

На правах рукописи

Горлатов Дмитрий Владимирович

**АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИПОВЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ  
МЕХАТРОННЫХ МНОГОРОТОРНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБУН Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент

**Томчина Ольга Петровна**

Официальные оппоненты: **Пановко Григорий Яковлевич**

доктор технических наук, профессор

ФГБУН институт машиноведения Российской академии наук им. А.А.Благонравова (ИМАШ РАН)

**Колюбин Сергей Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доцент кафедры систем управления и информатики

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_ ч. \_\_\_\_\_ мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.075.02 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 « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук

Кучмин А.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы:** Многороторные (двухроторные, трехроторные и т.д.) вибрационные установки (МВУ) применяются в различных отраслях промышленности: горнодобывающей, строительной, химической, пищевой и т.д. Технологические операции, выполняемые ВУ, охватывают широкий спектр задач: просеивание, измельчение, перемешивание, уплотнение, транспортирование и т.д. Во время работы в МВУ происходят сложные нелинейные колебательные явления, изучение которых важно для повышения производительности и качества выполняемых операций и требует создания программно-аппаратного комплекса: математических и компьютерных моделей; наблюдателей состояния; новых способов управления вращательными и колебательными движениями ВУ и т.д.

Вопросы изучения нелинейных колебательных процессов и управления ими рассматривались в работах И.И. Блехмана, А.Л. Фрадкова, О.П. Томчиной, Б. Р. Андриевского, Г.Я. Пановко, Н.П. Ярошевича, Н.Д. Поляхова, С.В.Гаврилова и других. Однако в процессе синтеза моделей и алгоритмов не оценивалось влияние на эффективность работы ВУ реальных технических условий их реализации, например, такой важной особенности, как ограничение управляющих сигналов по уровню, возможности измерения полного вектора состояния и т.д. Кроме того, проверка работоспособности синтезированных алгоритмов осуществлялась лишь в ходе компьютерного моделирования в силу трудности компьютерной реализации информационно-измерительных и управляющих систем для МВУ. Таким образом разработка алгоритмов управления мехатронными МВУ производилась без учета реальных возможностей их технической реализации.

**Цель и задачи исследования.** *Целью работы* является разработка комплекса эффективных алгоритмов управления мехатронными МВУ, обеспечивающих пуск, прохождение резонанса и устойчивую приближенную частотно-координатную синхронизацию роторов при ограниченных сигналах управления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Разработка алгоритмов управления основными режимами работы МВУ, реализуемых в виде обратной связи по измеряемым величинам:

- алгоритмов управления пуском и прохождением через резонанс;
- алгоритмов управления режимами простой и кратной синхронизации.
- Разработка наблюдателя для скорости вертикальных перемещений платформы, позволяющего реализовать разработанные алгоритмы управления.
- Разработка методики построения математических моделей нестационарных МВУ, совершающих колебания в вертикальной плоскости, с учетом динамики электроприводов и упругости карданных валов.
- Компьютерное исследование эффективности разработанных алгоритмов управления для различных моделей МВУ, в том числе с учетом упругости карданных валов, нестационарности параметров и динамики электроприводов.
- Реализация системы управления вибрационным стендом СВ-2М на базе разработанных алгоритмов в программном пакете MATLAB Simulink.

**Методы исследования.** В работе использовались методы теоретической механики; методы линейной и нелинейной теории автоматического управления; математическое и компьютерное моделирование, натурный эксперимент.

**Научная новизна:**

- Предложено определение приближенной кратной частотно-координатной синхронизации роторов МВУ.
- Разработаны новые алгоритмы управления простой и кратной синхронизацией роторов двухроторной ВУ, обеспечивающие возможность управления приведенным сдвигом фаз, влияющим на форму траекторий колебаний.
- Разработаны два типа упрощенных алгоритмов управления МВУ с числом роторов не менее трех, обеспечивающие приближенную кратную частотно-координатную синхронизацию роторов в условиях нестационарности нагрузки и с учетом динамики приводов при ограничении величины электромеханических моментов.
- Разработан нестационарный наблюдатель для оценки линейных скоростей платформы ВУ, позволяющий осуществлять управление в условиях неполной измеряемости переменных состояния ВУ.

**Практическая значимость полученных результатов.** Алгоритмы управления, полученные в работе, обеспечивают повышение производительности МВУ в основных эксплуатационных режимах, их эффективность проверялась с помощью компьютерного моделирования и экспериментов на лабораторном вибростенде.

Нестационарный наблюдатель, полученный в работе, позволяет реализовать алгоритмы, требующие полноты измерения вектора состояния объекта управления.

**Реализация результатов.** Результаты работы использованы в ИПМаш РАН в научных исследованиях, поддержанных грантом РФФИ 14-29-00142.

**Апробация работы.** Апробация работы производилась на конференциях: «Неделя науки СПбГПУ» (2011-2015); «Современное машиностроение. Наука и образование» (2012); «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012); 5th IFAC International Workshop on Periodic Control Systems, PSYCO 2013; Automation & Control: International Conference of Young Scientists СПбГПУ, 2013; 70-72 научные конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов СПбГАСУ (2014-2016); 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems, MICNON 2015; 6th IFAC International Workshop on Periodic Control Systems, PSYCO-2016.

**Публикации.** По теме работы опубликовано 18 научных трудов: 5 из них – в научных журналах; 13 – в материалах конференций. 3 работы из приведенных выше опубликованы в изданиях из списка Scopus и 3 – в журналах из перечня ВАК. Работы [1-13], [15-17] написаны в соавторстве. В работе [1] автором предложена формулировка приближенной частотно-координатной синхронизации роторов МВУ. В [2] автору принадлежат результаты компьютерного исследования алгоритма кратной синхронизации с одним ведущим ротором для МВУ с числом роторов  $n \geq 3$  на трехроторной ВУ с учетом упругости карданных валов между приводами и роторами. В [3] автору принадлежат результаты компьютерного исследования алгоритма при варьировании приведенных сдвигов фаз роторов. В [4] автору принадлежат результаты компьютерного исследования алгоритма взаимной кратной синхронизации для МВУ с числом роторов  $n \geq 3$  на трехроторной ВУ

с учетом нестационарного груза. В [5] автору принадлежит модификация алгоритма пуска и прохождения резонанса с переменной уставкой по энергии. В [6] автору принадлежат результаты разработки и исследования нестационарного наблюдателя скорости вертикальных колебаний рабочего органа (платформы). В [7] при участии автора разработан алгоритм кратной синхронизации с одним ведущим ротором для МВУ с числом роторов  $n \geq 3$  и редуцированной энергией, не учитывающей угол поворота платформы. В работах [8, 9, 10, 11, 12, 13, 15] автору принадлежат результаты компьютерного исследования алгоритмов кратной синхронизации на многороторных ВУ. В [10] автору принадлежат алгоритмы кратной синхронизации: взаимной и с одним ведущим ротором. В [17] автору принадлежит пропорционально-интегральный алгоритм кратной синхронизации с регулируемым приведенным сдвигом фаз роторов для двухроторной ВУ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 61 наименований и 9 приложений. Основная часть работы изложена на 137 машинописных страницах и содержит 78 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проводится анализ существующих трудов в области управления ВУ, описываются используемые в работе исследовательские вибростенды и ставится задача диссертационной работы. Двухроторный мехатронный вибростенд СВ-2М, используемый в экспериментах, изображен на рис. 1.

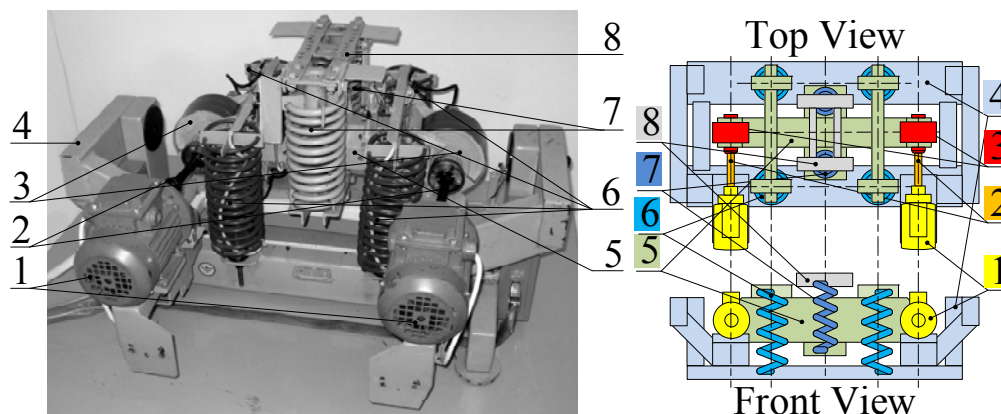


Рис. 1. Устройство вибростенда СВ-2М

Система управления СВ-2М построена на базе персонального компьютера (ПК) и ЭВМ реального времени (ЭВМ РВ), реализованной виртуально на ПК с помощью MATLAB Simulink. В конструкцию стенда входят: 1 – электродвигатели, вращающие роторы; 2 – карданные валы, соединяющие двигатели и роторы; 3 – роторы; 4 – несущая рама; 5 – платформа (рабочий орган) вибростенда; 6 – нижние пружины, виброизолирующие платформу от несущей рамы стенда; 7 – верхние пружины для крепления груза; 8 – основание для крепления груза.

В диссертации рассматриваются задачи управления основными режимами ВУ: пуском, прохождением через резонанс и синхронизацией. Предполагается, что МВУ движется в вертикальной плоскости, а отклонениями от плоского движения можно пренебречь. Для постановки задачи управления МВУ математические модели, описывающие их динамику и синтезированные в виде дифференциальных уравнений Лагранжа II-го рода, записываются в векторно-матричной форме

$$A(q)\ddot{q}(t) + B(q, \dot{q}) = F, \quad (1)$$

где  $A$  – матрица при вторых производных обобщенных координат  $\ddot{q}(t)$ ;  $B$  – вектор-столбец слагаемых, зависящие от первых производных и непосредственно от обобщенных координат  $q$ ;  $F$  – матрица сил и управляющих воздействий;  $q = [x_c, y_c, \varphi, \varphi_1, \dots, \varphi_n]^T$ ;  $x_c, y_c$  – координаты центра масс вибрирующего органа (платформы);  $\varphi$  – угол поворота платформы в вертикальной плоскости;  $\varphi_i$  – угол поворота  $i$ -го неуравновешенного ротора вокруг оси электродвигателя,  $i = 1, \dots, n$ . Предполагается, что матрица  $A(q)$  невырожденная, так что систему (1) можно разрешить относительно вектора вторых производных и привести к системе дифференциальных уравнений в нормальной форме, где все ДУ имеют первый порядок и разрешены относительно производных. Тогда модель объекта управления (ОУ):

$$\dot{z} = F(z, u, t). \quad (2)$$

где  $z = [q, \dot{q}]^T$ ;  $u = \{u_i(t)\}$ ;  $u_i(t)$  – управляющее воздействие на  $i$ -й вибровозбудитель, заданное как функция времени.

В задачах пуска и прохождения резонанса целью управления является выход энергии системы на заданный уровень. При этом цель управления имеет вид

$$H(q(t), \dot{q}(t)) \rightarrow H^*, \quad (3)$$

где  $H = T + \Pi$  – полная энергия системы;  $T$ ,  $\Pi$  – кинетическая и потенциальная энергии ВУ;  $H^*$  – заданный уровень энергии системы, определяющий величины средних скоростей роторов в установившемся режиме. Для удобства применения метода скоростного градиента цель управления (3) можно переформулировать, введя целевую функцию  $Q(z) \geq 0$ , в виде

$$Q(z) = (H - H^*)^2 \quad (4)$$

Тогда цель управления будет записываться в виде:

$$Q(z(t)) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Задача управления пуском состоит в синтезе алгоритма, реализуемого в виде обратной связи по измеряемым величинам, обеспечивающего достижение цели (5). В задачах управления прохождением через резонанс, необходимо также задать ограничения на управляющие воздействия:

$$|u_i(t)| \leq \bar{u}_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

тогда задача управления прохождением через резонанс может быть переформулирована как управление энергией с ограничением.

В существующих определениях частотной синхронизации (И.И. Блехман, А.Л. Фрадков, 2002) ее рассматривают как точное совпадение угловых скоростей неуравновешенных роторов  $\omega_s = \omega_r$ ;  $s, r = 1, \dots, n$ ;  $s \neq r$ . В более общем случае – случае кратной частотной синхронизации, скорости неуравновешенных роторов должны быть пропорциональны

$$\omega_i = n_i \cdot \omega^* \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

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

Координатная синхронизация возникает, когда выходы или некоторые фазовые координаты одной из подсистем вибровозбудителей совпадают с соответствующими координатами других подсистем при всех  $t \geq t_0$ . Понятие *кратной координатной синхронизации* (И.И. Блехман, А.Л. Фрадков, О.П. Томчина), предполагает, что фазы вибровозбудителей  $\varphi_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  удовлетворяют тождествам:

$$\frac{\varphi_s}{n_s} - \frac{\varphi_r}{n_r} = L_{sr}; \quad s = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, n; \quad s \neq r. \quad (8)$$



где  $n_s, n_r$  – заданные кратности скоростей.

На практике имеет смысл рассматривать приближенную частотную синхронизацию, для которой в случае кратной синхронизации требуется выполнение неравенств, задаваемых для *средних* скоростей:

$$\left| \omega_{s\text{ cp}} - \frac{n_s}{n_r} \cdot \omega_{r\text{ cp}} \right| \leq \varepsilon^*, \quad (9)$$

где  $\varepsilon^* > 0$  задает требуемую точность. Однако соотношения (9) недостаточно для стабильной синхронизации, поскольку оно не препятствует накоплению ошибки синхронизации по приведенному сдвигу фаз  $\varphi_s/n_s - \varphi_r/n_r$ , поэтому в дополнение к (9) следует ввести ограничение на приведенный сдвиг фаз, заменив (8) на (10)

$$\left| \frac{\varphi_s}{n_s} - \frac{\varphi_r}{n_r} - L_{sr} \right| < \varepsilon; \quad s = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, n; \quad s \neq r. \quad (10)$$

Будем говорить, что в системе имеет место *приближенная кратная частотно-координатная синхронизация*, если одновременно выполняются соотношения (9) и (10) для некоторых  $\varepsilon^* > 0, \varepsilon > 0, L_{sr} = \text{const}$ .

Введем цель управления (кратным) синхронным режимом работы МВУ как обеспечение стремления  $H$  к заданному уровню  $H^*$  и обеспечение соотношения частот вращения роторов, соответствующего кратной частотной синхронизации

$$H(q(t), \dot{q}(t)) \rightarrow H^*; \quad \dot{\varphi}_s / n_s \pm \dot{\varphi}_r / n_r \rightarrow 0; \quad s = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, n; \quad s \neq r. \quad (11)$$

Введем целевую функцию

$$Q(z) = 0,5 \left\{ (1 - \alpha)(H - H^*)^2 + \sum_{s,r=1}^n \alpha_{s,r} (\dot{\varphi}_s / n_s \pm \dot{\varphi}_r / n_r)^2 \right\}, \quad (12)$$

где  $\alpha_{s,r} > 0, \sum_{s,r=1}^n \alpha_{s,r} = \alpha, 0 < \alpha (\alpha_{s,r}) < 1$ . Тогда цель управления синхронным режи-

мом также записывается в виде (4) при  $Q(z)$ , задаваемой в виде (12).

**Во второй главе** синтезируются математические модели МВУ. Модель МВУ с  $n$  роторами, симметрично расположенными на горизонтальной оси, проходящей через центр масс платформы, и грузом, прикрепленным к платформе с помощью пружины, изображена на рис. 2.

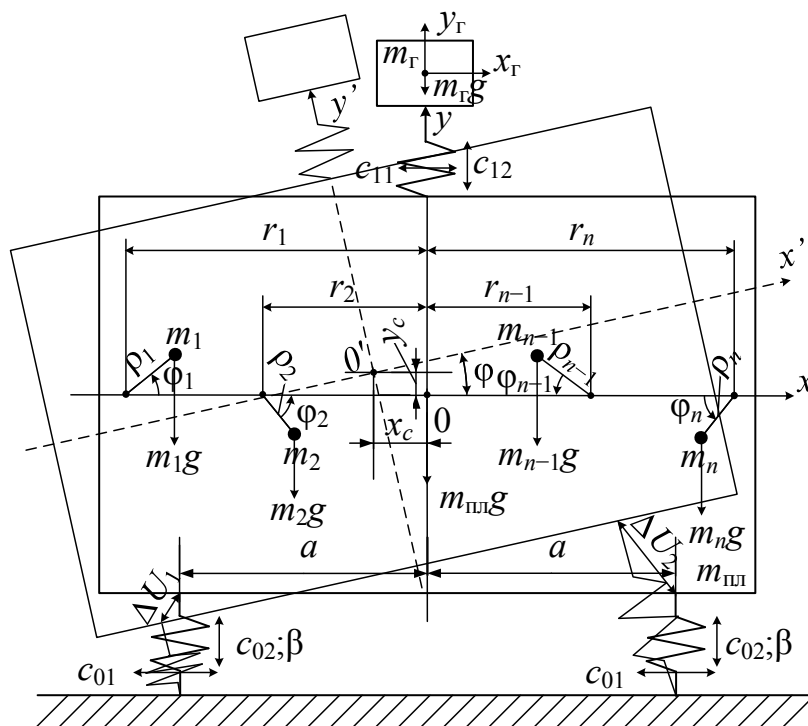


Рис. 2. Кинематическая схема МВУ с грузом (вид спереди)

Система координат, связанная с платформой, обозначена  $O'x'y'$ . Платформа укреплена на упругих опорах – пружинах. Оси вращения роторов перпендикулярны плоскости движения и считаются строго горизонтальными, поэтому перемещение МВУ по оси  $Oz$  не учитывается. Поскольку принято данное упрощение, четыре упругих опоры можно рассматривать как две пружины с соответствующей эквивалентной жесткостью  $c_{0i}$  без учета их поперечной жесткости по оси  $Oz$  и скручивания. Абсциссы крепления пружин  $x_{\text{п}i} = \pm a$ .  $x_c, y_c, \varphi, \varphi_i$  – обобщенные координаты системы,  $i = 1, \dots, n$ ;  $\varphi$  – угол поворота платформы в вертикальной плоскости  $Oxy$ , отсчитываемый против часовой стрелки;  $\varphi_i$  – угол поворота  $i$ -го ротора вокруг оси электродвигателя, отсчитываемый против часовой стрелки;  $m_{\text{пл}}$  – масса платформы МВУ;  $m_i$  – масса  $i$ -го ротора;  $\rho_i$  – эксцентриситет  $i$ -го ротора относительно оси вращения;  $r_i$  – расстояние от центра масс платформы до оси вращения  $i$ -го ротора;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\Delta U_i$  – изменение длины  $i$ -ой пружины,  $i = 1, 2, 3$ . Роторы в данной модели могут быть идентичными или иметь разные  $m_i$  и  $\rho_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Уравнения динамики МВУ, получены в виде дифференциальных уравнений Лагранжа II-го рода:

$$\begin{aligned}
& m_0 \ddot{x}_c + \sum_{i=1}^n (\ddot{\phi} m_i r_i \sin \varphi - \ddot{\phi} m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i) - \dot{\phi}_i m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i) - \\
& - \dot{\phi}^2 m_i r_i \cos \varphi - \dot{\phi}^2 m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) - \dot{\phi}_i^2 m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) - \\
& - 2\dot{\phi} \dot{\phi}_i m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i)) + 2c_{01} x_c + c_{11} (x_c - x_r) + \beta \dot{x}_c = 0; \\
& m_0 \ddot{y}_c + \sum_{i=1}^n (\ddot{\phi} m_i r_i \cos \varphi + \ddot{\phi} m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) + \dot{\phi}_i m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) - \\
& - \dot{\phi}^2 m_i r_i \sin \varphi - \dot{\phi}^2 m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i) - \dot{\phi}_i^2 m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i) - \\
& - 2\dot{\phi} \dot{\phi}_i m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i)) + m_0 g + 2c_{02} y_c + c_{12} (y_c - y_r) + \beta \dot{y}_c = 0; \\
& J \ddot{\phi} + 2\dot{\phi} \sum_{i=1}^n m_i r_i \rho_i \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^n J_i \ddot{\phi}_i + \sum_{i=1}^n [\dot{\phi}_i m_i r_i \rho_i \cos \varphi_i - \dot{x}_c m_i r_i \sin \varphi - \\
& - \dot{x}_c m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i) + \dot{y}_c m_i r_i \cos \varphi + \dot{y}_c m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) - \dot{\phi}_i^2 m_i r_i \rho_i \sin \varphi_i] + \\
& + 2\dot{\phi} \sum_{i=1}^n (-\dot{\phi}_i m_i r_i \rho_i \sin \varphi_i) + g \sum_{i=1}^n [m_i r_i \cos \varphi + m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i)] - \\
& - a^2 (c_{01} - c_{02}) \sin 2\varphi + \beta \dot{\phi} = 0; \\
& - \dot{x}_c m_i \rho_i \sin(\varphi + \varphi_i) + \dot{y}_c m_i \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) + \ddot{\phi} (J_i + m_i r_i \rho_i \cos \varphi_i) + J_i \ddot{\phi}_i - \\
& + \dot{\phi}^2 m_i r_i \rho_i \sin \varphi_i + m_i g \rho_i \cos(\varphi + \varphi_i) + k_c \dot{\phi}_i = M_i; \\
& m_r \ddot{x}_r - c_{11} (x_c - x_r) + \dot{m}_r \dot{x}_r + \beta \dot{x}_r = F_x; \\
& m_r \ddot{y}_r + \dot{m}_r \dot{y}_r + m_r g - c_{12} (y_c - y_r) + \beta \dot{y}_r = F_y.
\end{aligned} \tag{13}$$

где  $M_i$  – управляющие моменты,  $i = 1, \dots, n$ ;  $k_c$  – коэффициент вязкого трения в подшипниках роторов;  $m_0 = m_{\text{пл}} + \sum_{i=1}^n (m_i)$  – масса ВУ;  $J_i = J_{ci} + m_i \rho_i^2$ ,  $J = J_{\text{пл}} + \sum_{i=1}^n J_i + \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$  – моменты инерции роторов и ВУ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $F_x, F_y$  – проекции на  $Ox$  и  $Oy$  результирующей внешних сил  $F$ , действующих на груз, обусловленных скоростью и массой материала, сыпавшегося с платформы.

Общая модель (13) использовалась для получения частных моделей: одно-, двух- и трехроторных ВУ с учетом динамики электроприводов роторов и упругости карданных валов, соединяющих электроприводы и роторы (рис. 3). На рис. 3: СЭП – система электропривода, ЗУ<sub>*i*</sub> – задающее устройство; РТ<sub>*i*</sub> – регулятор тока; П<sub>*i*</sub> – силовой преобразователь; ДТ<sub>*i*</sub> – датчик тока;  $I_{яi}$  – ток якоря;  $E_{\text{пи}}, E_{\text{дi}}$  – ЭДС преобразователя и двигателя;  $k_{\text{дi}} = 1/k\Phi$  – коэффициент передачи двигателя по моменту;  $k_{\text{пи}}, k_{\text{овi}}$  – коэффициенты усиления П и обратной связи по току;  $k_{\text{ei}} = k\Phi$  – коэффициент момента (ЭДС) двигателя;  $T_{\text{пи}}, T_{\text{дti}}$  – постоянные времени П<sub>*i*</sub> и ДТ<sub>*i*</sub>;  $T_{\text{яi}}$  – постоянная времени якоря;  $R_{\text{яиi}}$  – сопротивление якорной цепи;  $\beta_i, \tau_i$  – динамический коэффициент усиления и постоянная времени РТ<sub>*i*</sub>;  $U_{\text{рti}}, U_{\text{дti}}$  – выходные

напряжения регулятора тока и датчика тока;  $U_i$  – напряжение, соответствующее значению управляющего момента  $M_i$ ;  $c_{vi}$ ,  $b_{vi}$  – коэффициенты жесткости и демпфирования карданного вала;  $\omega_{di}$ ,  $M_{di}$  – угловая скорость и момент  $i$ -го двигателя;  $\tilde{M}_{\text{пл}i}$  – момент, отражающий воздействие платформы на  $i$ -й ротор;  $z_{1i}$  и  $z_{2i}$  – переменные, описывающие упругую связь ( $z_{1i} = \omega_{di}$ ),  $i = 1, \dots, n$ .

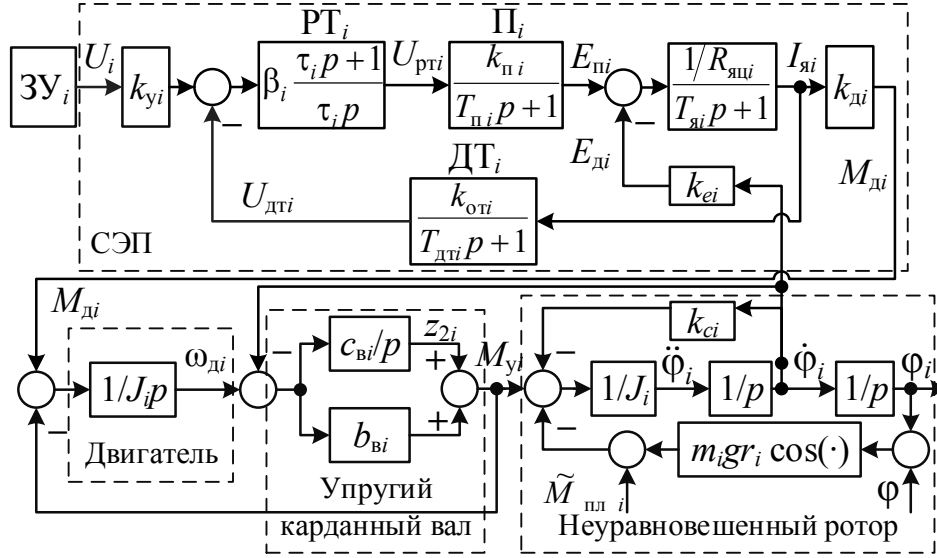


Рис. 3. Модель динамики электропривода ротора с учетом упругости

В соответствии со структурой (рис. 3), уравнения динамики СЭП имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{яi}}{dt} &= \frac{1}{T_{яi}} (-I_{яi}(t) + \frac{1}{R_{яиi}} (E_{\text{пи}}(t) - E_{\text{ди}}(t))); & \frac{dE_{\text{пи}}}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{пи}}} (-E_{\text{пи}}(t) + k_{\text{пи}} U_{\text{рп}i}(t)); \\ \frac{dU_{\text{рп}i}}{dt} &= \frac{\beta_i}{\tau_i} (U_i(t) - U_{\text{дт}i}(t)); & \frac{dU_{\text{дт}i}}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{дт}i}} (-U_{\text{дт}i}(t) + k_{\text{от}i} I_{яi}). \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнения для упругой связи и упругого момента для  $i$ -го ротора имеют вид:

$$\dot{z}_{1i} = \frac{1}{J_i} M_i - \frac{1}{J_i} z_{2i} - \frac{b_v}{J_i} z_{1i} + \frac{b_v}{J_i} \dot{\phi}_i; \quad \dot{z}_{2i} = c_v z_{1i} - c_v \dot{\phi}_i; \quad M_{\text{yi}} = z_{2i} + b_v (z_{1i} - \dot{\phi}_i). \quad (15)$$

Математические модели динамики МВУ приводятся к форме (1) и исследуются в MATLAB (Simulink). Методика построения моделей МВУ следующая:

1. В дифференциальных уравнениях (13) задается число роторов ( $n$ ) и абсциссы точек их крепления к платформе  $r_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

2. При учете упругости  $n$ -роторной ВУ система ДУ (13) объединяется с уравнениями (15) с заменой электромеханических моментов  $M_i$  в правых частях (13) на упругие моменты  $M_{yi}$ ,  $i = 1, \dots, n$  (15).

3. При учете динамики электроприводов к (13) добавляется система (14) для  $n$  роторов, при этом  $M_i$  в (13) заменяются на  $M_{di}$  ( $M_{di} = k_d I_{yi}$ ). Если, кроме того, учитывается и упругость, то в (13)  $M_{di}$  заменяются на  $M_{yi}$  и добавляются два первых уравнения (15) с заменой  $M_i$  в правой части первого уравнения на  $M_{di}$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

4. С помощью специально написанной программы в среде MATLAB соответствующие уравнения из пунктов 1, 2, 3 преобразуются к системе дифференциальных уравнений в нормальной форме, на основании которых записывается подпрограмма, используемая далее для расчета динамики модели.

**В третьей главе** синтезируются алгоритмы управления кратными синхронными режимами, алгоритмы пуска и прохождения резонанса при ограничении управляющих моментов, а также нестационарный наблюдатель скорости вертикальных колебаний платформы.

Как указывалось ранее, ВУ записывается в векторно-матричной форме:

$$A(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) = DM_i,$$

где  $q = [x_c, y_c, \varphi, \varphi_1, \dots, \varphi_n]^T$ ;  $M_i$  – вектор управляющих электромеханических моментов двигателей;  $D$  – матрица эффективности управлений.

Алгоритмы кратной синхронизации синтезировались по методу скоростного градиента А.Л. Фрадкова, основанного на организации движения в сторону уменьшения производной от целевой функции  $Q(z)$ , использующей полную механическую энергию системы (1). Преимущество метода заключается в том, что алгоритмы скоростного градиента (АСГ) робастны, то есть сохраняют работоспособность даже в отсутствие точной динамической модели объекта управления.

В общем виде АСГ можно представить в форме

$$\frac{du}{dt} + \delta(u - \bar{u}) = -\beta \nabla_u \dot{Q}(t) - \frac{\gamma d(\nabla_u \dot{Q}(t))}{dt}, \quad (16)$$

где  $\nabla_u \dot{Q}(t)$  – вектор-градиент, записанный для производной по времени целевой функции  $\dot{Q}(t)$ ;  $\bar{u}$  – некоторый постоянный вектор,  $\delta, \beta, \gamma$  – положительные числа.

Данное соотношение является преобразованием вектора  $\nabla_u \dot{Q}(t)$  в вектор поправки к управлению  $u - \bar{u}$ . Этот закон линеен и может быть описан передаточной матрицей, соответствующей матричному интегро-дифференцирующему звену

$$W(p) = -\frac{\beta I + \gamma p I}{p + \delta},$$

где  $I$  – единичная матрица.

Используя целевую функцию (12), положив  $\delta = 0$ ,  $\beta = 0$ , получим пропорциональный (П-) алгоритм управления кратной синхронизацией:

$$M_s = -\gamma_s \left\{ (1 - \alpha)(H - H^*)\dot{\phi}_s \pm \sum_r \alpha_{s,r} (\dot{\phi}_s/n_s \pm \dot{\phi}_r/n_r) \right\}, \quad (17)$$

где  $M_s$  – управляющие моменты.

Пропорционально-интегральный (ПИ-) алгоритм управления кратной синхронизацией получается при  $\delta = 0$  и имеет вид:

$$\begin{aligned} M_s = & -\gamma_s \left\{ (1 - \alpha) \left[ (H - H^*)\dot{\phi}_s + \int (H - H^*)\dot{\phi}_s dt \right] \pm \right. \\ & \left. \pm \sum_r \frac{\alpha_{s,r}}{J_s n_s} \left[ (\dot{\phi}_s/n_s \pm \dot{\phi}_r/n_r) \pm (\phi_s/n_s \pm \phi_r/n_r + C_s) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Так, для двухроторной ВУ выражения для моментов в виде (18):

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1 \left\{ (1 - \alpha_{12}) \left[ (H - H^*)\dot{\phi}_1 + \int (H - H^*)\dot{\phi}_1 dt \right] + \frac{\alpha_{12}}{J_1 n_1} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1}{n_1} \pm \frac{\dot{\phi}_2}{n_2} \right) + \left( \frac{\phi_1}{n_1} \pm \frac{\phi_2}{n_2} + C_1 \right) \right] \right\}; \\ M_2 = -\gamma_2 \left\{ (1 - \alpha_{12}) \left[ (H - H^*)\dot{\phi}_2 + \int (H - H^*)\dot{\phi}_2 dt \right] \pm \frac{\alpha_{12}}{J_2 n_2} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1}{n_1} \pm \frac{\dot{\phi}_2}{n_2} \right) \pm \left( \frac{\phi_1}{n_1} \pm \frac{\phi_2}{n_2} + C_2 \right) \right] \right\}; \end{cases}$$

Дополнительное слагаемое  $(\dot{\phi}_1/n_1 \pm \dot{\phi}_2/n_2 + C_1)$  можно рассматривать как интеграл от функции  $(\dot{\phi}_1/n_1 \pm \dot{\phi}_2/n_2)$ , где  $C = \Delta\phi_{изад}$ , причем  $\Delta\phi_{изад}$  позволяет влиять на установившееся значение приведенного сдвига фаз  $\Delta\phi(\infty)$  и, в конечном итоге, на параметры траектории платформы и груза. Чтобы упростить ПИ-алгоритм (18), пренебрежем интегралами от первых членов в правых частях ввиду их малости после переходного процесса по скоростям, который заканчивается достаточно быстро. Тогда ПИ-алгоритм для двухроторной ВУ имеет вид:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1 \left\{ (1 - \alpha_{12})(H - H^*)\dot{\phi}_1 + \frac{\alpha_{12}}{J_1 n_1} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1}{n_1} \pm \frac{\dot{\phi}_2}{n_2} \right) + \left( \frac{\phi_1}{n_1} \pm \frac{\phi_2}{n_2} + \Delta\phi_{1зад} \right) \right] \right\}; \\ M_2 = -\gamma_2 \left\{ (1 - \alpha_{12})(H - H^*)\dot{\phi}_2 \pm \frac{\alpha_{12}}{J_1 n_1} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1}{n_1} \pm \frac{\dot{\phi}_2}{n_2} \right) \pm \left( \frac{\phi_1}{n_1} \pm \frac{\phi_2}{n_2} + \Delta\phi_{2зад} \right) \right] \right\}. \end{cases} \quad (19)$$

Для МВУ с  $n \geq 3$  в работе предлагаются два алгоритма кратной синхронизации: взаимной и с одним ведущим ротором. В пропорционально-интегральной форме для трехроторной ВУ алгоритм взаимной синхронизации имеет вид:

$$\begin{cases} \tilde{M}_1 = -\gamma_1 \left\{ (1-\alpha)(H-H^*)\dot{\phi}_1 + \frac{\alpha_{12}}{J_1 n_1} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_2}{n_1 \pm n_2} \right) + \left( \frac{\phi_1 \pm \phi_2}{n_1 \pm n_2} \right) \right] + \frac{\alpha_{13}}{J_1 n_1} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_3}{n_1 \pm n_3} \right) + \left( \frac{\phi_1 \pm \phi_3}{n_1 \pm n_3} \right) \right] \right\}; \\ \tilde{M}_2 = -\gamma_2 \left\{ (1-\alpha)(H-H^*)\dot{\phi}_2 - \frac{\alpha_{12}}{J_2 n_2} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_2}{n_1 \pm n_2} \right) + \left( \frac{\phi_1 \pm \phi_2}{n_1 \pm n_2} \right) \right] + \frac{\alpha_{23}}{J_2 n_2} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_2 \pm \dot{\phi}_3}{n_2 \pm n_3} \right) + \left( \frac{\phi_2 \pm \phi_3}{n_2 \pm n_3} \right) \right] \right\}; \\ \tilde{M}_3 = -\gamma_3 \left\{ (1-\alpha)(H-H^*)\dot{\phi}_3 - \frac{\alpha_{13}}{J_3 n_3} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_3}{n_1 \pm n_3} \right) + \left( \frac{\phi_1 \pm \phi_3}{n_1 \pm n_3} \right) \right] - \frac{\alpha_{23}}{J_3 n_3} \left[ \left( \frac{\dot{\phi}_2 \pm \dot{\phi}_3}{n_2 \pm n_3} \right) + \left( \frac{\phi_2 \pm \phi_3}{n_2 \pm n_3} \right) \right] \right\}. \end{cases} \quad (20)$$

П-алгоритм кратной синхронизации с одним ведущим ротором имеет вид:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1 \left[ (1-\alpha)(H-H^*)\dot{\phi}_1 + \frac{\alpha_{12}}{J_1 n_1} \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_2}{n_1 \pm n_2} \right) + \frac{\alpha_{13}}{J_1 n_1} \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_3}{n_1 \pm n_3} \right) \right]; \\ M_2 = -\gamma_2 \left[ (1-\alpha)(H-H^*)\dot{\phi}_2 + \frac{\alpha_{12}}{J_2 n_2} \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_2}{n_1 \pm n_2} \right) \right]; \\ M_3 = -\gamma_3 \left[ (1-\alpha)(H-H^*)\dot{\phi}_3 + \frac{\alpha_{13}}{J_3 n_3} \left( \frac{\dot{\phi}_1 \pm \dot{\phi}_3}{n_1 \pm n_3} \right) \right]. \end{cases} \quad (21)$$

Кратная координатная синхронизация при управлении алгоритмами (17), (18), (19) достигается при  $\phi_s/n_s - \phi_r/n_r \rightarrow \text{const}$ . Кратная частотная синхронизация при использовании алгоритмов (16) – (21) достигается при  $\Delta\dot{\phi} = (\dot{\phi}_s/n_s - \dot{\phi}_r/n_r) \rightarrow 0$ ,  $s = 1, \dots, n$ ;  $r = 1, \dots, n$ ;  $s \neq r$ .

В разделе 3.2 синтезируется алгоритм пуска и прохождения резонанса, использующий так называемую раскачку, позволяющую уменьшить колебания, вызывающие повышенную диссипацию энергии в ВУ, и снизить нагрузку на приводы роторов. Используется модификация АСГ, работающего до достижения системой уровня энергии  $H^*$ , затем переключается на сигнал, постоянный или меняющийся по другому алгоритму, например, одному из представленных ранее ((19) – (21)):

$$u_i = \begin{cases} \gamma, & \text{if } \gamma_1 = 1 \quad \& \quad H^* - H > 0; \\ \gamma, & \text{if } \gamma_1 = 0 \quad \& \quad \dot{\phi}_i(t) - \psi_i(t) > 0; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (22)$$

$$T_\psi \dot{\psi}_i = -\psi_i + \dot{\phi}_i, \quad \gamma_1 = \max_{0 \leq \tau \leq t} \text{sgn}(H(x(\tau)) - H^*); \quad i = 1, \dots, n,$$

где  $u_i$  – управляющий сигнал;  $\gamma$  – величина управляющего сигнала;  $\dot{\phi}_i$  – угловая скорость вращения  $i$ -го ротора;  $\psi$  – угловая скорость ротора, сглаженная апериодическим фильтром;  $T_\psi$  – постоянная времени фильтра,  $i$  – номер ротора,  $i = 1, \dots, n$ ;  $\gamma_1$  – функция-флаг. В (22) при достижении  $H$  уровня  $H^*$  роторы продолжают вращаться постоянным моментом той же величины  $\gamma$ , что использовалась при раскачке. Модификация алгоритма, заключается в использовании переменной уставки по энергии  $H^* = H^*(t)$  и обеспечивает возможность попадания в различные области фазового пространства сложной системы.

В разделе 3.4 синтезирован нестационарный линейный наблюдатель полного порядка для восстановления скорости колебаний платформы по вертикали:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \hat{x}_2(t) + k_1(x_1(t) - \hat{x}_1(t)); \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = -\beta_0(t)\hat{x}_2(t) - 2c'_0\hat{x}_1(t) + F_2(t) + k_2(x_1(t) - \hat{x}_1(t)). \end{cases} \quad (23)$$

где  $x_1 = y_c$ ;  $x_2 = \dot{y}_c$ ;  $\beta_0(t) = \beta_1(t)/m_0$ ;  $c'_0 = c_0/m_0$ ;  $F_2(t) = F_1(t)/m_0$ ;

$$\begin{aligned} F_1(t) = & \frac{-m_1\rho_1 \cos \varphi_1 [m_0(M_1 - m_1g\rho_1 \cos \varphi_1 - k_c\dot{\phi}_1)]}{m_0J_1 - m_1^2\rho_1^2 \cos^2 \varphi_1} - m_0g + \\ & + \frac{m_1^2\rho_1^2 \cos^2 \varphi_1 (-2c_0y_c + \dot{\phi}_1^2 m_1\rho_1 \sin \varphi_1 - m_0g)}{m_0J_1 - m_1^2\rho_1^2 \cos^2 \varphi_1} + \dot{\phi}_1^2 m_1\rho_1 \sin \varphi_1. \end{aligned}$$

Дифференциальные уравнения ошибок наблюдения  $e_{н1}(t) = x_1(t) - \hat{x}_1(t)$ ,  $e_{н2}(t) = x_2(t) - \hat{x}_2(t)$  в матричной форме имеют вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_{н1}(t) \\ \dot{e}_{н2}(t) \end{pmatrix} = A_H(t) \cdot \begin{pmatrix} e_{н1}(t) \\ e_{н2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1 & 1 \\ -(2c'_0 + k_2) & -\beta_0(t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_{н1}(t) \\ e_{н2}(t) \end{pmatrix}. \quad (24)$$

В диссертации на основе критерия Демидовича найдены и обоснованы условия на выбор  $k_1$  и  $k_2$ , обеспечивающие устойчивость и заданное быстродействие системы оценивания.

**В четвертой главе** представлены результаты компьютерного моделирования.

В разделе 4.1 исследуется эффективность алгоритмов кратной синхронизации двухроторной ВУ. На рис. 4 изображены а) графики изменения разности фаз  $\Delta\varphi_{\text{зад}} = \varphi_1 - \varphi_2$ ; б) диаграммы плоского поля колебаний платформы, построенные по результатам моделирования для десяти различных точек платформы при управлении ПИ-алгоритмом (19). Массы роторов выбраны одинаковыми  $m_1 = m_2 = 1,5$  кг,



синхронизация роторов – однократная ( $n_1 = n_2 = 1$ ). Третья точка расположена в центре масс платформы, расстояние между соседними точками по вертикали составляет 0,15 м, по горизонтали – 0,1 м. Левая траектория соответствует загрузочному концу платформы, правая траектория – разгрузочному. Как видно из рис. 4, в системе имеет место координатная синхронизация, поскольку  $\Delta\phi_{изад}(\infty)$  стремится к постоянной величине, а поле вибраций является неоднородным.

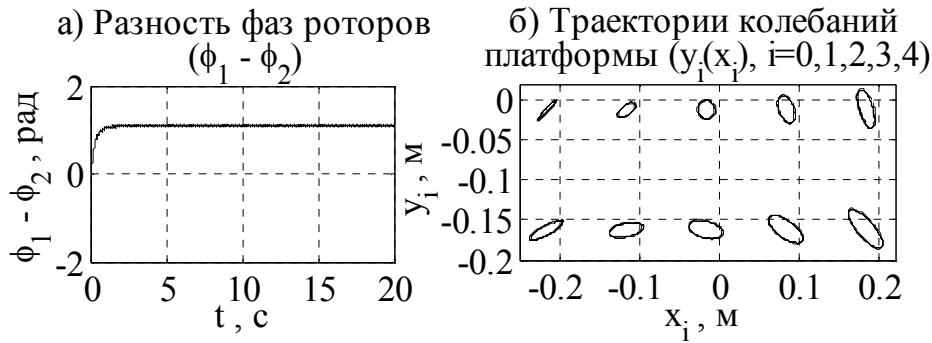


Рис. 4. Результаты моделирования при  $\Delta\phi_{изад} = 1,1$  рад

При виде траекторий ВУ с горизонтально расположенной платформой как на рис. 4,б эффективность вибротранспортирования повышается: загрузка сыпучего материала из бункера на левый конец платформы производится эффективнее при более горизонтально направленной большой полуоси эллиптической траектории крайней левой точки. При перемещении материала слева направо к разгрузочному концу указанная полуось увеличивается и изменяет наклон, что приводит к более интенсивному грохочению на разгрузочном конце платформы, сыпучий материал подбрасывается здесь выше, что позволяет уменьшить заторы при выгрузке.

В разделе 4.2 исследуются алгоритмы синхронизации для трехроторных ВУ. Результаты моделирования при управлении с помощью алгоритмов (20), (21) для случаев, когда скорость центрального 3-го ротора в два раза больше скоростей соседних роторов ( $n_1 = n_2 = 1, n_3 = 2$ ) приведены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

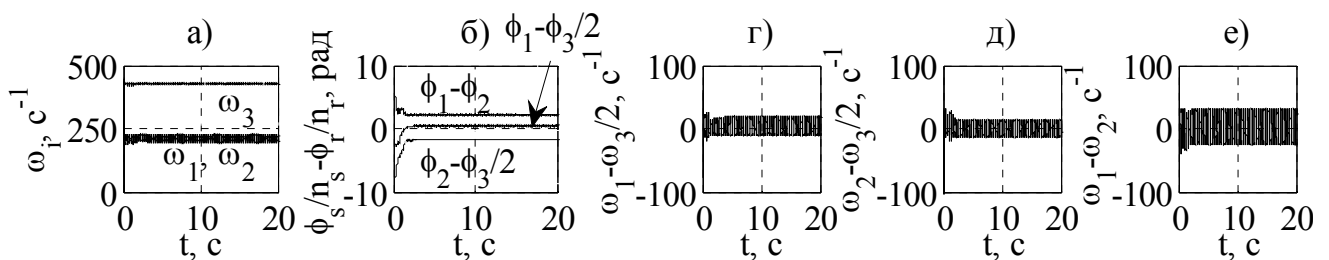


Рис. 5. Результаты моделирования для алгоритма (20) при  $n_1 = n_2 = 1, n_3 = 2$

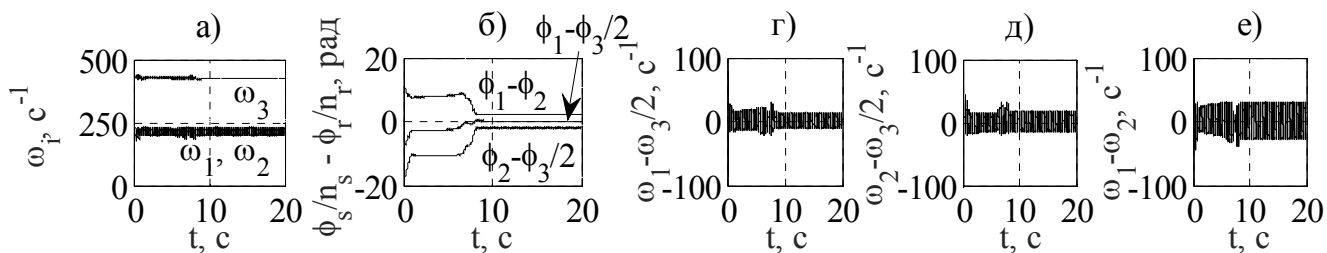


Рис. 6. Результаты моделирования для алгоритма (21) при  $n_1 = n_2 = 1, n_3 = 2$

Из графиков на рис. 5,б и рис. 6,б видно, что время переходного процесса для приведенного кратного сдвига фаз  $(\phi_i / n_j - \phi_j / n_i)$  при использовании алгоритма (21) несколько больше, однако это не оказывает существенного влияния на работу ВУ. Графики на рис. 5 и рис. 6 демонстрируют устойчивую координатную (рис. 5,б – 6,б) и частотную (рис. 5,г,д,е – 6,г,д,е) синхронизации.

Как показало моделирование на трехроторных ВУ, алгоритмы управления кратной синхронизацией для МВУ с числом роторов  $n \geq 3$ , в том числе с учетом упругости карданных валов и нестационарности груза, обеспечивают стабильный приближенный кратный частотно-координатный синхронный режим вращения роторов. Алгоритм взаимной синхронизации (20) обеспечивает более высокое быстродействие процесса синхронизации, чем алгоритм с одним ведущим ротором (21), преимущество которого заключается в более простой реализации.

В разделе 4.3 исследуется работоспособность наблюдателя (23) при прохождении резонанса под управлением алгоритма (22) на модели однороторной ВУ, движущейся в вертикальной плоскости. На рис. 7,а изображены графики скорости вращения ротора  $\omega_1$  с переменной фильтра  $\psi_1(t)$ , на рис. 7,б – скорости вертикальных колебаний платформы  $\dot{y}_c$  и на рис. 7,в,г – ошибки наблюдения  $e_{n1}, e_{n2}$ .

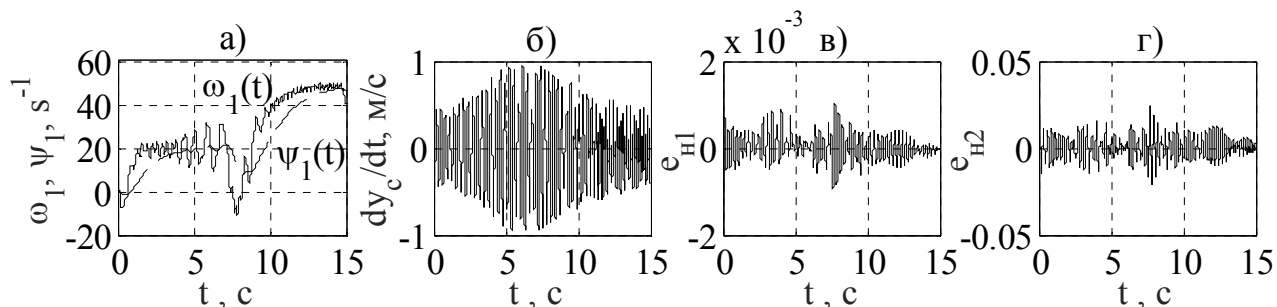


Рис. 7. Результаты моделирования однороторной ВУ с наблюдателем (23)

Как видно из графиков, нормализованная ошибка наблюдений для скорости платформы не превысила 2.5% от максимальной амплитуды колебаний скорости:

$$E = \frac{\max |e_{H2}|}{\max |dy_c / dt|} \cdot 100\% = 2,5\%.$$

Алгоритм (22) успешно работает с наблюдателем (23) при отсутствии датчика вертикальной скорости платформы. Предложенный наблюдатель позволяет применять алгоритмы, требующие полного вектора состояния системы, в случае неполной измеряемости. Время прохождения резонанса  $t_p$  для алгоритма (22) при работе с наблюдателем (23) не превышает  $t_p$  в случае полной измеряемости.

**В пятой главе** алгоритмы (19) и (22) испытываются на вибростенде СВ-2М.

В разделе 5.1 исследуется пуск и прохождение резонанса под управлением алгоритма (22), структура которого в MATLAB Simulink приведена на рис. 8.

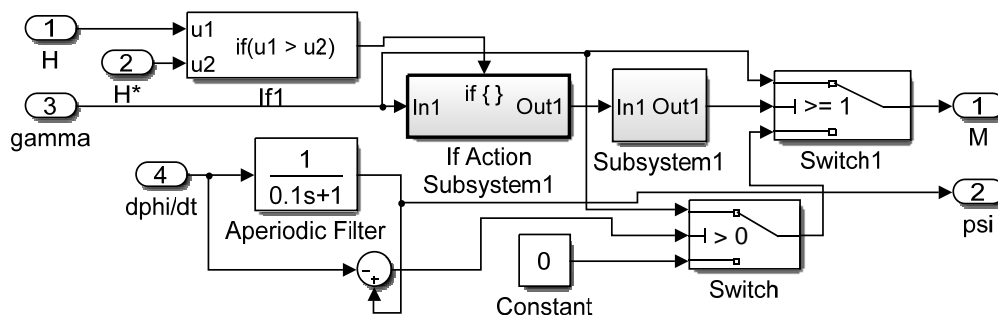


Рис. 8. Алгоритм раскачки и прохождения резонанса (22)

В случае пуска стенда подачей постоянных управляющих сигналов при  $\gamma = 0,94$  (рис. 9,а) роторы не всегда могли раскрутиться, но уже при  $\gamma = 0,95$  (рис. 9,б) роторы стабильно выходили на рабочие скорости ( $\omega_i \approx 44 \text{ с}^{-1}$ ).

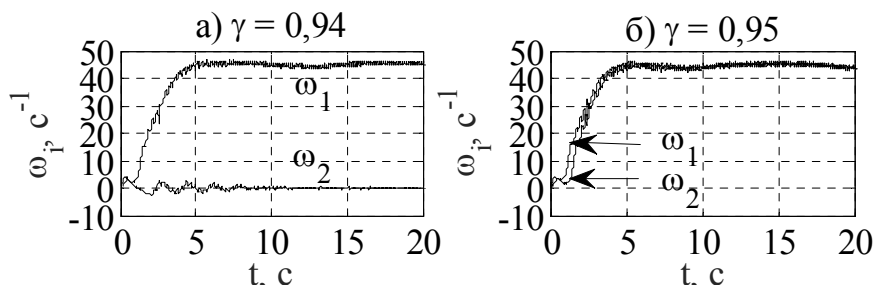
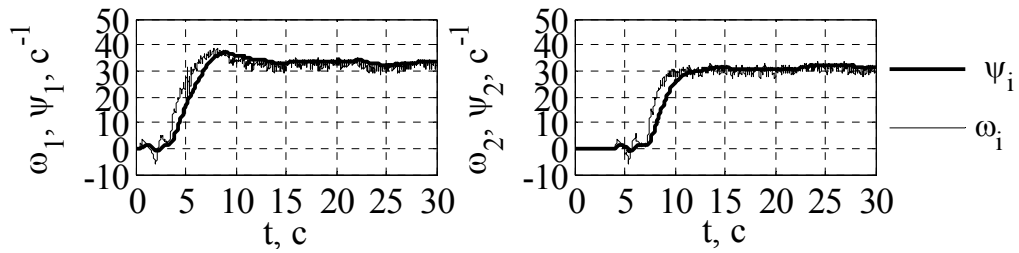


Рис. 9. Пуск стенда при  $\gamma = 0,94$  и  $\gamma = 0,95$  без алгоритма

На рис. 10 приведены результаты экспериментов с управлением алгоритмом (22), из которых видно, что даже при  $\gamma = 0,81$  роторы раскручиваются и выходят на скорости  $\omega_i \approx 30 \text{ с}^{-1}$ .

Рис. 10. Пуск стенда при  $\gamma = 0,81$  с алгоритмом (22)

Эксперименты показали, что алгоритм (22) позволяет снизить пусковые моменты и расширить диапазон рабочих угловых скоростей в сторону резонансной зоны. Численные результаты экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры стенда	Управление с помощью алгоритма				Управление с помощью постоянных моментов	
	$T_\psi, \text{c}$	$H^*, \text{Дж}$	$\gamma$	$\omega_i, \text{c}^{-1}$	$\gamma$	$\omega_i, \text{c}^{-1}$
Значения	1	100	0,81	30	0,95	$44 \text{ c}^{-1}$

В разделе 5.2 исследуется работа СВ-2М в синхронном режиме под управлением алгоритма (19), структура которого в MATLAB Simulink приведена на рис. 11.

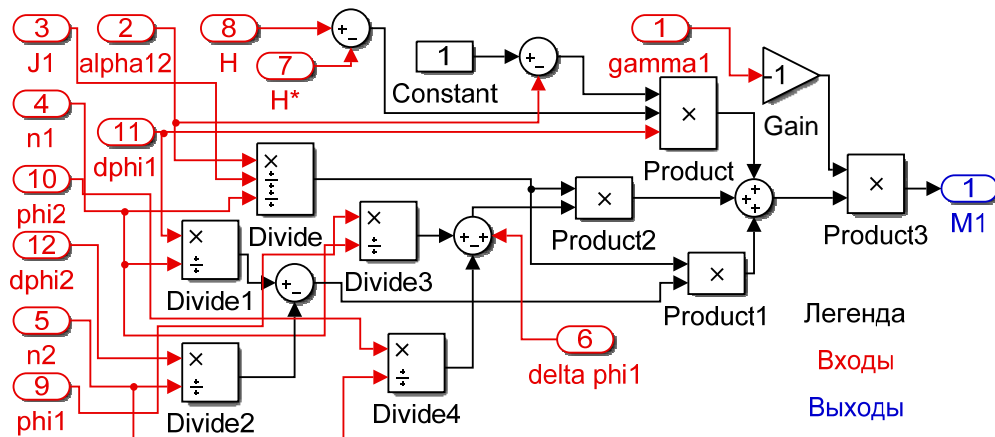


Рис. 11. Алгоритм кратной синхронизации (19) для 1-го ротора

На рис. 12 приведены результаты опыта управления двукратной синхронизацией ( $n_1 = 1, n_2 = 2$ ).

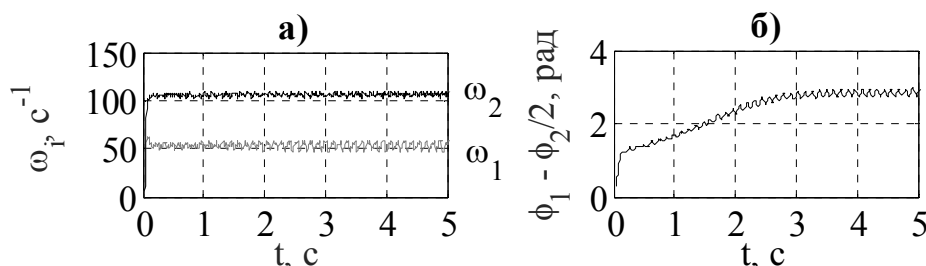


Рис. 12. Режим кратной синхронизации СВ-2М при управлении алгоритмом (19)

Скорости вращения роторов выходят на устойчивый уровень  $\omega_1 \approx 108 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_2 \approx 54 \text{ с}^{-1}$ ;  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2/2 \rightarrow 0$ , приведенный кратный сдвиг фаз  $\varphi_1/n_1 - \varphi_2/n_2 \rightarrow 2,8$ . Таким образом ПИ-алгоритм (19) обеспечивает устойчивую приближенную кратную частотно-координатную синхронизацию вибростенда СВ-2М.

**В заключении сформулированы основные результаты диссертации:**

1. Предложено определение приближенной кратной частотно-координатной синхронизации роторов МВУ.
2. Разработаны новые алгоритмы управления простой и кратной синхронизацией роторов двухроторной ВУ, обеспечивающие возможность управления приведенным сдвигом фаз, влияющим на форму траекторий колебаний.
3. Разработаны два типа упрощенных алгоритмов управления МВУ с числом роторов не менее трех, обеспечивающие приближенную кратную частотно-координатную синхронизацию роторов при ограничении величины электромеханических моментов с учетом нестационарности нагрузки и динамики приводов.
4. Разработаны и протестированы на компьютерных моделях и лабораторном вибростенде алгоритмы пуска и прохождения резонансной зоны.
5. Разработан нестационарный наблюдатель, позволяющий реализовывать управление в условиях неполной измеряемости переменных состояния ВУ.
6. Предложена методика реализации математических моделей МВУ как объектов управления в программной среде MATLAB. Разработан комплекс моделей вибростендов как объектов управления для одно-, двух-, трех- и  $n$ -роторных систем с учетом нестационарности груза, динамики электроприводов и упругости карданных валов, соединяющих двигатели и неуравновешенные роторы.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

В научных журналах и изданиях из перечня ВАК:

1. Фрадков А.Л., Томчина О.П., Галицкая В.А., Горлатов Д.В. Интегро-дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента в задачах кратной синхронизации вибрационных установок // Научно-технический вестник ИТМО. – 2013. – №1 (83). – С. 30-37.

2. Томчина О.П., Резниченко В.В., Горлатов Д.В. Энергоскоростные алгоритмы синхронизации для многороторных вибрационных установок с упругими карданными валами // Информатика и системы управления. – 2014. – №4 (42). – С. 101-112.
3. Томчина О.П., Резниченко В.В., Горлатов Д.В. Алгоритмы управления вибрационным полем виброустановки для транспортирования сыпучих строительных материалов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №1(48). – С. 115-122.

В научных изданиях и материалах научных конференций из списка Scopus:

4. A. Fradkov, O. Tomchina, V. Galitskaya, D. Gorlatov. Multiple Controlled Synchronization for 3-Rotor Vibration Unit with Varying Payload // 5th IFAC International Work-shop on Periodic Control Systems, 2013, Caen, France. – P. 5-10.
5. D.V. Gorlatov. D.A. Tomchin. O.P. Tomchina. Controlled Passage through Resonance for Two-Rotor Vibration Unit: Influence of Drive Dynamics // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems MICNON 2015 Saint Petersburg, Russia, 24-26 June 2015. – P. 313-318.
6. A.L. Fradkov, O.P. Tomchina, D.A. Tomchin, D.V. Gorlatov. Time-varying observer of the supporting body velocity for vibration units // 6th IFAC Workshop on Periodic Control Systems PSYCO 2016. Eindhoven, The Netherlands, 29 June – 1 July 2016. Vol. 49, Issue 14. – P. 18-23.

В научных изданиях и материалах научных конференций, входящих в РИНЦ:

7. Галицкая В.А., Горлатов Д.В. Алгоритм кратной синхронизации для трехроторной виброустановки // Инструмент и технологии, № 35 (выпуск 1). – 2012. – С. 23-31.
8. Томчина О.П., Томчин Д.А., Горлатов Д.В. Алгоритм кратной синхронизации для виброустановки с роторами, имеющими разные массоинерционные характеристики // В кн.: Современное машиностроение. Наука и образование: мат-лы 2-й Междун. научно-практической конф. под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 752-762.

9. Томчина О.П., Горлатов Д.В. Анализ вибрационного поля при синхронных режимах в управляемой виброустановке с двумя неидентичными вибровозбудителями // В кн.: Материалы конф. «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012), СПб., 9-11 октября 2012. – С. 610-613.
10. O. Tomchina, V. Galitskaya, D. Gorlatov, J. Bagaev. Master-Slave and Mutual Multiple Synchronization for Multi-Rotor Vibration Units // Cybernetics And Physics, Vol. 1, No. 3, 2012. – P. 216-222.
11. Томчина О.П., Горлатов Д.В., Чубенко А.П. Кратная синхронизация роторов многороторной виброустановки при учете динамики электроприводов и возмущающих воздействий // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт информационных технологий и управления СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 106-109.
12. Томчина О.П., Резниченко В.В., Горлатов Д.В. Синхронизация роторов трехроторной вибрационной установки при учете упругих связей в электромеханической системе // Доклады 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: в 3 ч.; СПбГАСУ. – СПб., 2014. – Ч. II. – С. 253-256.
13. Томчина О.П., Горлатов Д.В. Влияние эксцентриситетов роторов на вибрационное поле виброустановки для транспортирования сыпучих строительных материалов // Доклады 71-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета; СПбГАСУ. – СПб., 2014. – С. 215-218.
14. Горлатов Д.В. Управление параметрами колебаний вибрационного грохота с помощью реализуемого на компьютере алгоритма // Неделя науки СПбПУ. Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. – СПб., 2015. – С. 404-406.

В других научных журналах, изданиях и материалах научных конференций:

15. Галицкая В.А., Горлатов Д.В., Томчина О.П. Алгоритм кратной синхронизации для многороторной виброустановки // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. VIII. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 74-76.
16. Горлатов Д.В., Багаев Д.З., Томчина О.П. Управление синхронизацией и параметрами траекторий двухроторной виброустановки с неидентичными роторами // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. VIII. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 64-66.
17. D. Gorlatov, J. Bagaev. Integral-differential speed-gradient algorithms for multiple synchronization of vibration units // Automation & Control: Proceedings of the International Conference of Young Scientists, 21-22 November 2013. – SPb: St. Petersburg State Polytechnical University, 2013. – P. 18-23.
18. Горлатов Д. В. Моделирование двухроторной вибрационной установки и алгоритма прохождения роторами резонансных частот // Неделя науки СПбГПУ. Материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. – СПб., 2015. – С. 49-51.

Программы, моделирующие работу МВУ, зарегистрированные в «Центре информационных технологий и систем органов исполнительной власти (ЦИТиС)»:

1. Модель динамики трехроторной виброустановки. Рег. №50201351239 от 26.12.2013. Авторы: Томчина О.П., Горлатов Д. В.
2. Модель динамики двухроторной вибрационной установки с учетом динамики электроприводов. Рег. №50201450401 от 02.06.2014 Авторы: Томчина О.П., Резниченко В.В, Горлатов Д. В.