

Г.А. Шевченко, А.А. Бобылёв, М.А. Ищук

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ СИТ ПОЛИЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ГРОХОТОВ

G.A. Shevchenko, A.A. Bobylev, M.A. Ishchuk

SUBSTANTIATION OF SIEVES OSCILLATIONS PARAMETERS OF POLYFREQUENCY VIBRATING SCREENS

Рассмотрено влияние поличастотных колебаний ситовых поверхностей вибрационных грохотов со сплошным частотным спектром на эффективность разделения тонкодисперсных сыпучих материалов. Разработана математическая модель поличастотного вибрационного грохота, исследованы режимы возбуждения ситовых поверхностей. Определены условия поличастотного возбуждения ситовых поверхностей со сплошным частотным спектром. Обоснована устойчивость поличастотных колебаний к изменению технологической нагрузки и динамических параметров грохота.

Ключевые слова: *поличастотные колебания, разделение, сыпучие материалы, модель, грохот*

При увеличении содержания мелких и тонких классов крупности в сыпучем материале эффективность классификации частиц по крупности на ситовых поверхностях вибрационных грохотов снижается. Это вызвано увеличением влияния сил сцепления между частицами при уменьшении их крупности вследствие возрастания свободной удельной поверхности. Мелкие классы имеют большую свободную удельную поверхность, чем крупные. При наличии в материале липких связующих примесей, например, глины, масла и т. д. грохочение еще более затрудняется. Липкие связующие способствуют образованию комков, уносящих тонкие частицы в надрешетный продукт, и налипанию материала на поверхность сита, что приводит к забиванию отверстий сита и прекращению грохочения.

Сцепление частиц возникает под воздействием сил поверхностного натяжения жидкости, находящейся в капиллярных промежутках между частицами, частицами и поверхностью сита, силы зарядов статического электричества, вызванного вибрацией, сил молекулярного взаимодействия и других сил. Эти силы, а также силы упругих деформаций твердых и жидких фаз среды, ячеек и материала сита, силы давления пузырьков воздуха, находящегося в промежутках между частицами, относятся к восстанавливающим силам, которые обеспечивают при относительных колебаниях связанных частиц или при упругих деформациях возврат частиц в равновесное или недеформированное состояние. Такие силы способны обеспечить наличие собственных частот частиц. Вследствие разнообразия восстанавливающих сил, их нелинейности, демпфирования при относительных перемещениях частиц и различий в их параметрах структура спектров собственных частот чрезвычайно разнообразна и имеет широкое распределение даже для однотипных частиц. Максимальный отклик относительных колебаний частиц на внешние гармонические воздействия будет наблюдаться при близости частот этих воздействий к собственным

частотам частиц. При совпадении спектров собственных частот со спектрами внешнего гармонического воздействия возможно развитие резонансных явлений в колебаниях частиц.

При моночастотном или даже поличастотном возбуждении сит вибрационных грохотов с узким дискретным спектром резонансных явлений в колебаниях частиц происходить не может. Даже если допустить, что при вибрационном возбуждении благодаря резонансу обеспечиваются условия эффективного колебания частиц с определенными параметрами, то отсутствие таких условий для других частиц и их колебания со значительно меньшей интенсивностью подавляют эти резонансные колебания и, следовательно, резонансных явлений в колебаниях частиц наблюдаться не будут. Для возбуждения резонансных колебаний необходимо, чтобы структура спектров собственных частот была близка к структуре спектров возбуждения. Учитывая разнообразие в распределении и спектральной плотности спектров собственных частот частиц, это возможно только при возбуждении сплошного частотного спектра колебаний просеивающей поверхности грохота и сыпучего материала. Возбуждение такого частотного спектра в нелинейной полностью определенной (детерминированной) динамической системе возможно при неперiodических колебаниях или детерминированном хаосе. Математическими образами детерминированного хаоса выступают так называемые странные аттракторы [1, 2]. Мерой идентификации странных аттракторов являются сечения и отображения Пуанкаре. Переход от регулярных движений динамической системы к хаотическим представляет собой некоторую конечную или бесконечную последовательность бифуркаций, приводящих к возбуждению частот, находящихся в рациональном отношении с частотами внешнего возбуждения.

При возбуждении сплошного частотного спектра колебаний просеивающей поверхности грохота и сыпучего материала резонансные явления в колебаниях частиц, находящихся под действием восстанавли-

ваючих сил вследствие резонансного усиления относительных колебаний, могут обеспечить разрушение установившихся связей между частицами, частицами и ситом и способствовать увеличению интенсивности перемещения частиц в слое материала. В результате этого создаются условия, препятствующие образованию агрегатов из слипшихся частиц, налипанию материала на сито и забиванию его отверстий.

Резонансные явления способствуют также очистке сита от „трудных“ зерен, застрявших в его ячейках. На контакте „трудное“ зерно – ячейка сита возникают силы упругих деформаций, вызванные деформацией ячейки, материала сита и частицы, удерживающие её в ячейке. При колебании сита с частотами, близкими к собственным частотам частицы, обусловленных упругостью её контакта с ячейкой, вследствие резонансного усиления относительных колебаний частица может высвободиться из ячейки.

Следовательно, при возбуждении поличастотных колебаний сита и материала на сите со сплошным частотным спектром ячейки сита будут очищаться от „трудных“ частиц и создаются условия для эффективной классификации тонкодисперсных материалов, в том числе при наличии в них липких, например, глинистых примесей. Кроме того, при этом обеспечиваются дополнительные интенсивные силовые воздействия на частицы, поскольку при упругих деформациях, например, в результате ударных взаимодействий, частицы испытывают дополнительные силовые воздействия, вызванные резонансными явлениями. Эти силовые воздействия способствуют интенсивному перемещению частиц в слое материала и их сегрегации, что увеличивает вероятность контакта частиц с просеивающей поверхностью грохота и их прохождения через ячейки сита.

Поличастотные колебания сит вибрационных грохотов могут быть реализованы в нелинейных динамических системах [3]. Конструктивно это может быть воплощено путём установки с зазором относительно рабочего органа грохота упругих ограничителей хода. На рис. 1 представлена расчетная схема поличастотного вибрационного грохота с односторонними упругими связями, состоящего из корпуса массой m_1 , ударника массой m_2 , сита и сыпучего материала на сите, общей массой m_3 . Короб установлен на неподвижном основании при помощи удерживающих связей с жесткостью c_1 . Внутри корпуса закреплены упругое сито с жесткостью c_3 и ударник, установленный с зазором δ_{03} или в контакте с ситом, для непосредственного возбуждения его колебаний. Ударник закреплён к корпусу посредством удерживающих упругих связей с жесткостью c_2 и оснащен эластичными буферами с жесткостью c_{01} и c_{02} , а корпус – односторонними (неудерживающими) ограничителями перемещения ударника. При этом между буферами и ограничителями в состоянии покоя сис-

темы устанавливаются зазоры δ_{01}' , δ_{01}'' и δ_{02}' , δ_{02}'' в общем случае не равные между собой.

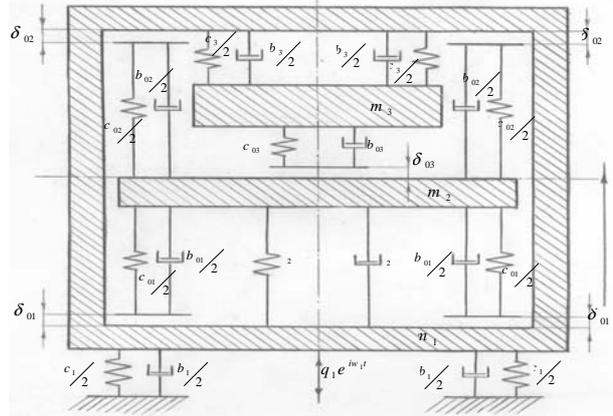


Рис. 1. Расчетная схема поличастотного грохота

Колебания корпуса грохота возбуждаются дебалансным вибровозбудителем, круговая частота вращения дебалансов которого равна ω_1 , а амплитуда вынуждающей силы – q_1 . Колебания сита и сыпучего материала в основном возбуждаются в результате одностороннего взаимодействия сита с ударником. Рассматриваются только вертикальные перемещения указанных масс. В качестве одно- и двухсторонних связей между массами динамической системы рассматриваются нелинейные упругодемпфирующие элементы Фойхта.

Колебания динамической системы поличастотного грохота (рис. 1) описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$m_1 \ddot{x}_1 + P_1 - P_2 + P_3 - P_{01} + P_{02} = q_1 e^{i\omega_1 t}, \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + P_2 + P_{01} - P_{02} - P_{03} = 0, \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 - P_3 + P_{03} = 0, \quad (3)$$

где m_i – i -я масса, $i = \overline{1,3}$; x_i – перемещения i -й массы; P_i – усилие в i -й двухсторонней связи; P_{0j} – усилие в j -й односторонней связи, $j = \overline{1,3}$; q_1 – амплитуда вынуждающей силы; ω_1 – круговая частота вращения дебалансов вибровозбудителя; t – время.

Усилия в двухсторонних связях вычисляются по формулам:

$$P_1 = c_1 x_1 + b_1 \dot{x}_1,$$

$$P_2 = c_2 (x_2 - x_1) + b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1),$$

$$P_3 = c_3 (x_1 - x_3) + d_3 |x_1 - x_3|^{p_3} \text{sign}(x_1 - x_3) + b_3 (\dot{x}_1 - \dot{x}_3),$$

где c_i – жесткость i -й двухсторонней связи; b_i – коэффициент демпфирования i -й двухсторонней связи; d_3 – коэффициент нелинейной двухсторонней упругой связи между ситом и коробом; p_3 – показатель нелинейности двухсторонней упругой связи между ситом и коробом;

$$\text{sign}(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \geq 0 \\ -1, & \delta < 0 \end{cases}$$

где δ – деформация связи.

Усилия в односторонних связях вычисляются по формулам:

$$P_{01} = (c_{01}\delta_1 + d_{01}|\delta_1|^{p_{01}} \text{sign}(\delta_1) + b_{01}\dot{\delta}_1)H(-\delta_1),$$

$$P_{02} = (c_{02}\delta_2 + d_{02}|\delta_2|^{p_{02}} \text{sign}(\delta_2) + b_{02}\dot{\delta}_2)H(-\delta_2),$$

$$P_{03} = (c_{03}\delta_3 + d_{03}|\delta_3|^{p_{03}} \text{sign}(\delta_3) + b_{03}\dot{\delta}_3)H(-\delta_3),$$

где c_{0j} – жесткость j -й односторонней связи; δ_j – текущий зазор (натяг) в j -й односторонней связи; b_{0j} – коэффициент демпфирования j -й односторонней связи; d_{0j} – коэффициент нелинейной j -й односторонней связи; p_{0j} – показатель нелинейности j -й односторонней связи; $H(-\delta_j)$ – функция Хевисайда, которая определяется следующим образом [4]

$$H(-\delta_j) = \begin{cases} 1, & \delta_j > 0 \\ 0, & \delta_j \leq 0 \end{cases}$$

Текущие зазоры (натяги) в односторонних связях:

$$\delta_1(t) = x_2(t) - x_1(t) + \delta_{01},$$

$$\delta_2(t) = x_1(t) - x_2(t) + \delta_{02},$$

$$\delta_3(t) = x_3(t) - x_2(t) + \delta_{03},$$

где δ_{0j} – зазор (натяг) в j -й односторонней связи в состоянии покоя.

Систему дифференциальных уравнений (1)–(3) необходимо дополнить начальными условиями. Если в начальный момент времени $t = 0$ рассматриваемая динамическая система находилась в состоянии покоя, то начальные условия имеют вид:

$$x_1(0) = 0, \quad \dot{x}_1(0) = 0, \quad (4)$$

$$x_2(0) = 0, \quad \dot{x}_2(0) = 0, \quad (5)$$

$$x_3(0) = 0, \quad \dot{x}_3(0) = 0. \quad (6)$$

Получить аналитическое решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (1)–(6) вследствие их существенной нелинейности весьма затруднительно. Поэтому для её решения был использован алгоритм численного интегрирования. Вычислительный алгоритм интегрирования по времени уравнений движения (1)–(3) базируется на использовании трехслойных разностных схем с весами [5].

Для идентификации и исследования характеристик колебаний динамической системы использовался метод вычислительного эксперимента. На первом этапе вычислительного эксперимента производится численное интегрирование уравнений движения (1–3). В результате вычисляются временные ряды перемещений $\{X^n\}$ масс системы.

На втором этапе производится исследование полученных временных рядов с использованием:

- автокорреляционных функций для определения периода вынужденных колебаний;
- спектрального анализа перемещений, скоростей и ускорений;
- фазовых диаграмм в переменных „перемещение-скорость“;
- зависимостей амплитуд перемещений, скоростей и ускорений от изменения параметров рассматриваемой динамической системы, получаемых методом продолжения по параметру.

При выполнении исследований возникает задача определения периодов колебаний системы, которые определялись на основе анализа периодичности полученных временных рядов $\{X^n\}$. Для этого используется аппарат автокорреляционной функции, которая служит мерой степени сходства временного ряда $\{X^n\}$ с самим собой в прошлом. Если временной ряд периодичен, то его автокорреляционная функция также обладает периодичностью. При этом вычисление автокорреляционной функции для временного ряда $\{X^n\}$ позволяет не только установить, является ли он периодическим, но и определить его период.

Результаты численного интегрирования динамической системы поличастотного грохота исследовались методами спектрального анализа, путем разложения полученных движений масс в ряды Фурье и представления их в виде совокупности простых гармонических движений [6]. Методика спектрального анализа основана на предположении, что движения масс системы являются периодическими. Если в рассматриваемой динамической системе возникает детерминированный хаос, то автокорреляционная функция временного ряда перемещений $\{X^n\}$ должна иметь конечный носитель, т. е. обращаться в нуль вне конечного интервала времени.

Для идентификации режимов детерминированного хаоса использовались методы, предложенные в [1, 2],

Таблиця 1

Параметры поличастотного грохота

Параметр	Ед. изм.	Значение
Масса короба грохота, m_1	кг	518,8
Масса ударника, m_2	"-	120,0
Масса сита с присоединенной массой материала, m_3	"-	50,0
Жесткость опорных упругих связей, c_1	Н/м	140000
Жесткость упругих связей ударника, c_2	"-	1787500
Поперечная жесткость сита, c_3	"-	124000
Жесткость упругих ограничителей, c_{01}, c_{02}	Н/м	17000000
Жесткость упругой футеровки ударника, c_{03}	"-	20000000
Зазоры между ударником и ограничителями, δ_{01}, δ_{02}	м	0,004
Зазор между ударниками и ситом, δ_{03}	"-	0
Амплитуда вынуждающей силы, q_1	Н	11800

которые предполагают анализ фазовых диаграмм в переменных „перемещение-скорость“ и определение сечений и отображений Пуанкаре. Движения масс системы вследствие её диссипативности разделялись на два класса – переходные, нестационарные движения, соответствующие процессу релаксации от начального к предельному множеству состояний, и класс установившихся, стационарных движений, фазовые траектории которых целиком принадлежат предельным множествам [1, 7]. Важными с физической точки зрения являются притягивающие предельные множества – аттракторы. С течением времени произвольное начальное состояние из некоторой области притяжения G , включающей в себя аттрактор G_0 , релаксирует к G_0 . Движение, которому отвечает фазовая траектория в области притяжения, есть переходной процесс. Установившееся движение характеризуется принадлежностью фазовых траекторий инвариантному предельному множеству, т. е. аттрактору G_0 .

При исследовании зависимостей амплитуд перемещений, скоростей и ускорений масс рассматриваемой системы от изменения её параметров использовался метод продолжения по параметру при пошаговом изменении параметров системы [8]. В качестве начального приближения выбирается решение, полученное на предыдущем шаге.

При выполнении расчётов параметры системы изменялись с постоянным шагом от начального до конечного значений, заданных в исходных данных, а затем в обратном направлении – от конечного значения до начального. Такой подход позволил получить, в частности, полные амплитудно-частотные зависимости для динамической системы с учётом наличия неустойчивых ветвей.

Разработанная математическая модель поличастотного грохота и вычислительный алгоритм для её численного исследования реализованы в виде компьютерной программы для персональных ЭВМ на алгоритмическом языке FORTRAN.

Исследования математической модели проводилось при изменении базовых параметров поличастотного грохота, значения которых приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики ускорений колебаний масс грохота при изменении частоты внешнего возбуждения в диапазоне 20–200 рад/с. На графиках сплошные линии соответствуют значениям ускорений при возрастании частоты, пунктирные – при её уменьшении.

Анализ зависимостей показывает, что ускорения сита с присоединенной массой материала значительно превышают ускорения ударника и короба грохота, достигая значений, которые существенно больше уровня ускорений сит промышленных вибрационных грохотов, применяемых для разделения сыпучих материалов. При этом уровень ускорений короба грохота на всем диапазоне изменения частоты не превышает $15,3 \text{ м/с}^2$, что значительно меньше уровня рабочих ускорений промышленных грохотов.

Максимальные ускорения сита возбуждаются при частоте колебаний 99 рад/с, достигая значений более 2180 м/с^2 , а максимальные ускорения ударника – в диапазоне частот 144–167 рад/с, достигая значений более 200 м/с^2 . В диапазоне частот 158–167 рад/с наблюдаются гистерезисные явления в колебаниях ударника и сита.

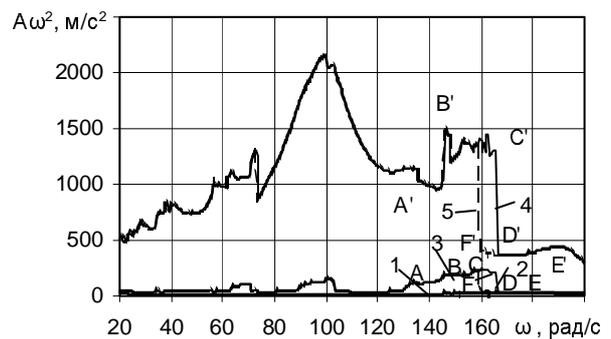


Рис. 2. Зависимость амплитуд ускорений короба, ударника и сита от частоты внешнего возбуждения: 1 – для короба; 2 и 3 – для ударника; 4 и 5 – для решета

При увеличении частоты внешнего возбуждения в диапазоне частот 144–167 рад/с, амплитуда ускорений колебаний ударника возрастает по кривой ABC.

В точке С происходит срыв амплитуды – значение амплитуды скачком переходит в точку D и при дальнейшем увеличении частоты возбуждения изменяется по кривой DE. Если начать уменьшать частоту, то амплитуда ускорений колебаний будет изменяться по кривой EDF. В точке F значение амплитуды перейдет к значению, соответствующему точке В, и дальше амплитуда будет изменяться по верхней ветви кривой ВА. Такой же характер изменения амплитуды ускорений характерен и для сита, только здесь дополнительно наблюдаются локальные изменения амплитуды ускорений колебаний на кривой А'В'С'.

Изменение характера колебаний в диапазоне частот внешнего возбуждения 144–167 рад/с и наличие гистерезиса характерно для резонансных колебаний систем [1, 3]. Следовательно, в этом диапазоне изменения частоты, ударник и сито поличастотного грохота совершают резонансные колебания.

На рис. 3 приведены частотные спектры ускорений периодических колебаний сита при различных частотах внешнего возбуждения. Колебания представлены как совокупность гармонических колебаний на различных частотах, причем каждой частоте соответствует колебание со своей амплитудой и начальной фазой. Анализ спектров показывает, что под действием моночастотного возбуждения короба

сито грохота совершает поличастотные колебания, в которых кроме гармоники на частоте внешнего возбуждения ω_1 , в зависимости от динамических параметров грохота, возбуждаются гармоники субгармонических и супергармонических колебаний. Так как колебания периодические, то они имеют дискретный или линейчатый спектр, состоящий из отдельных линий, соответствующих амплитудам возбуждаемых гармоник.

На частоте 72 рад/с, кроме гармоники на частоте внешнего возбуждения ω_1 , возбуждаются одна гармоника субгармонических колебаний и конечный ряд гармоник супергармонических колебаний с угловыми частотами $p\omega_1/2$, где p – целое число. Максимальная амплитуда ускорений принадлежит гармонике на частоте внешнего возбуждения. Такой же спектр возбуждается и на частоте 170 рад/с, только при максимальной амплитуде на частоте гармоники субгармонических колебаний.

Частотный спектр при максимальных ускорениях сита на частоте 99 рад/с состоит из конечного ряда гармоник супергармонических колебаний с угловыми частотами $p\omega_1$. Максимальная амплитуда возбуждается на частоте внешнего возбуждения ω_1 .

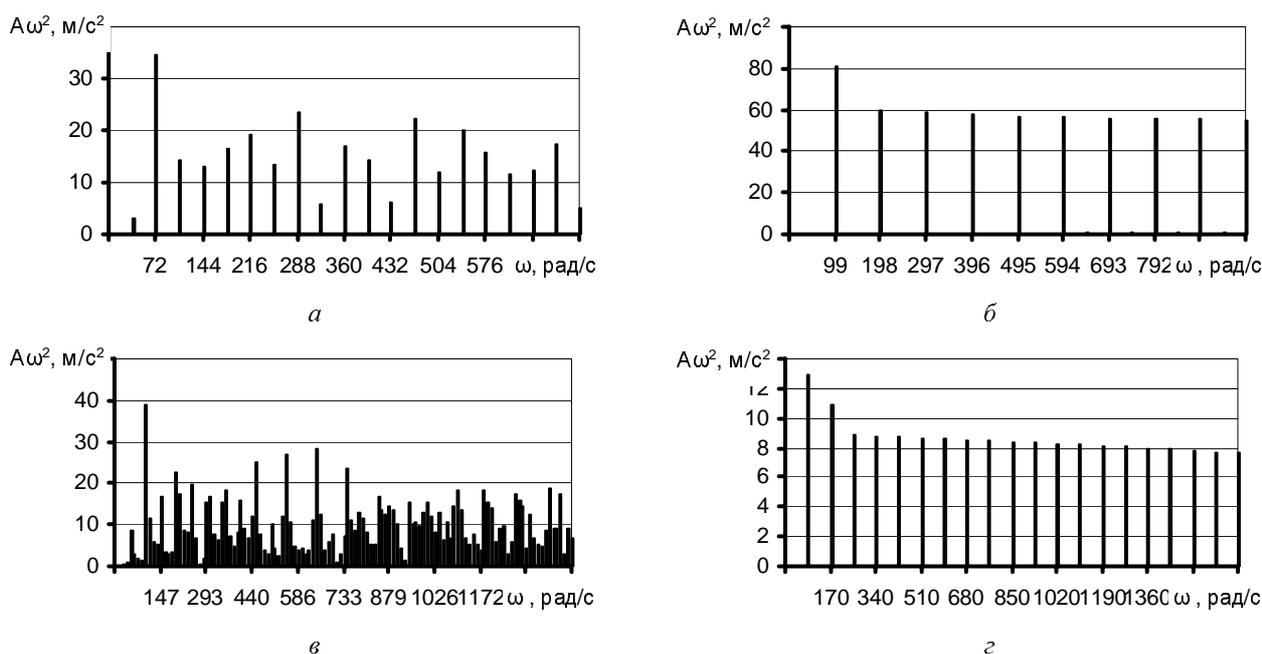


Рис. 3. Частотные спектры колебаний сита при различных частотах внешнего возбуждения: а – 72 рад/с; б – 99 рад/с; в – 146,53 рад/с; г – 170 рад/с

Частотный спектр на частоте 146,53 рад/с, которая находится в области резонансных колебаний сита и ударника, существенно расширяется, а спектральная плотность увеличивается. В колебаниях возбуждается ряд гармоник субгармонических и супергармонических колебаний с угловыми частотами $p\omega_1/q$, где q – целое

число. Таким образом, в области резонансных колебаний ударника и сита, на сите возбуждаются сложные комбинационные колебания с максимальной амплитудой на частоте гармоники субгармонических колебаний. Амплитуды некоторых гармоник значительно превышают амплитуду гармоники на частоте внешнего возбуждения.

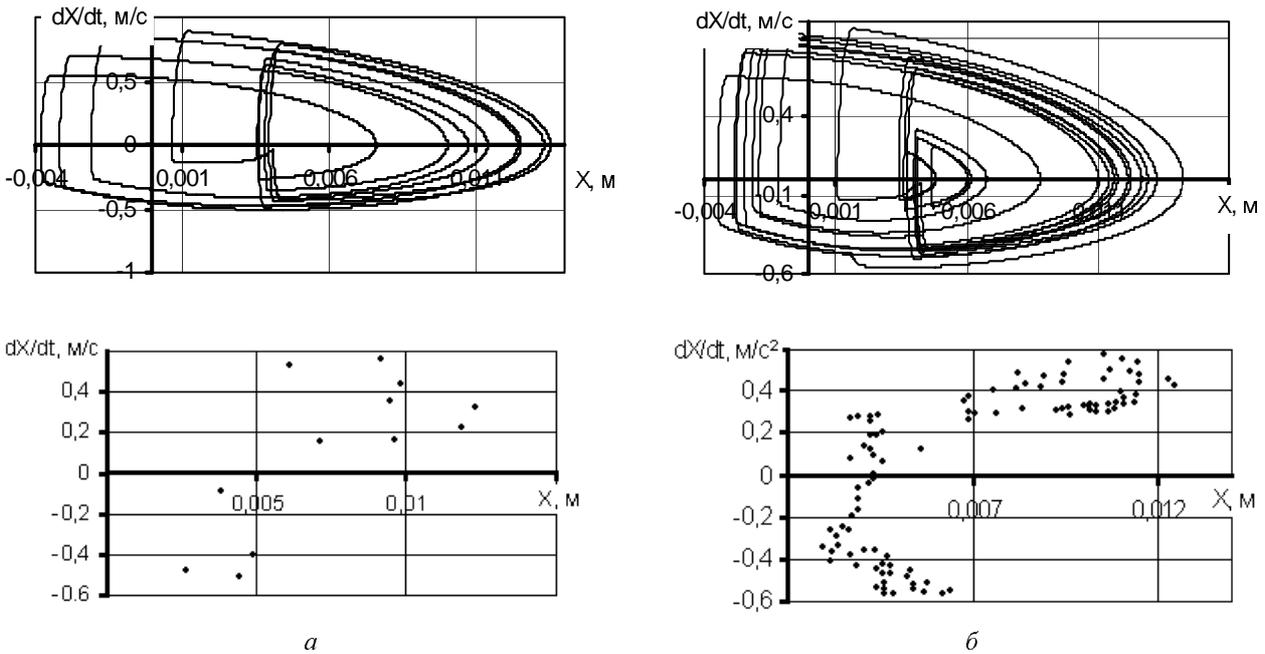


Рис. 4. Фазовая диаграмма сита и сечение Пуанкаре при частоте колебаний а – 146,53 рад/с, б – 160 рад/с

На рис. 4 приведены фазовые диаграммы колебаний сита и сечения Пуанкаре при различных частотах внешнего возбуждения. Фазовые траектории построены для 50, а отображения Пуанкаре для 100 периодов установившихся режимов вынужденных колебаний динамической системы.

Фазовые траектории сита при 100 периодах вынужденных колебаний системы на частоте 146,53 рад/с, отображаются 12-ю точками в сечении Пуанкаре, а на частоте 160 рад/с – 100 точками. Следовательно, при частоте 146,53 рад/с фазовая траектория замыкается через 12 периодов внешнего возбуждения и сито грохота совершает периодические колебания с периодом $T = sT_1$, где $s=12$ – число периодов внешнего возбуждения; T_1 – период внешнего возбуждения.

Фазовые траектории сита при частоте 160 рад/с (рис. 4, б) представлены в виде бесконечной линии, которая нигде не пересекается, не покидает при $t \rightarrow \infty$ замкнутой области и не притягивается к регулярным аттракторам. Изображающая точка в сечении Пуанкаре время от времени возвращается в окрестности произвольно выбранного на траектории начального состояния, однако эти возвращения непредсказуемы и имеют вид случайной последовательности. Такие признаки характерны для колебаний системы в режиме детерминированного хаоса, а аттракторы таких колебаний называются странными [1]. Переход к детерминированному хаосу происходит через каскад (бесконечную последовательность) бифуркаций. На рис. 5 приведен частотный спектр ускорений сита на отрезке времени движения, равном $(800-1000)T_1$, при колебаниях системы в режиме детерминированного хаоса на частоте внешнего возбуждения 160 рад/с.

Колебания представлены сплошным бесконечным частотным спектром. Анализ показывает, что в изменении амплитуд возбуждаемых гармоник отсутствует

какая-либо закономерность. Амплитуды некоторых гармоник значительно превышают амплитуду гармоники на частоте внешнего возбуждения.

Проведенный анализ показывает, что в области резонансных колебаний системы ударник-сито в режиме детерминированного хаоса на сите возбуждаются неперiodические колебания со сплошным частотным спектром.

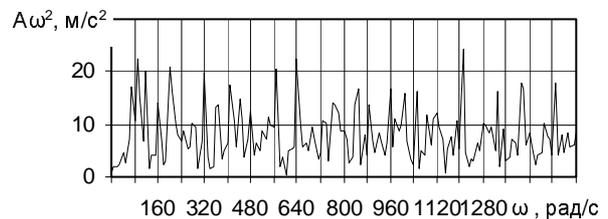


Рис. 5. Частотный спектр ускорений колебаний сита в режиме детерминированного хаоса на частоте 160 рад/с

При периодических колебаниях с периодом $T = sT_1$ (рис. 3 и 4, а), в результате бифуркаций на сите возбуждаются субгармонические и супергармонические колебания с угловыми частотами $p\omega_1/q$ и числом субгармонических гармоник $N = s - 1$. При $N = 0$ бифуркации отсутствуют и на сите грохота возбуждаются супергармонические колебания с угловыми частотами $p\omega_1$. При $N = 1, 2, 3, \dots$ за период колебаний сита происходит одна, две и т. д. бифуркаций. При неперiodических колебаниях в результате бесконечной последовательности бифуркаций сито возбуждается в режиме детерминированного хаоса, со сплошным бесконечным частотным спектром. С практической точки зрения, начиная с некоторого достаточно плотного спектра, различие между дискретным

и сплошным спектром становится несущественным. Следовательно, для эффективного разделения тонкодисперсных материалов следует обеспечить работу поличастотного грохота в режиме резонансных колебаний в системе „ударник-сито-сыпучий материал“.

Поличастотные резонансные колебания в системе „ударник-сито-сыпучий материал“ обладают абсолютной устойчивостью к изменению динамических параметров грохота, поскольку в системе возникает эффект самовозбуждающихся резонансных колебаний. Самовозбуждение таких колебаний происходит тогда, когда одна или несколько комбинационных частот возбуждаемых гармоник становится близкой к одной или нескольким собственным частотам системы „ударник-сито-сыпучий материал“. При этом соответствующие гармоники могут оказать значительное влияние на характер колебаний системы, даже если возмущения на этих частотах незначительны. Чем меньше возмущение, тем меньше должна быть отстройка между собственной и возбуждаемой частотами для того, чтобы это влияние было заметно. Таким образом, в колебаниях системы ударник-сито-сыпучий материал резонансы возникают не только при близости одной из собственных частот системы к частоте внешнего воздействия, но и в случае, когда одна из собственных частот близка к одной из возбуждаемых комбинационных частот. Следовательно, динамическая система „ударник-сито-сыпучий материал“ поличастотного грохота может испытывать множество резонансов, соответственно числу возбуждаемых гармоник, кратных собственным частотам её колебаний как на частотах субгармонических, так и супергармонических колебаний. Т.е. в системе одновременно могут существовать резонансы как порядка ω_1/q (субгармонические), так и порядка $p\omega_1/q$ (супергармонические).

При периодических колебаниях резонансные явления будут происходить при условии совпадения диапазонов собственных частот с частотами возбуждаемых гармоник и при соответствующих их спектральной плотности и уровне возмущений на гармониках с совпавшими частотами. При этом резонансные колебания системы „ударник-сито-сыпучий материал“ устойчивы в том диапазоне изменения динамических параметров грохота, собственные частоты которых находятся в частотном спектре возбуждаемых гармоник колебаний. Количество совпадений частот увеличивается при расширении частотного спектра, его спектральной плотности и амплитуд возбуждаемых гармоник. Максимальное количество резонансов, равное количеству собственных частот системы „ударник-сито-сыпучий материал“, возникает при возбуждении сплошного бесконечного частотного спектра, т. е. при колебаниях в режиме детерминированного хаоса. При таких колебаниях изменение собственных частот системы вследствие изменения массы сыпучего материала на сите, частоты внешнего возбуждения, характеристик упругих элементов и т. д. не приведёт к выходу системы из резонансов, поскольку благодаря сплошному спектру возбуждения

собственные частоты всегда будут совпадать с возбуждаемыми. Амплитуды возбуждаемых гармоник с частотами близкими к собственным частотам системы могут значительно превышать амплитуду гармоники на частоте внешнего воздействия. Благодаря этому на сите поличастотного грохота и в сыпучем материале возбуждаются ускорения, на порядки превышающие уровни ускорений, реализуемых на вибрационных грохотах с моночастотным возбуждением просеивающих поверхностей. Таким образом в динамической системе „ударник-сито-сыпучий материал“ поличастотного грохота возникает эффект самовозбуждающихся резонансных колебаний, что позволяет обеспечить практически абсолютную технологическую устойчивость поличастотного грохота к изменению технологической нагрузки. Резонансное усиление колебаний сита с сыпучим материалом способствует повышению эффективности разделения по крупности и интенсификации сопутствующих процессов, например, обезвоживания материала на сите поличастотного грохота.

Условия генерации субгармонических и супергармонических колебаний в динамической системе поличастотного грохота в основном зависят от параметров ударных взаимодействий в его односторонних упругих связях. При должном выборе этих параметров в системе реализуются субгармонические и супергармонические режимы колебания. Возникновение субгармонических колебаний [9, 10] в значительной мере зависит от симметрии или несимметрии упругих характеристик системы. Поэтому субгармонические колебания на сите поличастотного грохота в основном реализуются при взаимодействиях ударника с ситом (при симметричном расположении односторонних упругих связей) и определяются параметрами этого взаимодействия. Ввод несимметрии в систему за счет такого взаимодействия приводит к бифуркациям, в результате которых возбуждаются субгармонические и супергармонические колебания на частотах кратных частотам субгармонических колебаний. Супергармонические колебания на частотах кратных частоте вынужденных колебаний возбуждаются благодаря взаимодействиям ударника с односторонними упругими связями и в основном зависят от параметров этого взаимодействия.

Ускорения колебаний сита и сыпучего материала на сите поличастотного грохота отличаются значительной интенсивностью, на порядки превышающей уровни ускорений просеивающих поверхностей промышленных вибрационных грохотов. Причем такие ускорения возбуждаются только на сите и в слое сыпучего материала, а короб грохота и дебалансный вибровозбудитель осуществляют колебания с интенсивностью значительно меньшей, чем в промышленных грохотах. Благодаря этому обеспечивается более надёжная работа грохота, снижаются потери мощности в подшипниках дебалансов и шум вибровозбудителя, повышается безопасность его работы и передаются минимальные нагрузки на основание.

Технологическое преимущество генерирования широкополосных вибраций с ускорений, на порядки превышающих ускорения просеивающих поверхно-

стей грохотов с моночастотным возбуждением, заключается в воздействии таких колебаний на сыпучий материал, который при этом приобретает новые качества, способствующие повышению эффективности разделения и обезвоживания. Резонансное поличастотных колебаний в системе „ударник-сито-сыпучий материал“, усиливают колебания сита, передаются в слой материала на сите, и за счет широкого, а при детерминированном хаосе сплошном спектра возбуждаемых частот, обеспечивают резонансные явления в колебаниях сита и материала. Это способствует разрушению установившихся связей между частицами и ситом, высвобождению застрявших частиц из ячеек сита и интенсивной сегрегации частиц, что повышает эффективность разделения. Такой характер воздействия обеспечивает абсолютные преимущества поличастотных грохотов над типовыми промышленными вибрационными грохотами, при классификации любых сыпучих материалов, даже таких, которые невозможно было эффективно разделять по крупности на ситовых поверхностях вибрационных грохотах (с повышенной влажностью, тонкие фракции, с глинистыми включениями и т. д.).

Выводы:

– возбуждение колебаний сит со сплошным частотным спектром для вибрационного разделения сыпучих тонкодисперсных материалов, вследствие резонансного усиления относительных колебаний частиц, находящихся под воздействием восстанавливающих сил, способствует разрушению установившихся связей между частицами, частицами и поверхностью сита, высвобождению частиц, застрявших в ячейках сита, увеличению интенсивности их перемещения в слое материала и интенсификации сегрегационных процессов, что в свою очередь способствует повышению эффективности разделения, особенно сыпучих материалов с повышенной влажностью и с липкими, глинистыми примесями, которые невозможно эффективно разделять на ситах при моночастотном или узком и дискретном поличастотном спектрах возбуждения;

– возбуждение колебаний сит со сплошным частотным спектром возможно при колебаниях сита в режиме детерминированного хаоса, который возбуждается в нелинейной динамической системе при близости частот возбуждаемых колебаний к собственным частотам системы и множественных её резонансах;

– резонансные колебания динамической системы поличастотного грохота в режиме детерминированного хаоса обладают абсолютной устойчивостью к изменению массы сыпучего материала на сите и её динамических параметров, поскольку изменение собственных частот системы при возбуждении сплошного частотного спектра колебаний не приводит к выходу системы из режима резонансных колебаний.

Список литературы

1. Краснополянская Т.С. Регулярная и хаотическая динамика систем с ограниченным возбуждением / Т.С. Краснополянская, А.Ю. Швеца. – Ижевск: НИЦ

Регулярная и хаотическая динамика, Ин-т компьютерных исследований, 2008. – 280 с.

2. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Мир, 1991. – 368 с.

3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1979. – Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. – 1979. – 351 с.

4. Владимиров В.С. Уравнения математической физики / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1988. – 512 с.

5. Самарский А.А. Аддитивные схемы для задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Наука, 2001. – 319 с.

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

7. Быховский, И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1969. – 362 с.

8. Шалашилин В.И. Метод продолжения по параметру и наилучшая параметризация (в прикладной математике и механике) / В.И. Шалашилин, Е.Б. Кузнецов. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 224 с.

9. Бересневич В.И. Особенности колебаний нелинейной системы, обусловленные несимметрией упругой характеристик / В.И. Бересневич, С.Л. Цыфанский // Прикл. механика. – 1983. – Т.19, №4. – С. 79–85.

10. Закржевский М.В. Четные субгармонические колебания в симметричной системе с одной степенью свободы / М.В. Закржевский, Р.И. Королева // Изв. АН СССР. МТТ. – 1976. – №3. – С. 40–45.

Розглянуто вплив полічастотних коливань ситових поверхонь вібраційних грохотів з суцільним частотним спектром на ефективність розділення тонкодисперсних сипких матеріалів. Розроблена математична модель полічастотного вібраційного грохота, досліджені режими збудження ситових поверхонь. Визначені умови полічастотного збудження ситових поверхонь з суцільним частотним спектром. Обґрунтована стійкість полічастотних коливань до зміни технологічного навантаження та динамічних параметрів грохоту.

Ключові слова: полічастотні коливання, розділення, сипкі матеріали, модель, грохот

Influence of polyfrequency oscillations of screen surfaces of vibrating screens with solid frequency spectrum on efficiency of separation finedispersed bulk materials has been reviewed. Mathematical model of a polyfrequency vibrating screen has been designed, modes of excitation of screen surfaces have been studied. Conditions of polyfrequency excitation of screen surfaces with solid frequency spectrum have been determined. Stability of polyfrequency oscillations against changes of technological load and dynamic parameters of screen has been substantiated.

Keywords: polyfrequency oscillations, separation, bulk materials, model, screen

Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюссом 04.03.10