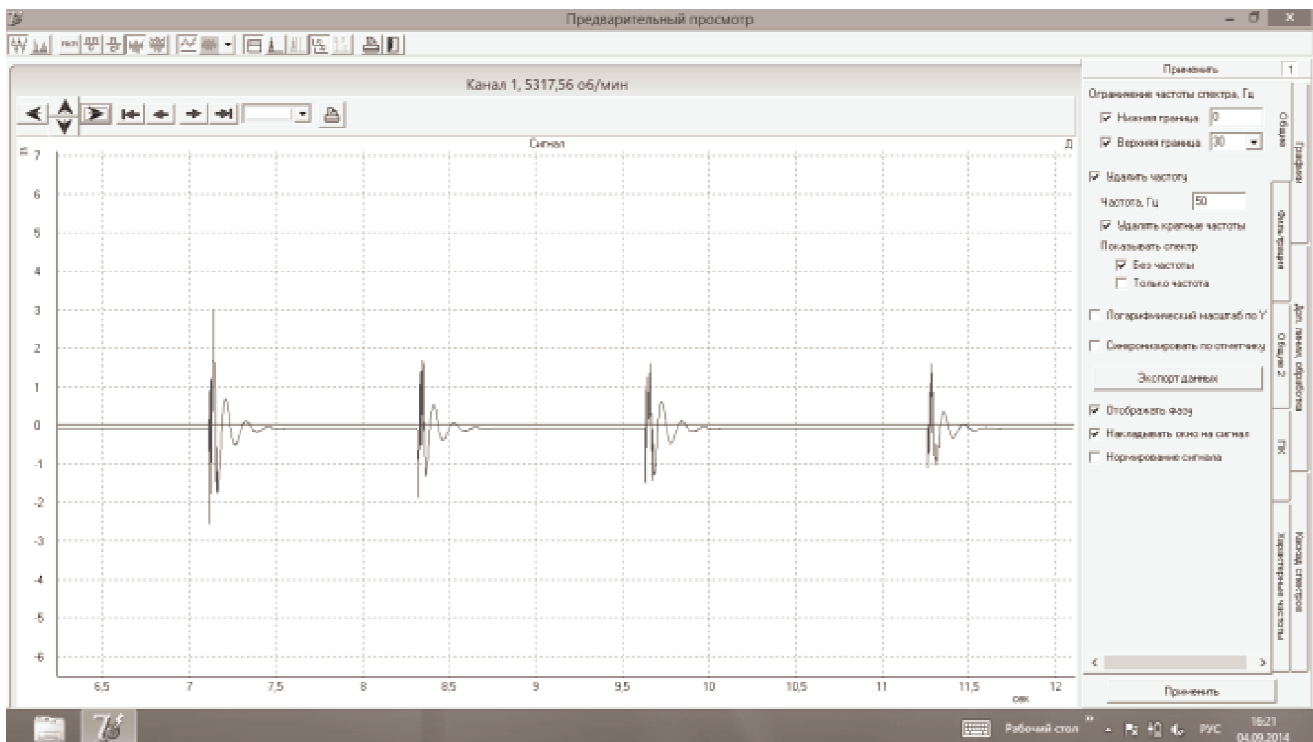


Рис. 11. Характерный сигнал регистрации критического режима с подбрасыванием

Эффективность заключается в большей простоте и надежности, возможности датчика по определению граничных параметров взаимодействия тел идентифицировать режим виброподбрасывания в точках опорной поверхности вибрационной машины.

Работоспособность подтверждается теоретическими результатами и практическими данными, полученными по результатам проведения модельных экспериментов на опытных образцах.

Заключение

На основе проведенных исследований, связанных с обзором и оценкой существующих методов измерения, можно утверждать, что главным образом внимание в создании измерительной аппаратуры для вибрационных технологических машин уделяется фиксации и контролю текущих параметров вибрационного процесса: смещению, виброскоростям и виброускорениям. Вместе с тем для конкретных технических приложений, таких, как вибрационное упрочнение, большой интерес представляет соблюдение режимов непрерывного подбрасывания. При всей развитости математических моделей, перейти от рассмотрения взаимодействий одной материальной частицы с вибрирующей поверхностью к представлениям о том, какие процессы возникают при взаимодействии слоя сыпучей среды с обрабатываемой поверхностью, очень сложно. Выход может быть найден при использовании датчика, в котором реально воспроизводится процесс вибрационного взаимодействия. Разработана принципиальная схема датчика. Датчики апробированы на реальном вибрационном технологическом оборудовании.

Литература

1. Блехман И.И. Вибрационная механика: монография. М.: Наука, 1994. 400 с.
2. Вульфсон И.И. Динамика цикловых машин: монография. СПб.: Политехника, 2013. 425 с.
3. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б. Прикладные. Задачи структурной теории виброзащитных систем: монография. СПб.: Политехника, 2013. 364 с.
4. Яковлев В.В., Сухих А.Н., Кашуба В.Б., Ситов И.С. Экспериментальная оценка динамического состояния технологических машин портативным виброизмерительным комплексом адп-3101 // Труды Братского Государственного Университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2009. Т. 2. С. 150-152.
5. Кашуба В.Б. Разработка методологических основ создания бетоноотделочных машин с дисковыми высокочастотными рабочими органами: дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2008. 205 с.
6. Ситов И.С., Белокобыльский С.В. Способы и средства изменения динамического состояния технического комплекса для вибрационного заглаживания // Современные Технологии. Системный Анализ. Моделирование. 2007. № 13. С. 46-51.
7. Белокобыльский С.В. Динамика систем с сухим трением и ее приложение к задачам горной механики М.: 2002. 209 с.
8. Ситов И.С., Белокобыльский С.В. Способы и средства изменения динамического состояния технического комплекса для вибрационного заглаживания Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 13. С. 46-51.
9. Елисеев А.В. Особенности взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью в зависимости от дополнительной силы с неупругой связью // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 3. С. 9-15.
10. Елисеев С.В., Елисеев А.В. Исследование взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью при наличии силы вязкого трения в модельной задаче с не-

упругими связями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 69-77

11. Вусевкер Ю.А., Гориш А.В., Дунаевский В.П., Панич А.Е. Пьезоэлектрический акселерометр: пат. 2150117 Рос. Федерация; заявка № 98122377/28, заявл. 12.08.98; опубл. 27.05.00.
12. Воронов А.М., Степанов В.А. Пьезоэлектрический акселерометр: пат. 2289821 Рос. Федерация. № 2003127373/28; заявл. 10.03.2005; опубл. 20.12.06.
13. Кирпичев А.А. Пьезоэлектрический акселерометр: пат. 2400760 Рос. Федерация; опубл. 27.09.10.
14. Вибрации в технике: справочник в 6 т. / гл. ред. В.Н. Челомей. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4 Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавенделла. 1981. Т. 6. 504 с.

References

1. Blekhan I.I. Vibrational mechanics: monografiya. M.: Nauka, 1994. 400 p.
2. Vul'fson I.I. Dynamics of cyclic machines: monografiya. SPb.: Politekhnik, 2013. 425 p.
3. Belokobyl'skii S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. Prikladnye. The Applied problems of the structural theory of vibration isolation systems: monografiya. SPb.: Politekhnik, 2013. 364 p.
4. Yakovlev V.V., Sukhikh A.N., Kashuba V.B., Sitov I.S. Experimental evaluation of the dynamic state of technological machines portable vibration measuring equipment ADP-3101 // Trudy Bratskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2009. T. 2. P. 150-152.
5. Kashuba V.B. Development of the methodological foundations of creating a concrete finishing machine with a disk of high-frequency working bodies: dis. ... kand. tekhn. nauk. Bratsk, 2008. 205 p.
6. Sitov I.S., Belokobyl'skii S.V. Ways and means of changing the dynamic state of the technical complex for vibration smoothing // Sovremennye Tekhnologii. Sistemnyi Analiz. Modelirovanie. 2007. № 13. P. 46-51.
7. Belokobyl'skii S.V. Dynamics of systems with dry friction and its application to problems of mining. M., 2002. 209 p.
8. Sitov I.S., Belokobyl'skii S.V. Methods and means of changing the dynamic state of technical complex for the vibrational smoothing // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2007. № 13. P. 46-51.
9. Eliseev A.V. Features of the interaction of a particle with a vibrating surface, depending on the additional force with unilateral constraints // Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2013. № 3. P. 9-15.
10. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Investigation of the interaction of a particle with a vibrating surface in the presence of viscous forces in the model problem with unilateral constraints // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2013. № 1. P. 69-77.
11. Vusevker Yu.A., Gorish A.V., Dunaevskii V.P., Panich A.E. Piezoelectric accelerometer: pat. 2150117 Ros. Federatsiya; заявка № 98122377/28, заявл. 12.08.98; opubl. 27.05.00.
12. Voronov A.M., Stepanov V.A. Piezoelectric accelerometer: pat. 2289821 Ros. Federatsiya. № 2003127373/28; заявл. 10.03.2005; opubl. 20.12.06.
13. Kirpichev A.A. Piezoelectric accelerometer: pat. 2400760 Ros. Federatsiya; opubl. 27.09.10.
14. Vibration Engineering: spravochnik v 6 t. / gl. red. V.N. Chelomei. M.: Mashinostroenie, 1981. T.4 Vibratory processes and machines / pod red. E.E. Lavendella. 1981. T. 6. 504 p.