

На правах рукописи

Кудрявцева Ирина Михайловна

**ЭНЕРГОСКОРОСТНЫЕ АЛГОРИТМЫ КРАТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ
РОТОРОВ МНОГОМАССОВОЙ УПРУГОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ВИБРОУСТАНОВКИ**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Институте Машиностроения (ПИМаш)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Томчина Ольга Петровна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Поляхов Николай Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент

Кучмин Андрей Юрьевич

Ведущее предприятие: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО)

Защита состоится «___» _____ 2010 г. в ____ ч. _____ мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при ИПМаш РАН по адресу:
199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д.61, ИПМаш РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук

В.В. Дубаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Одной из важнейших задач, возникающих как при создании нового, так и при модернизации существующего оборудования, является задача повышения его производительности. При разработке виброустановок, осуществляющих грохочение, дробление, вибротранспортирование сыпучих материалов, повышение производительности в значительной мере связано с решением задачи обеспечения стабильного синхронного режима вращения вибровозбудителей. Традиционный подход базируется на эффекте самосинхронизации, открытом и изученном И.И. Блехманом, где с единой точки зрения рассмотрены различные аспекты теории синхронизации.

Дополнительные технологические возможности использования виброустановок предоставляет режим кратной синхронизации. Кратный синхронный режим, вносящий асимметрию в систему, способствует возникновению и усилению эффекта вибрационного перемещения, особенно для таких трудноосуществимых технологических процессов как транспортирование пылевидных, влажных и липких грузов. Причем синхронность обеспечивает максимальную скорость вибротранспортирования. Кроме того наличие двух различных частот вращения роторов позволяет транспортно-технологическим машинам осуществлять одновременно вибротранспортирование, возбуждаемое низкой частотой и просеивание, раздел сыпучих материалов, осуществляемое за счет большей двукратной частоты. Но, при рассмотрении задач кратной синхронизации, когда одни вибровозбудитель вращается со средней угловой скоростью кратной угловой скорости другого, стабильная синхронизация может и не иметь место. Условие на соотношение масс и на взаимное расположение роторов и несущей платформы, обеспечивающее кратную самосинхронизацию, были получены в работах И.И. Блехмана, К. Рагульскаса, О.П. Барзукова и Н.П. Ярошевича.

Однако в ряде практически важных случаев эти условия не выполняются, и режим кратной синхронизации оказывается неустойчивым. В частности потеря стабильности кратного синхронного режима имеет место, например, при введении в систему дополнительных упруго присоединенных тел. Поэтому разработка новых подходов к решению задачи обеспечения стабильного кратного синхронного вращения вибровозбудителей является актуальной технической проблемой.

Представляет интерес исследование подхода, основанного на управляемой синхронизации. Существенные результаты по управлению синхронизацией колебательных механических систем были получены в работах Б.Р. Андриевского, А.Л. Фрадкова, Х. Наймайера, О.П. Томчиной, А.Ю. Погромского. В данной работе рассматривается подход, основанный на разработке специальных, «энергоскоростных» алгоритмов управления, синтезируемых из условия обеспечения стабильного кратного синхронного режима. При этом необходимо учитывать влияние динамики просеиваемого материала, которое учтено введением дополнительного груза, присоединенного с помощью упругой связи. Отдельным вопросом, связанным с реализацией алгоритмов управления в замкнутых системах является вопрос влияния на стабильность синхронного режима динамики привода и наличие измерительных датчиков.

Цель и задачи исследования. Исходя из сказанного, целью работы является разработка алгоритмов управления электромеханическими системами вибрационных установок с кратной синхронизацией роторов с учетом нестационарности нагрузки и упругости карданных валов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Постановка задачи управления кратной частотной и кратной координатной синхронизацией для механических систем с несколькими степенями свободы.
- Разработка алгоритмов управления кратной синхронизацией для случая, когда несущее тело совершает плоские движения.
- Реализация алгоритмов управления кратной синхронизацией по полной механической энергии и редуцированной энергии с учетом неполноты измерений.
- Исследование эффективности разработанных алгоритмов кратной синхронизации для различных моделей объектов управления в условиях неполноты измерений с учетом упругости карданных валов.
- Разработка структуры замкнутой цифровой системы управления виброустановкой на примере двухроторной вибрационной установки СВ-2.

Методы исследования. В работе использованы методы теоретической механики, линейной и нелинейной теории управления, методы математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна. В работе получены следующие новые научные положения, выносимые на защиту.

- Новые энергоскоростные алгоритмы управления кратной синхронизацией двухроторных вибрационных установок, синтезированные для различных упрощенных моделей динамики установки и различных упрощенных представлений полной механической энергии установки.
- Новые энергоскоростные алгоритмы управления кратной синхронизацией двухроторных вибрационных установок с нелинейными наблюдателями.
- Новая структура замкнутой цифровой системы управления двухроторной вибрационной установки, включающая нелинейные наблюдатели и подсистему управления кратной синхронизацией роторов.
- Методика выбора параметров энергоскоростных алгоритмов управления кратной синхронизацией.

Практическая значимость полученных результатов. Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании высокоэффективной вибрационной техники.

Разработанные алгоритмы позволяют:

- Повысить качество систем управления мехатронными виброустановками.
- Повысить робастность и надежность кратных синхронных режимов виброустановки.
- Реализовать стабильные синхронные режимы в случаях, когда без управления они являются неустойчивыми.
- Управлять формой установившихся движений несущего тела (платформы) путем выбора параметров алгоритма управления без установки дополнительных вибровозбудителей и изменения их расположения на платформе.

Реализация результатов. Алгоритмы управления кратной синхронизацией использованы при проведении НИР по проекту РФФИ 08-05-00775 в ИПМаш РАН.

Методика выбора параметров алгоритмов синхронизации использована в учебном процессе ИПМаш для студентов специальности 2203.01.

Апробация работы. Апробация работы производилась на конференциях: Physcon 2005, УИТ-2006 (4-я Всероссийская научная конференция «Управление и информационные технологии»), 36-я Неделя науки СПбГПУ, мультikonференция ИКТМР-2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных трудов, в том числе статья в журнале из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 43 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 149 машинописных страницах и содержит 68 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе, на основании анализа работ, посвященных проблеме кратной синхронизации вибровозбудителей двухроторных вибрационных установок, дается формализованная постановка задачи управления кратной синхронизацией.

Представим динамическую модель вибрационной системы, в которой вибровозбудители связаны через общее несущее тело в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = F_i(x_i, t) + \tilde{F}_i(x_0, x_1, \dots, x_k, t); \\ \frac{dx_0}{dt} = F_0(x_0, x_1, \dots, x_k, t), \end{cases} \quad (1)$$

где x_i $i=1, \dots, k$ и x_0 – векторы состояния i -го вибровозбудителя и связующей системы тел соответственно; функции $F_0, F_i, i=1, \dots, k$ описывают динамику связующей системы тел и вибровозбудителей, а \tilde{F}_i – описывают взаимосвязи систем.

В соответствии с определением И.И.Блехмана процессы $x_1(t), \dots, x_k(t)$ называют синхронизированными по отношению к функционалам g_1, \dots, g_l , если тождества

$$g_j(y_1(\cdot), \dots, y_k(\cdot), t) \equiv 0; \quad j = 1, \dots, l \quad (2)$$

верны для $t \in [t_0, \infty)$, где $y_i(\cdot)$ – функции выходов вибровозбудителей $y_i(t) = h(x_i(t), t)$, $t \in [t_0, \infty)$, $i=1, \dots, k$. Если вместо тождеств (2) имеют место неравенства

$$|g_j(y_1(\cdot), \dots, y_k(\cdot), t)| \leq \varepsilon, \quad j = 1, \dots, l, \quad (3)$$

где $\varepsilon > 0$ – некоторое положительное число, то говорят, что вибровозбудители приближенно синхронизированы по отношению к функционалам g_1, \dots, g_l .

Под кратной частотной синхронизацией понимают движение системы, при котором скорости вибровозбудителей пропорциональны:

$$\omega_i = n_i \cdot \omega^* \quad (i = 1, \dots, k) \quad (4)$$

для некоторых целых n_i , где $\omega^* > 0$ – синхронная частота. Здесь функционалы:

$$g_{sr}(y_s(\cdot), y_r(\cdot)) = \frac{\omega_s}{n_s} - \frac{\omega_r}{n_r}. \quad (5)$$

На практике для случая кратной синхронизации скоростей (средних скоростей) вибровозбудителей имеет смысл рассматривать приближенную синхронизацию:

$$\left| \omega_s - \frac{n_s}{n_r} \cdot \omega_r \right| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

где $\varepsilon > 0$ - некоторое положительное число, характеризующее точность.

Аналогично под *кратной координатной синхронизацией* понимают движение системы, при котором фазы вибровозбудителей φ_i , $i=1, \dots, k$ удовлетворяют тождествам:

$$\frac{\varphi_s}{n_s} - \frac{\varphi_r}{n_r} = L_{sr}; \quad s, r = 1, \dots, k. \quad (7)$$

Если свойство синхронизации (кратной синхронизации) вибровозбудителей возникает в системе через некоторое время после начала ее функционирования, то говорят, что имеет место эффект самосинхронизации (кратной самосинхронизации). Условия кратной самосинхронизации были получены в работах Н.П.Ярошевича¹. В частности для устройства с двумя вибровозбудителями на мягко виброизолированном твердом теле массы M , совершающем поступательные колебания с одной степенью свободы, условие, при котором возможен эффект двукратной самосинхронизации имеет вид:

$$\left| L_1(\omega) - R_1(\omega) \right| = \left| 2[L_2(2\omega) - R_2(2\omega)] \right| < 2a, \quad (8)$$

$$a = m_1^2 \varepsilon_1^2 m_2 \varepsilon_2 g / I_1 M, \quad (9)$$

где: J_i , m_i , ε_i – соответственно момент инерции, масса и эксцентриситет i -го неуравновешенного ротора (вибровозбудителя), $i=1,2$; $L_i(\omega)$, $R_i(\omega)$ – соответственно вращающий момент i -го электродвигателя и момент сил сопротивления вращению, g - ускорение свободного падения.

Соответствующие расчеты по формулам (8), (9), проведенные для динамической модели (15) вибростенда с одной степенью свободы без учета груза ($c_1=0$, $m_r=0$), показали, что неравенства выполняются. Результаты моделирования системы (15) (с учетом потенциальной энергии несущего тела, которая не вносит качественных отличий в динамику системы) приведенные на рис.1,а) показывают, что приближенная двукратная самосинхронизация имеет место: для скоростей имеет место приближенное равенство $\dot{\varphi}_1 = 2\dot{\varphi}_2$ и приведенный сдвиг фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - 2\varphi_2$ приблизительно равен -3π . Однако в более сложных

¹ Ярошевич Н.П. К теории синхронизации механических вибровозбудителей, связанных с линейной колебательной системой. / Проблемы машиностроения и надежности машин, 2003, №4, с.3-10.

задачах кратная самосинхронизация может отсутствовать, а условия Ярошевича могут оказаться неприменимы. Например, при наличии упруго присоединенной к платформе

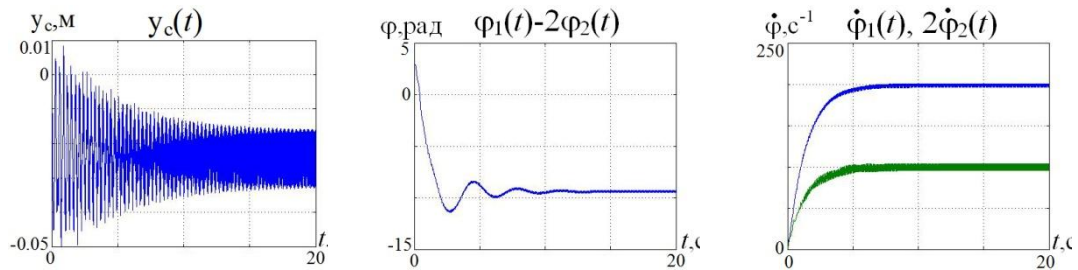


Рис. 1,а. Самосинхронизация в случае Ярошевича Н.П.

(несущему телу) дополнительной массы m_Γ (груза) двукратная самосинхронизация отсутствует, как частотная, так и координатная, см. Рис.1,б. При этом амплитуда колебаний платформы нарастает. Аналогично, отсутствие кратной координатной самосинхронизации наблюдается при учете упругости карданных валов, соединяющих двигатели с неуравновешенными роторами.

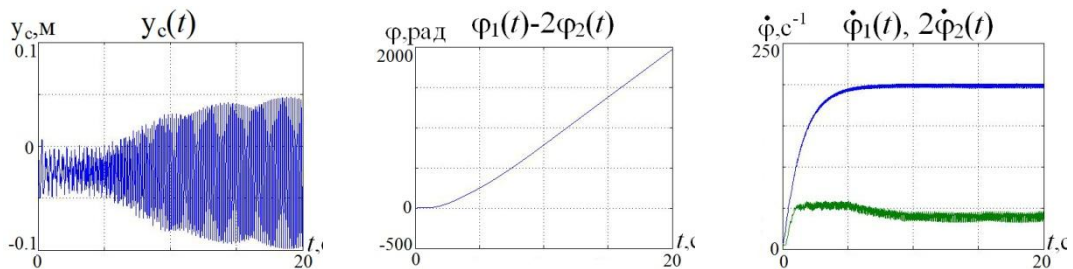


Рис.1,б. Динамика системы с грузом – кратная самосинхронизация отсутствует.

В случае отсутствия кратной самосинхронизации возникает задача управляемой синхронизации. В работе эта задача ставится в следующем виде. Пусть динамическая модель управляемой вибрационной системы имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = F_i(x_i, u_i, t) + \tilde{F}_i(x_0, x_1, \dots, x_k, t); \\ \frac{dx_0}{dt} = F_0(x_0, x_1, \dots, x_k, t), \end{cases} \quad (10)$$

где u_i – дополнительное управляющее воздействие, приложенное к i -му вибровозбудителю. Задача управления кратной синхронизацией по отношению к функционалам g_j , $j=1, \dots, l$, состоит в нахождении управлений u_i как функций обратной связи по состояниям x_0, x_1, \dots, x_k и, возможно, времени так, что условие (2) выполнено для замкнутой системы. Аналогично ставится задача управления приближенной кратной синхронизацией и, в частных случаях – управления кратной частотной и координатной синхронизацией.

Во второй главе представлены математические модели двухроторного вибрационного стенда СВ-2 с упруго присоединенным грузом, моделирующим динамику сыпучих материалов. Расчетная схема двухроторного вибрационного стенда СВ-2 с упруго присоединенным грузом, совершающего движение в вертикальной плоскости Oxy , изображена на рис 2.

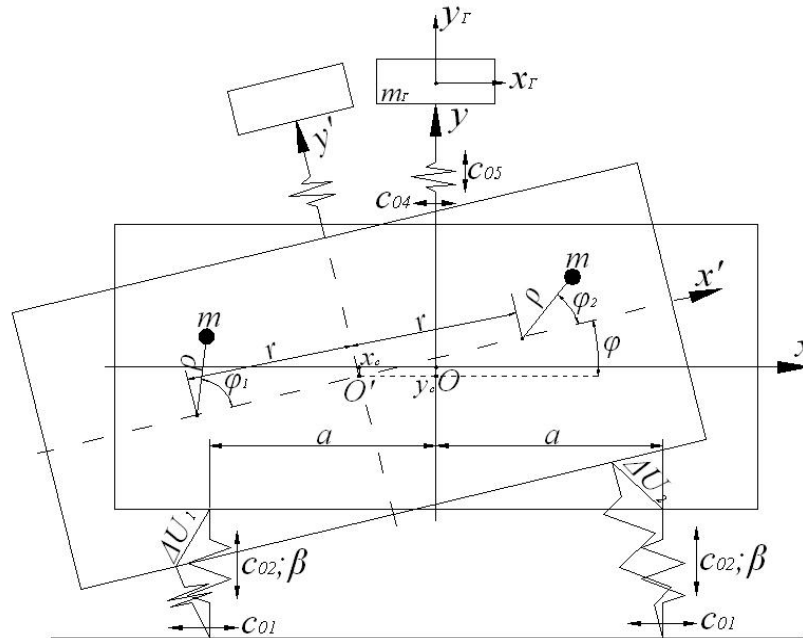


Рис. 2. Расчетная схема двухроторного вибрационного стенда

Система координат, связанная с платформой, обозначена $O'x'y'$. Координаты центра платформы – точки O' – обозначены $\{x_c, y_c\}$. Роторы расположены симметрично на оси абсцисс Ox' на расстоянии r от центра O' . Платформа укреплена на упругих опорах – пружинах. Абсциссы крепления пружины $X_{\text{пр}} = \pm a$. Угол поворота платформы обозначен φ . Масса груза предполагается переменной $m_r(t)$, координаты центра масс груза в неподвижной системе координат $\{x_r, y_r\}$, угол поворота груза в плоскости Oxy не учитывается, φ_1, φ_2 - углы вращения неуравновешенных роторов вибровозбудителей, измеряемые от оси Ox' против часовой стрелки; $m, m_{\text{пл}}$ - массы роторов и платформы; J_1, J_2, J - моменты инерции роторов и платформы; ρ - эксцентриситет роторов; $c_{01}, c_{02}, c_{04}, c_{05}$ – продольные и поперечные жесткости пружин, g - ускорение свободного падения; k_c - коэффициент вязкого трения в подшипниках вибровозбудителей.

Выражения для кинетической T и потенциальной энергии Π следующие:

$$T = \frac{1}{2} m_0 \dot{x}_c^2 + \frac{1}{2} m_0 \dot{y}_c^2 + \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 \left[J_1 + J_2 - 2mr\rho(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) \right] + \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{x}_c \dot{\varphi} + m\rho \cos(\varphi + \varphi_1) \dot{y}_c \dot{\varphi} - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1) \dot{y}_c \dot{\varphi} - m\rho \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{x}_c \dot{\varphi}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \dot{x}_c \dot{\varphi}_1 + m\rho \cos(\varphi + \varphi_1) \dot{y}_c \dot{\varphi}_1 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{x}_c \dot{\varphi}_2 + m\rho \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{y}_c \dot{\varphi}_2 + \\ & + \dot{\varphi}_1 \sqrt{J_1} - m\rho r \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2 \sqrt{J_2} + m\rho r \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} m_\Gamma (\dot{x}_\Gamma^2 + \dot{y}_\Gamma^2). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Pi = & \varphi_{nl} + 2m \bar{g} y_c + m\rho g \left[\sin(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] + c_{01} (x_c^2 + a^2 \cos^2 \varphi) + \\ & + c_{02} (y_c^2 + a^2 \sin^2 \varphi) + m_\Gamma g y_\Gamma + \frac{1}{2} c_{04} (x_c - x_\Gamma)^2 + \frac{1}{2} c_{05} (y_c - y_\Gamma)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда уравнения динамики двухроторной вибрационной установки с нестационарным упруго присоединенным грузом в форме уравнений Лагранжа II рода имеют вид:

$$\begin{aligned} & m_0 \ddot{x}_c - m\rho \left[\sin(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] \ddot{\varphi} - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1) \ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - \\ & - m\rho \left[\cos(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] \dot{\varphi}^2 - m\rho \cos(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1^2 - m\rho \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 - \\ & - 2m\rho \cos(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 - 2m\rho \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_1 + \beta \dot{x}_c + 2c_{01} x_c + c_{04} (x_c - x_\Gamma) = 0; \\ & m_0 \ddot{y}_c + m\rho \left[\cos(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] \ddot{\varphi} + m\rho \cos(\varphi + \varphi_1) \ddot{\varphi}_1 + m\rho \cos(\varphi + \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - \\ & - m\rho \left[\sin(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] \dot{\varphi}^2 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1^2 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 - 2m\rho \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 - \\ & - 2m\rho \sin(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_1 + m_0 g + 2c_{02} y_c + \beta \dot{y}_c + c_{05} (y_c - y_\Gamma) = 0; \\ & - m\rho \left[\sin(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \sin(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] \ddot{x}_c + m\rho \left[\cos(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] \ddot{y}_c + \\ & + \sqrt{J_1} + J_1 + J_2 - 2m\rho r \left[\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2 \right] \ddot{\varphi} + \sqrt{J_1} - m\rho r \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 + \\ & + \sqrt{J_2} + m\rho r \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + 2m\rho r \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 - 2m\rho r \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_1 + m\rho r \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 - \\ & - m\rho r \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + m\rho g \left[\cos(\varphi + \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + \cos(\varphi + \varphi_2) \dot{\varphi}_2 \right] + c_{03} \cdot \varphi + \beta \cdot \dot{\varphi} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & J_1 \ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1) \ddot{x}_c + m\rho \cos(\varphi + \varphi_1) \ddot{y}_c + \sqrt{J_1} - m\rho r \cos \varphi_1 \ddot{\varphi} - m\rho r \sin \varphi_1 \cdot \dot{\varphi}^2 + \\ & + m\rho g \cos(\varphi + \varphi_1) + k_c \dot{\varphi}_1 = M_1; \\ & J_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2) \ddot{x}_c + m\rho \cos(\varphi + \varphi_2) \ddot{y}_c + \sqrt{J_2} + m\rho r \cos \varphi_2 \ddot{\varphi} + m\rho r \sin \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \\ & + m\rho g \cos(\varphi + \varphi_2) + k_c \dot{\varphi}_2 = M_2; \\ & m_\Gamma \ddot{x}_\Gamma + c_{04} (x_\Gamma - x_c) + \beta \dot{x}_\Gamma + \dot{m}_\Gamma \dot{x}_\Gamma = 0; \\ & m_\Gamma \ddot{y}_\Gamma + \beta \dot{y}_\Gamma + c_{05} (y_\Gamma - y_c) + m_\Gamma g + \dot{m}_\Gamma \dot{y}_\Gamma = 0, \end{aligned}$$

где M_1, M_2 – электромеханические моменты двигателей.

Как показало исследование с помощью компьютерного моделирования, если поперечные жесткости пружин-опор и пружины, соединяющей груз и платформу, достаточно велики, то перемещениями по горизонтальной оси можно пренебречь (при $c_{01} \geq 2c_{02}$).

Кинетическая и потенциальная энергии системы без учета горизонтальных перемещений и угла поворота платформы имеют вид:

$$T = \frac{1}{2}m_0\dot{y}_c^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\varphi}_2^2 + \dot{y}_c[m\rho\dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + m\rho\dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2] + \frac{1}{2}m_\Gamma(t)\dot{y}_\Gamma^2; \quad (14)$$

$$\Pi = m_0gy_c + mg\rho(1 - \cos \varphi_1) + mg\rho(1 - \cos \varphi_2) + \frac{1}{2}c_0y_c^2 + \frac{1}{2}c_1(y_c - y_\Gamma)^2 + m_\Gamma(t)gy_\Gamma.$$

Соответствующие уравнения динамики, учитывающие лишь движение вибрационной установки вдоль вертикальной оси, имеют вид:

$$\begin{cases} m_0\ddot{y}_c + m\rho \sin \varphi_1 \ddot{\varphi}_1 + m\rho \sin \varphi_2 \ddot{\varphi}_2 + m\rho \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 + m\rho \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + \\ \quad + c_0y_c + c_1(y_c - y_\Gamma) + m_0 \cdot g + \beta \cdot \dot{y}_c = 0; \\ m\rho \sin \varphi_1 \ddot{y}_c + J_1\ddot{\varphi}_1 + mg\rho \sin \varphi_1 + k_c\dot{\varphi}_1 = M_1; \\ m\rho \sin \varphi_2 \ddot{y}_c + J_2\ddot{\varphi}_2 + mg\rho \sin \varphi_2 + k_c\dot{\varphi}_2 = M_2; \\ m_\Gamma(t)\ddot{y}_\Gamma + \beta\dot{y}_\Gamma + c_1(y_\Gamma - y_c) + m_\Gamma(t)g + \dot{m}_\Gamma(t)\dot{y}_\Gamma = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где $m_0 = m_{пл} + 2m$; суммарные жесткости нижних и верхних пружин обозначены c_0 и c_1 , а начало отсчета углов φ_1 и φ_2 производится от нижнего вертикального положения.

Если соотношение продольной и поперечной жесткости пружин, а также расстояние «а» между точками их крепления, приводит к существенным изменениям угла поворота φ при незначительных колебаниях платформы в горизонтальном направлении, модель динамики стенда может быть описана следующим образом :

$$\begin{aligned} & m_0\ddot{x}_c - m\rho \sin \varphi_1 \ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin \varphi_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 - m\rho \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + \\ & + \beta\dot{x}_c + 2c_{01}x_c + c_{04}(x_c - x_\Gamma) = 0; \\ & m_0\ddot{y}_c + m\rho \cos \varphi_1 \ddot{\varphi}_1 + m\rho \cos \varphi_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 - m\rho \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + m_0g + \\ & + 2c_{02}y_c + \beta\dot{y}_c + c_{05}(y_c - y_\Gamma) = 0; \\ & J_1\ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin \varphi_1 \ddot{x}_c + m\rho \cos \varphi_1 \ddot{y}_c + m\rho g \cos \varphi_1 + k_c\dot{\varphi}_1 = M_1; \\ & J_2\ddot{\varphi}_2 - m\rho \sin \varphi_2 \ddot{x}_c + m\rho \cos \varphi_2 \ddot{y}_c + m\rho g \cos \varphi_2 + k_c\dot{\varphi}_2 = M_2; \\ & m_\Gamma\ddot{x}_\Gamma + c_{04}(x_\Gamma - x_c) + \beta\dot{x}_\Gamma + \dot{m}_\Gamma\dot{x}_\Gamma = 0; \\ & m_\Gamma\ddot{y}_\Gamma + \beta\dot{y}_\Gamma + c_{05}(y_\Gamma - y_c) + m_\Gamma g + \dot{m}_\Gamma\dot{y}_\Gamma = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

При исследовании электромеханических систем виброустановки возникает необходимость приближения исследуемой математической модели к реальному объекту. Поэтому может быть необходим учет упругости карданных валов между приводными

электродвигателями и неуравновешенными роторами (рис. 3). В работах В.М. Шестакова показано, что при частоте упругих колебаний карданного вала $\omega_y \geq 1000 \text{ с}^{-1}$ его можно рассматривать как жесткий, в противном случае необходимо учитывать упругость.

Принимая во внимание упругость карданных валов согласно схеме, представленной на рис.3, получаем дифференциальные уравнения для системы «двигатель - неуравновешенный ротор» в виде:

$$J_i \dot{\omega}_i = M_i - M_{yi}; \quad \dot{z}_2 = c_B (\omega_i - \dot{\phi}_i), \quad i=1,2 \quad (17)$$

где упругий момент $M_{yi} = z_2 + b_B (\omega_i - \dot{\phi}_i)$, c_B , b_B - коэффициенты жесткости и демпфирования в карданном валу; ω_i - угловая скорость i -ого двигателя; M_i - вращающий момент i -ого двигателя; M_{yi} - упругий вращающий момент; $\dot{\phi}_i$ - угловая скорость i -ого ротора; k_c - коэффициент трения в подшипниках, $\tilde{M}_{nл}$ - момент, отражающий влияние платформы на ротор: $\tilde{M}_{nл} = m \rho \ddot{y}_c \cos \varphi(t)$.

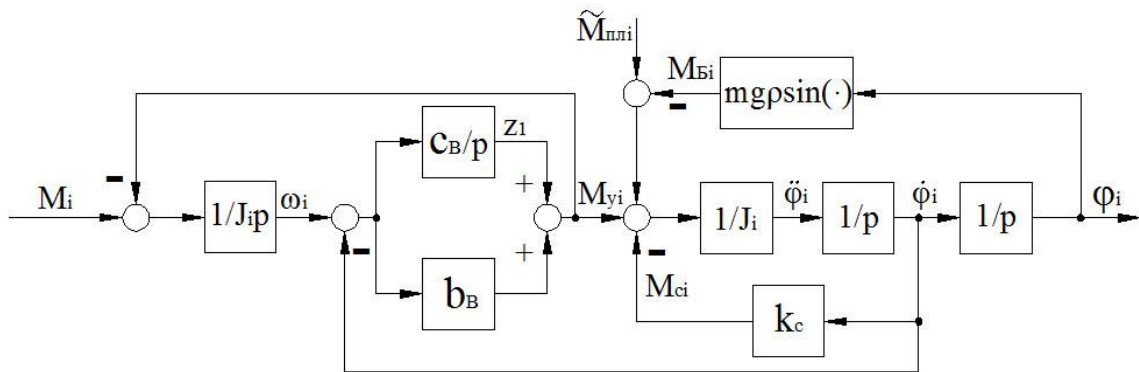


Рис.3. Схема с учетом упругости карданных валов.

Тогда электромеханические моменты двигателей M_i , стоящие в правых частях уравнений (13), (15), необходимо заменить на упругие моменты M_{yi} и добавить к ним дифференциальных уравнения динамики упругих валов вида (17) для $i=1,2$.

Третья глава посвящена синтезу алгоритмов управления кратной синхронизацией движения неуравновешенных роторов двухроторной виброустановки, а также анализу возможностей их практической реализации. Одним из методов синтеза алгоритмов замкнутого типа для управления синхронизацией, которые обеспечивают стабильный синхронный режим вращения, является метод скоростного градиента, предложенный в работах А.Л. Фрадкова. Алгоритмы скоростного градиента на стадии синтеза не требуют знания точной динамической модели объекта, т.е. обладают робастными свойствами.

Общий вид алгоритмов скоростного градиента:

$$M = \nabla_M \dot{Q}(z), \quad (18)$$

где M – вектор управляющих моментов, $Q(z) \geq 0$ – неотрицательная целевая функция (ЦФ) с помощью которой цель управления формулируется как асимптотическая минимизация этой функции при $t \rightarrow \infty$, $\dot{Q}(z) = \frac{dQ(z)}{dt}$ – производная по времени для ЦФ $Q(z)$, ∇ – символ градиента (вектора из частных производных), z – вектор состояния объекта.

В работах А.Л. Фрадкова предложено применять метод скоростного градиента к управлению колебаниями в механических системах. При этом в качестве множества целевых (желаемых) состояний объекта управления z^* предлагается выбирать множество состояний, имеющих заданные значения некоторых инвариантов движения невозмущенной системы: $z^* = \{z \mid I(z) = I^*\}$, где $I(z)$ – набор инвариантов, I^* – заданный вектор. Наиболее часто рассматривается случай, когда в качестве единственного инварианта выбирается полная энергия (гамильтониан) свободной консервативной системы $H(z)$. При этом целевой функционал имеет вид:

$$Q(z) = (H(z) - H^*)^2, \quad (19)$$

где H^* – желаемое значение полной энергии, рассчитываемое исходя из заданного номинального режима работы механической системы. В тех же работах получены различные варианты условий достижения цели $Q(z(t)) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ для случая (19).

Однако в задачах управления синхронизацией роторов двухроторной виброустановки использование целевого функционала (19) недостаточно, т.к. он лишь обеспечивает выход угловых скоростей вибровозбудителей на заданный уровень. Поэтому предлагается для обеспечения заданного соотношения между угловыми скоростями ввести в целевой функционал дополнительное неотрицательное слагаемое $(\dot{\phi}_1 \pm n\dot{\phi}_2)^2$, где n – требуемая кратность синхронизации (знак «+» соответствует противофазному вращению роторов, знак «-» – синфазному).

Таким образом, в данной работе предлагается выбрать целевой функционал в виде:

$$Q(z) = 0.5((1 - \alpha)(H - H^*)^2 + \alpha(\dot{\phi}_1 \pm n\dot{\phi}_2)^2), \quad (20)$$

где α : $0 < \alpha < 1$ – весовой коэффициент; $H = T + \Pi$ – полная механическая энергия системы, рассчитанная с помощью формул (11), (12) или (14). При достижении цели управления $Q(z) = 0$, получим $H = H^*$ и кратное соотношение скоростей роторов $\dot{\phi}_1 = \pm n\dot{\phi}_2$.

Применительно к модели динамики плоского движения виброустановки (13) имеем

$$z = [x_c, \dot{x}_c, y_c, \dot{y}_c, \varphi, \dot{\varphi}, \varphi_1, \dot{\varphi}_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_2, x_\Gamma, \dot{x}_\Gamma, y_\Gamma, \dot{y}_\Gamma]^T.$$

Первый этап синтеза алгоритма скоростного градиента состоит в вычислении скорости изменения целевой функции (20) вдоль траекторий объекта управления (13) в предположении, что система консервативна ($k_c=0, \beta=0$):

$$\dot{Q}(z) = ((1-\alpha)[H - H^*] \dot{H} + \alpha(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)(\ddot{\varphi}_1 \pm n\ddot{\varphi}_2)), \quad (21)$$

$$\dot{H} = \dot{\varphi}_1 M_1 + \dot{\varphi}_2 M_2.$$

Таким образом:

$$\dot{Q}(z) = (1-\alpha)(H - H^*)(\dot{\varphi}_1 M_1 + \dot{\varphi}_2 M_2) + \alpha(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)(\ddot{\varphi}_1 \pm n\ddot{\varphi}_2)$$

Вычисляя частные производные по моментам, в соответствии со схемой скоростного градиента получаем алгоритм управления следующего вида:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1 ((1-\alpha)(H - H^*)\dot{\varphi}_1 + \alpha/J_1 (\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)), \\ M_2 = -\gamma_2 ((1-\alpha)(H - H^*)\dot{\varphi}_2 \pm \alpha n/J_2 (\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)). \end{cases} \quad (22)$$

Поскольку выражение (11), (12) для полной механической энергии H имеет довольно громоздкий вид, целесообразно его редуцировать (сократить) для упрощения расчета величин управляющих моментов. Эти упрощения возможны при наличии робастных свойств алгоритмов скоростного градиента. При этом правомерность такого упрощения будет исследоваться с помощью компьютерного моделирования. Необходимость редуцирования диктуется имеющимися датчиками и другими возможностями для восстановления неизмеряемых координат установки, в частности, параметров груза.

Наибольшие затруднения вызывает измерение или оценка с помощью наблюдателей угла поворота платформы φ . Кроме того, в установившихся режимах, как показало предварительно проведенное моделирование, величина угла φ незначительна. Поэтому целесообразно использовать в алгоритме управления упрощенное выражение для полной энергии, положив $\varphi=0$ и не учитывая наличие груза:

$$\begin{aligned} \bar{H} = & 0.5m_0(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + 0.5J_1\dot{\varphi}_1^2 + 0.5J_2\dot{\varphi}_2^2 - m\rho\sin\varphi_1\dot{x}_c\dot{\varphi}_1 - m\rho\sin\varphi_2\dot{x}_c\dot{\varphi}_2 + \\ & + m\rho\dot{y}_c(\cos\varphi_2\dot{\varphi}_2 + \cos\varphi_1\dot{\varphi}_1) + m_0gy_c + mg\rho(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2) + c_{01}(x_c^2 + a^2) + c_{02}y_c^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда алгоритм управления синхронизацией роторов с редуцированным выражением для полной энергии (алгоритм А1) будет иметь вид:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1((1-\alpha)(\bar{H} - \bar{H}^*)\dot{\varphi}_1 + \alpha/J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)), \\ M_2 = -\gamma_2((1-\alpha)(\bar{H} - \bar{H}^*)\dot{\varphi}_2 \pm \alpha n/J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)), \end{cases} \quad (24)$$

где \bar{H} - уровень полной механической энергии виброустановки без учета энергии груза .

Если динамика виброустановки может быть описана уравнениями (15), то выражение для полной механической энергии можно еще более упростить, не учитывая слагаемые, соответствующие энергии груза (при $c_1=0$, $m_r=0$):

$$\begin{aligned} \tilde{H} = & 0.5J_1\dot{\varphi}_1^2 + mg\rho(1-\cos\varphi_1) + 0.5J_2\dot{\varphi}_2^2 + mg\rho(1-\cos\varphi_2) + 0.5c_0y_c^2 + m_0gy_c + \\ & + \dot{y}_c(m\rho\dot{\varphi}_1\cos\varphi_1 + m\rho\dot{\varphi}_2\cos\varphi_2) + 0.5m_0\dot{y}_c^2 \end{aligned} \quad (25)$$

Тогда управляющие моменты (алгоритм А2) рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1((1-\alpha)(\tilde{H} - H^*)\dot{\varphi}_1 + \alpha/J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)); \\ M_2 = -\gamma_2((1-\alpha)(\tilde{H} - H^*)\dot{\varphi}_2 \pm \alpha n/J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)). \end{cases} \quad (26)$$

В работе обосновано, что алгоритм (26) позволяет достичь цели управления ($Q(z(t)) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$) для модели (15), где $z = [y_c, \dot{y}_c, \varphi_1, \dot{\varphi}_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_2]^T$.

При решении простейших задач синхронизации может использоваться алгоритм, в котором для расчета управляющих моментов используются только энергии роторов:

$$H_i = 0.5J_i\dot{\varphi}_i^2 + mg\rho(1-\cos\varphi_i), \quad i = 1, 2 \quad (27)$$

Тогда алгоритмы управления (алгоритм А3) имеют вид:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1((1-\alpha)(H_1 - H_1^*)\dot{\varphi}_1 + \alpha/J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)); \\ M_2 = -\gamma_2((1-\alpha)(H_2 - H_2^*)\dot{\varphi}_2 \pm \alpha n/J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)). \end{cases} \quad (28)$$

В работе представлено обоснование работоспособности алгоритма (28) при $n=1$.

Целевая функция в данном случае задается в виде:

$$Q(z) = 0.5((1-\alpha)[(H_1 - H_1^*)^2 + (H_2 - H_2^*)^2] + \alpha(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)^2) \quad (29)$$

При синтезе наблюдателя в качестве исходной модели выбирается модель неуравновешенного ротора без учета динамики платформы:

$$J\ddot{\varphi} + \kappa_c \dot{\varphi} + mg\rho \sin \varphi = M_D \quad (30)$$

Уравнения состояния в этом случае имеют вид ($x_1 = \varphi$; $x_2 = \dot{\varphi}$):

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) = -mg\rho/J \sin x_1(t) + 1/J \cdot M_D. \end{cases}$$

Структура наблюдателя для системы второго порядка при условии, что измеряется только $x_1(t)$, в соответствии со схемой Чекарелла следующая:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + k_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{mg\rho}{J} \sin \hat{x}_1 + k_2(x_1 - \hat{x}_1) + \frac{k_M}{J} M_D. \end{cases} \quad (31)$$

В четвертой главе представлены результаты компьютерного исследования энергоскоростных алгоритмов управления кратной синхронизацией роторов. Исследование проводилось для различных моделей динамики виброустановки, представленных в главе 2. Прежде всего, цель исследования состояла в выборе алгоритма управления, который обеспечивает стабильность заданного режима кратной синхронизации для рассматриваемой модели динамики, являясь наиболее простым в реализации. Итоги исследования представлены в табл.1.

Таблица 1

Модель динамики	Кратность синхронизации		
	n=1	n=2	n=3
ММ1	A3	A3	*)
ММ2	A3	A2	*)
ММ3	A3	A2	A2
ММ4	A3	A2	*)
ММ5	A2	A1	*)
ММ6	A2	A1	*)
ММ7	A2	A1	A1
ММ8	A1	A1	*)

*) Данные модели динамики при n=3 не исследовались.

В таблице использованы следующие обозначения: математические модели: ММ1 – модель движения вдоль вертикальной оси (15) без учета груза ($m_r=0$); ММ2– модель (15) с учетом упругости карданных валов (17); ММ3 – модель (15) при переменной массе груза $m_r \neq \text{const}$; ММ4 – модель (15) с учетом упругости (17) и нестационарности $m_r \neq \text{const}$; ММ5 – модель движения в плоскости Оху без учета угла поворота (16); ММ6 – модель

(16) с учетом упругости карданных валов (17); ММ7 – модель движения в в плоскости Оху с учетом угла поворота платформы при $m_{\Gamma}=\text{const}$ (13); ММ8 – модель (13) с учетом нестационарности груза $m_{\Gamma}\neq\text{const}$.

Моделирование проводилось в программной среде MATLAB. Наиболее важными с точки зрения подтверждения наличия стабильного режима кратной синхронизации являются графики разности кратных скоростей, которая должна быть близка к нулю и приведенного сдвига фаз $\Delta\varphi=\varphi_1-n\varphi_2$, который должен стабилизироваться. Количественно быстрдействие процесса стабилизации синхронного режима можно оценить с помощью показателей: $t_{\text{син}}$ – время синхронизации- время входа величины $\Delta\varphi$ в 5%-ную зону от своего установившегося значения; $t_{\text{шт}}$ – время первого достижения скоростью i -ого ротора расчетного установившегося значения. Нестационарность груза обусловлена изменением массы при нагружении виброустановки. Нагружение осуществляется в течении конечного временного интервала в предположении однородности массоинерционных параметров просеиваемого материала, так что скорость нагружения является постоянной величиной. Начальная масса груза не равна нулю и соответствует массе сит. Предполагается, что нагружение начинается в момент t_1 , а начиная с момента времени t_2 масса насыпаемого на сита материала соответствует массе материала, убывающего с сит, т.е. при $t > t_2$ масса присоединенного груза $m_{\Gamma}=\text{const}$.

Результаты исследования модели ММ7 с алгоритмом А1 представлены на рис.4 и рис.5. На рис.4 приводятся графики движения центра масс груза $y_{\Gamma}=\text{f}(x_{\Gamma})$ для различной кратности синхронизации а) $n=1$; б) $n=2$; в) $n=3$.

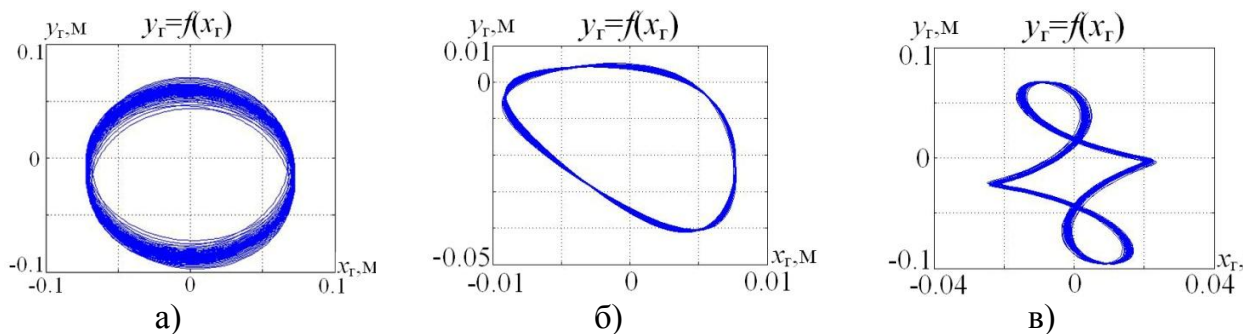
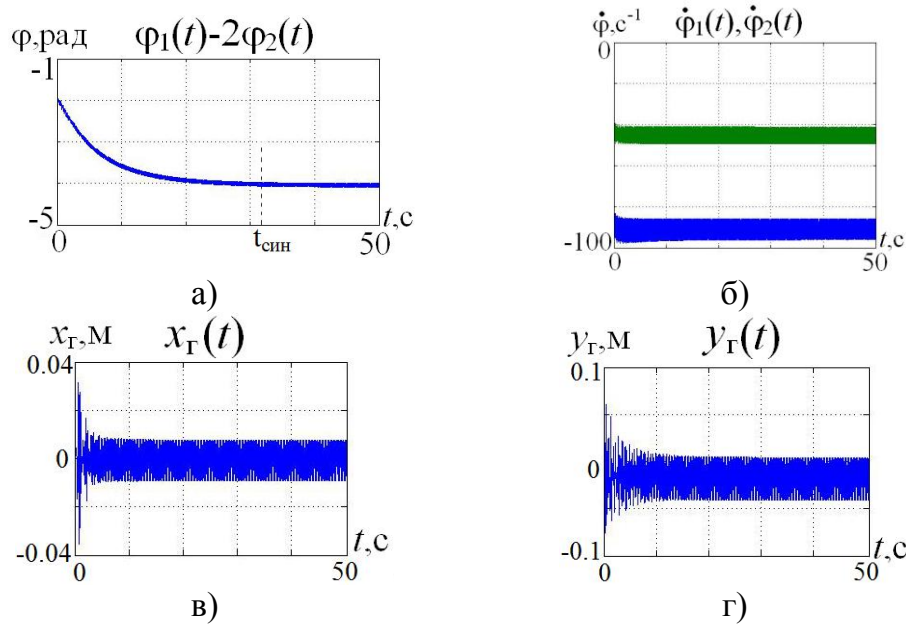
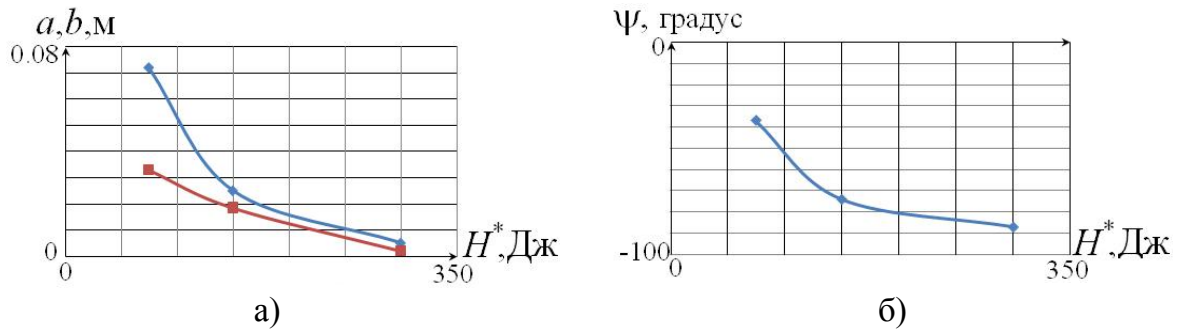


Рис.4. Траектории движения груза при различной кратности синхронизации.

На рис.5 приводятся графики изменения: а) приведенного сдвига фаз роторов $\Delta\varphi = \varphi_1 - 2\varphi_2$; б) скоростей роторов $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$; в), г) горизонтальной x_{Γ} и вертикальной y_{Γ} координат груза.

Рис. 5. Результаты моделирования при $n=2$.

Кроме того исследовалось влияние параметра H^* на вид траектории груза, которая при $n=1,2$ имеет эллипсоподобную форму. Результаты моделирования при $n=2$ представлены на рис.6, где ψ - угол наклона эллипса; «а», «б» - длины полуосей эллипса.

Рис. 6. Зависимость параметров траектории груза от H^* при $n=2$.

Обобщая результаты моделирования, представленные в четвертой главе, можно заключить следующее. Применение соответствующего алгоритма управления кратной синхронизации (см. табл. 1) к моделям ММ1-ММ4, описывающим движение вдоль вертикальной оси, позволило обеспечить стабильность кратного синхронного режима при задании всего одного параметра кратности « n » в алгоритме. Время синхронизации увеличивается с ростом кратности синхронизации, а также при учете упругости карданных валов, но не более чем в 2÷3 раза, не превышая 1 мин. при правильном подборе коэффициентов алгоритма α и γ . Предложенные алгоритмы обеспечивают асимптотическую кратную координатную синхронизацию углов поворота ротора и приближенную асимптотическую кратную частотную синхронизацию роторов ($|\dot{\phi}_1 - n\dot{\phi}_2| < \varepsilon$), однако амплитуда колебаний разности кратных скоростей $\Delta\dot{\phi} = \dot{\phi}_1 - n\dot{\phi}_2$ не превышает (3÷5)% от их

установившихся значений. Варьирование величины начальной массы груза и скоростей нагружения при наличии синхронного режима не нарушает синхронизации вплоть до конечной массы груза, составляющей (20÷25)% массы платформы ($m_{пл}=9\text{кг}$), а величина максимальной допустимой скорости нагружения составляет от 0,8кг/с при $n=1$ до 0,5кг/с при $n=3$, уменьшаясь при увеличении кратности. Эти свойства сохраняются при задании различных начальных положениях роторов $\varphi_1(0)$, $\varphi_2(0)$.

Применение алгоритмов управления А1 и А2 для моделей ММ5-ММ8 также обеспечивает приближенную кратную частотную синхронизацию и кратную координатную синхронизацию с достаточно высокой степенью точности. Время кратной координатной синхронизации во всех случаях ($n=1,2,3$) не превышает 30 с.

Изменение параметра n в алгоритме кратной синхронизации приводит к изменению вида траектории движения центра масс груза, причем с увеличением кратности n угол наклона продольной оси эллипсоподобной траектории ψ растет. На примере двукратной синхронизации ($n=2$) показано, что увеличение заданного уровня энергии \bar{H}^* в алгоритме А1 приводит к существенному изменению величины полуосей эллипсов, а угол наклона траектории ψ стремится к $-\pi/2$, т.е. эллипс занимает вертикальное положение. Ассиметричный характер траектории движения груза при различных параметрах n и \bar{H}^* указывают на пригодность алгоритма А1 для решения задач вибротранспортирования.

В пятой главе исследуется эффективность предложенных алгоритмов управления с учетом особенностей технической реализации, к которым можно отнести: а) использование наблюдателей для восстановления неизмеряемых датчиками переменных состояния; б) влияние динамики привода; в) ограничение по уровню электромеханических моментов двигателей; г) возможные погрешности датчиков положения роторов.

Структура замкнутой цифровой системы управления двухроторной виброустановкой, учитывающая динамику исполнительных электромеханических систем и упругость карданных валов, а также включающая нелинейные наблюдатели и подсистему (алгоритм) управления кратной синхронизацией роторов, представлена на рис.7.

Поскольку на стенде СВ-2 используются приводные двигатели постоянного тока, то структура электрической части привода выбрана традиционной, как одноконтурная система с контуром тока. ПИ-регулятор тока настраивается оптимум по модулю. Моделирование показало, что учет динамики привода может увеличить время синхронизации на

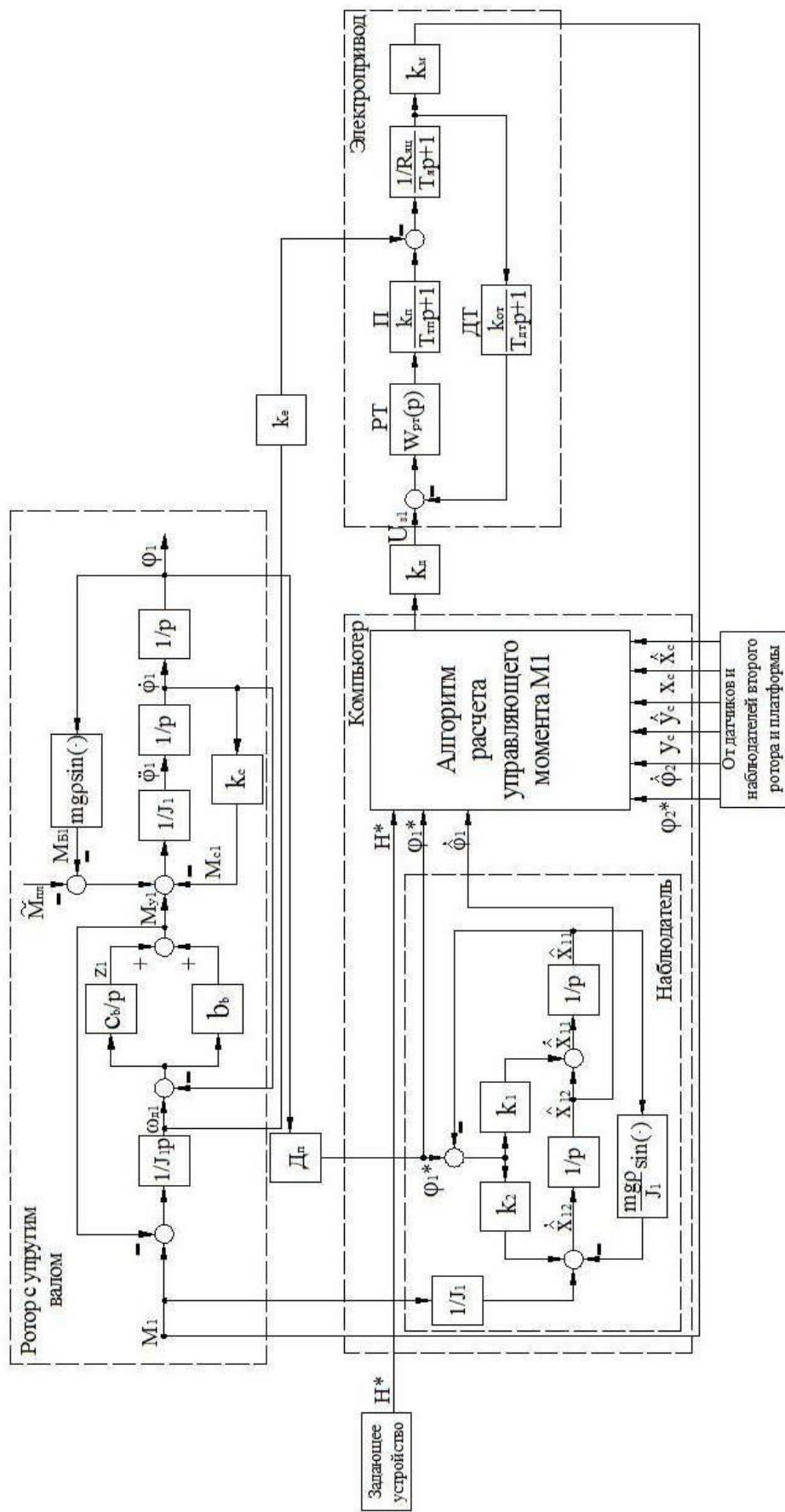


Рис. 7. Структура замкнутой цифровой системы управления

(10÷15)%, что объясняется влиянием обратной связи по противо-ЭДС, но стабильность кратного синхронного режима не ухудшается. В работе также представлены результаты исследования работоспособности наблюдателей при учете неточности измерений. Моделирование показало, что синхронный режим сохраняется как при варьировании начальных положений роторов, так и при варьировании начальных масс груза и скоростей нагружения. Более того, при использовании наблюдателей в ряде случаев время синхронизации уменьшалось. При учете ограничений на уровень величин электромеханических моментов время синхронизации может увеличиться на (10÷15)%. Время наблюдений (вхождение ошибки наблюдений $e_H = |\varphi_i - \hat{\varphi}_i|$ в 5%-ую зону от установившегося значения скорости) не превышает времени переходных процессов по скоростям.

На основании изложенного можно предложить следующую *методику выбора параметров энергоскоростных алгоритмов управления кратной синхронизации*:

- 1) Выбор модели динамики виброустановки (ММ1-ММ8), исходя из параметров виброустановки и коэффициентов жесткости опор.
- 2) Выбор параметра кратности «n» в алгоритме управления, обеспечивающего форму траектории платформы и груза, требуемую для решаемой задачи.
- 3) Выбор алгоритма управления синхронизацией (А1-А3) по табл.1.
- 4) Выбор параметра N^* по номограммам, исходя из заданной формы траектории груза (рис.6) и/или заданных угловых скоростей роторов (рис.8).

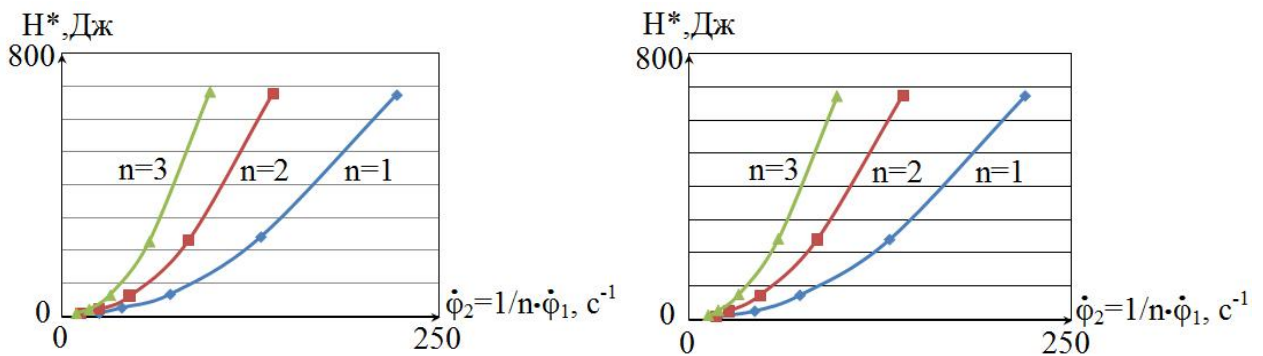


Рис.8. Номограммы зависимости заданной энергии N^* от скоростей роторов при $m_{\Gamma}=1$ кг: а) для ММ7; б) для ММ1.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Предложена математическая постановка задачи управляемой кратной синхронизации роторов двухроторных вибрационных установок.
2. Разработаны модификации энергоскоростных алгоритмов управления вибрационными установками, обеспечивающие кратную синхронизацию роторов в условиях нестационарности нагрузки, неполноты измерений и упругости валов.

3. Разработана структура энергоскоростной электромеханической системы управления роторами вибрационных установок, обеспечивающей кратную синхронизацию.
4. Разработана методика выбора параметров энергоскоростных алгоритмов управления кратной синхронизацией.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

В научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Кудрявцева И.М., Томчина О.П. Алгоритм кратной синхронизации для двухроторного вибрационного стенда с нестационарной нагрузкой. Информатика и системы управления, №3 (21), 2009, С.34-44.

В других журналах и изданиях:

2. О.П.Томчина, И.М.Кудрявцева, В.А.Галицкая. Алгоритмы управления кратной синхронизацией для двухроторных вибрационных установок. В кн.: Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика / Под ред. В. В. Белецкого, Д. А. Индейцева, А. Л. Фрадкова. СПб.: Наука, 2009, С. 455-474.

3. Томчина О.П., Кудрявцева И.М. Алгоритм синхронизации роторов для шестимассовой упругой нестационарной виброустановки. // Сб. материалов Межд. конференции «Мехатроника, автоматизация, управление». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, С.76-78.

4. Кудрявцева И.М. Алгоритм кратной синхронизации с наблюдателем для двухроторной вибрационной установки с учетом нестационарности груза на платформе. «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительного производства»: Сб. науч. тр. -СПб.: Изд. «Инструмент и технологии», 2008, С.71-73.

5. Томчина О.П., Кудрявцева И.М. Алгоритм синхронизации роторов для многомассовой упругой нестационарной виброустановки. СПбГПУ, XXXVI неделя науки СПб ГПУ /Всероссийская межвузовская научн.-техн. конф. -С.-Петербург, СПб ГПУ, 2008г.

6. Томчина О.П., Кудрявцева И.М. Редуцированный энергоскоростной алгоритм синхронизации для двухроторной виброустановки. Сб. науч. тр.,-СПб: Изд. «Инструмент и технологии», 2008, №30-31, С.189-192.

7. Томчина О.П., Кудрявцева И.М. Алгоритм кратной синхронизации с наблюдателем для двухроторной вибрационной установки с учетом нестационарности груза на платформе. Сб. науч. тр.,-СПб: Изд. «Инструмент и технологии», 2007г, С.112-115.

8. Tomchina O.P, Kudryavtseva I.M. Algorithm of multiple observer-based synchronization for time varying two-rotor vibration system // Proc. of the 3rd IFAC Workshop «Periodic Control System» (PSYCO'07), St. Petersburg, 29-31 Aug., 2007.

9. Tomchina O.P, Kudryavtseva I.M. Algorithm of multiple synchronization for two-rotor vibration unit with varying payload // The 3rd Int. IEEE Scientific Conf. on Physics and Control (PhysCon 2007) – Sept. 3rd -7th 2007, Potsdam, P.301.

10. Tomchina O.P, Kudryavtseva I.M. Controlled Synchronization of Unbalanced Rotors with Flexible Shafts in Time-Varying Vibrational Units // Proc. of 2nd International Conference “Physics and Control” (PhysCon 2005), IEEE, St.Petersburg, Aug., 2005, pp.790-794.

11. Томчина О.П., Кудрявцева И.М. Управление синхронизацией в виброустановках с учетом упругости валов и нестационарности груза. Диагностика, эксплуатация, ремонт, восстановление, модернизация оборудования. Современные технологии: Сборник докладов 3-й международной научн.-практ. конф. СПб.: Изд. ПИМаш, 2005, С. 224-233.