

На правах рукописи



Ле Ба Хань

**СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
УПРУГИХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА
ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(региональные народнохозяйственные комплексы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2016

Работа выполнена на кафедре конструирования и стандартизации в машиностроении Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузнецов Николай Константинович

Официальные оппоненты: **Сизых Виктор Николаевич**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Автоматизации производственных процессов»

Мижидон Арсалан Дугарович,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Бурятский государственный университет», кафедра «Прикладной математики», г. Улан-Удэ

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ), г. Томск

Защита состоится 12 декабря 2016 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д.24, корп. 9, зал заседаний ученого совета БГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (<http://bgu.ru>) ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, аудитория 101. (до 29.10.15 г. ФГБОУ ВПО «Байкальский государственный университет экономики и права»).

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан « » октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Т.И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Автоматизация производственных процессов и развитие компьютерного управления движением привели к появлению нового класса машин и технологического оборудования автоматического действия – мехатронных систем, основанных на интеграции механических, электронных и информационных элементов. Рост рабочих скоростей и нагрузок этих систем, связанный с интенсификацией технологических процессов и ужесточение показателей точности и надёжности их функционирования предъявляют высокие требования к синтезу систем программного управления и вызывают необходимость учёта при их создании упругости звеньев механической конструкции.

К настоящему времени предложено большое число различных способов синтеза управления колебаниями мехатронных систем, вызванными упругой податливостью исполнительных механизмов. Как показал анализ, эти способы либо недостаточно эффективны, либо сложны в реализации, либо приводят к нарушению законов программного движения. Кроме того, в известных работах недостаточно используются возможности системного анализа, связанные с выявлением системных связей и установлением характера взаимодействий между разнородными элементами мехатронных машин с целью их использования для реализации и обоснования наиболее оптимальных путей решения проблемы структурно-параметрического синтеза систем управления колебаниями на основе современных методов принятия решений и обработки информации. В этих работах, как правило, решаются задачи только параметрического синтеза при заданной структуре системы управления. Применяемые критерии эффективности управления не учитывают физическое содержание управляемого процесса, а используемые математические модели зачастую не учитывают системные связи, либо описываются сложными системами взаимосвязанных уравнений.

В настоящей работе поставлена задача синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем с учетом упругости звеньев, основанных на использовании методов системного анализа и концепции обратных задач динамики для определения потребных управляющих воздействий путем задания не зависящих от структуры регулятора аналитических зависимостей, обеспечивающих желаемый вид колебательного движения.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются системы управления движением мехатронных машин с учетом упругости звеньев. Предмет исследования – алгоритмы управления колебательными движениями исполнительных механизмов.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка способов синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов на основе решения обратных задач динамики и методов системного анализа.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) выбор расчетных схем и декомпозиция математических моделей движения исполнительных механизмов мехатронных машин с учетом упругости звеньев;
- 2) выбор комплексных критериев эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями, не накладывающих ограничений на характер программного движения;

3) разработка алгоритмов структурно-параметрического синтеза систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями, основанных на определении не зависящих от структуры регулятора потребных управляющих воздействий, путем решения обратных задач динамики по заданному виду колебательного движения;

4) численное исследование эффективности предложенных алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями;

5) идентификация параметров математической модели электромеханического робота с учетом упругости звеньев и компьютерное моделирование процессов управления упругими колебаниями.

Методы исследования. При проведении диссертационного исследования применялись методы системного анализа, теории автоматического управления и математического моделирования. Для имитационного моделирования использовалась программная среда *Matlab* с интегрированным в неё пакетом *Simulink*.

Научная новизна. Научная новизна исследования состоит в следующем:

1) предложен единый подход к задаче синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем с упругими звеньями, основанный на использовании методов декомпозиции и разделения управляемого движения на программное и колебательное, позволяющий не накладывать ограничений на характер программного движения, определяемого технологическими процессами или условиями применения этих систем;

2) предложены комплексные критерии эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями в виде заданных интегральных кривых или дифференциальных уравнений колебательных движений, которые позволяют учесть все основные показатели качества переходных процессов;

3) разработаны алгоритмы управления движением мехатронных систем с упругими звеньями, основанные на определении не зависящих от структуры регулятора потребных управляющих воздействий путем решения обратных задач динамики по заданному виду колебательного движения, обладающие свойствами слабой чувствительности к параметрическим и к координатным возмущениям;

4) предложена процедура структурно-параметрического синтеза замкнутых систем управления колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями на основе пересчета полученных временных зависимостей для управляющих воздействий в функции фазовых координат с переменными коэффициентами усиления.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена тем, что теория построена на известных принципах и методах системного анализа, управления и обработки информации; численное моделирование выполнено с помощью сертифицированных и лицензированных программных продуктов; параметры математической модели объекта управления с упругими звеньями получены на основе экспериментальных исследований реальной конструкции промышленного робота.

Практическая ценность полученных результатов исследования:

1) разработанные алгоритмы управления упругими колебаниями могут быть использованы как при проектировании систем управления, так и в системах программного управления движением многих высокопроизводительных мехатронных машин, таких как промышленные и манипуляционные роботы, станки с числовым программным управлением, гибкие производственные модули и обрабатывающие центры, применению которых уделено значительное внимание в региональной программе «Стратегия

социально-экономического развития Иркутской области» на период до 2030 года;

2) использование предлагаемых алгоритмов управления движением позволит снизить уровень колебаний, повысить быстродействие, точность и надежность работы мехатронных машин;

3) результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе при изучении дисциплин системного анализа и теории автоматического управления и специальных дисциплин.

Апробация. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II, III, IV, V и VII Всероссийских научных конференциях «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 2012-2016 г.); на V международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование» МПМО 14 (Улан-Удэ, 2014 г.); на XI Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Механики XXI века» (Братск, 2013 г.), на I международной научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 2014 г.).

Публикации и личный вклад автора. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 13 научных работах (объемом – 7,38 п.л., авторских – 4,60 п.л.), в том числе 4 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Все вносимые на защиту результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 133 страницы, 52 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 153 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель работы, задачи и методы их решения, излагается краткое содержание работы по главам.

В первой главе дается общая характеристика мехатронных систем, как объектов управления, поднимается вопрос о необходимости учета упругости звеньев в задачах управления этими системами, дается обзор известных работ по использованию методов управления и системного анализа для синтеза систем управления движением, определяются цель и задачи исследований.

В настоящее время известно большое число работ, посвященных вопросам учета влияния упругой податливости звеньев при создании систем управления мехатронными машинами. Значительный вклад в развитие систем управления движением этих машин внесли известные отечественные ученые: Акимов Л.В., Бойчук Л.М., Борцов Ю.А., Бурдаков С.Ф., Бургин Б.Ш, Квартальнов Б.В., Колесников А.А., Красовский А.А., Крутько П.Д., Летов А.М., Лихоманов А.М., Мишаков В.В, Нефедов В.В., Панин С.Ю., Перегудов Ф.И., Петров Б.Н., Сабинин Ю.А., Сизых В.Н., Соколовский Г.Г., Чемоданов Б.К., Черноусько Ф.Л. и др. Среди исследований зарубежных ученых можно отметить работы: Хайманн Б., Book W.J., Dey G.K., Dey P.K., Fukuda T., Zhang Deli, Zhang X. и др.

Как показал анализ, предлагаемые в этих работах методы либо недостаточно эффективны, либо сложны в реализации, либо приводят к нарушению законов программного движения. Многие известные решения в этой области основаны скорее на инженерном опыте и интуиции, чем на научно-методологической основе

системного анализа и синтеза. В этих работах недостаточно используются такие возможности системного анализа, как выявление системных связей и установление характера взаимодействий между разнородными элементами мехатронных машин с целью их использования для реализации и обоснования наиболее оптимальных путей решения проблемы структурно-параметрического синтеза систем управления колебаниями на основе современных методов принятия решений и обработки информации.

На основе проведенного анализа определяются основная цель и задачи исследований, заключающиеся в разработке методов синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов на основе использования методов системного анализа и концепции обратных задач динамики.

Во второй главе выбираются расчетные схемы и математические модели мехатронных систем с упругими звеньями, основанные на декомпозиции управляемого движения по степеням подвижности и его разделении в направлении отдельной степени на программное и колебательное; предлагаются комплексные критерии эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями в виде аналитических зависимостей, определяющих желаемый вид колебательного движения и описывается пример использования предлагаемого подхода для синтеза алгоритмов управления двухмассовой мехатронной системы.

Структурная схема управления движением мехатронной системы в направлении отдельной степени подвижности показана на рис. 1. Приняты следующие обозначения: КВУ – компьютерный верхний уровень; КД – контроллер движения; СП – силовой преобразователь; ИД – исполнительный двигатель; УКУ – устройство компьютерного управления; ДОС – датчик обратной связи, m_1, m_k, m_n – соответственно приведенные массы привода, промежуточных и исполнительного механизмов, $k = \overline{2, (n-1)}$; c_k – приведенные коэффициенты жесткости, $k = \overline{2, n}$; d_k – коэффициенты вязкого трения, $k = \overline{1, n}$; Q_n – движущая сила привода.

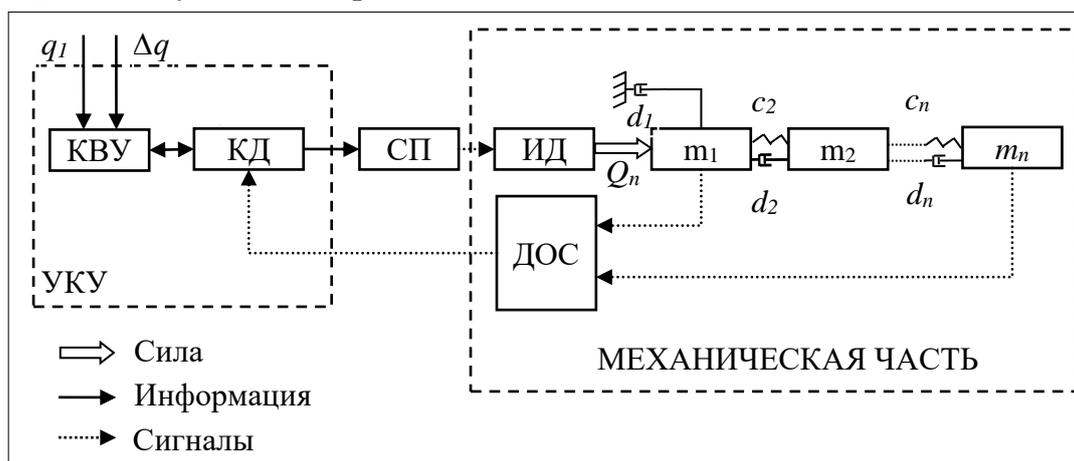


Рис. 1. Структурная схема управления движением мехатронной системы

Для формирования требований к системе управления и синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями, управляемое движение исполнительного механизма мехатронной системы представлено в виде двух составляющих: программного движения q_1 , происходящего под действием заданной движущей силы привода Q_0 при абсолютной жесткости звеньев и колебательного, обусловленного отклонением исполнительного механизма от программного движения $\Delta q = q_n - q_1$. Задача синтеза алгоритмов

управления колебательными движениями Δq может быть сведена к определению, на основе решения ОЗД, дополнительных воздействий $Q_{don.}$, позволяющих не накладывать ограничений на характер программного движения, определяемого технологическими процессами или условиями применения этих систем. Механическая часть мехатронной системы, с учетом дополнительных воздействий, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} m_2 \Delta q_1'' + m_3 (\Delta q_1'' + \Delta q_2'') + \dots + m_n (\Delta q_1'' + \dots + \Delta q_{n-1}'') + d_1 \dot{q}_1' = Q_n - (m_1 + \dots + m_n) \dot{q}_1'; \\ m_2 \Delta q_1'' - d_3 \Delta q_2' - c_3 \Delta q_2 + d_1 \dot{q}_1' = Q_n - (m_1 + m_2) \dot{q}_1'; \\ (m_2 + m_3) \Delta q_1'' + m_3 \dot{q}_{n-2}' + d_2 \Delta q_1' + c_2 \Delta q_1 = -(m_2 + m_3) \dot{q}_1'; \\ \dots \\ (m_{n-1} + m_n) (\Delta q_1'' + \dots + \Delta q_{n-1}'') + m_n \Delta q_{n-1}'' + d_{n-1} \Delta q_{n-2}' + c_{n-1} \Delta q_{n-2} = -(m_n + m_{n-1}) \dot{q}_1', \end{cases} \quad (1)$$

где $Q_n = Q_0 + Q_{don.}$; $\Delta q_i = q_{i+1} - q_i$, $i = \overline{1, n-1}$; q_1 – абсолютная координата программного движения; q_i – абсолютные координаты i -ой массы, $i = \overline{2, n}$.

При использовании двигателей постоянного тока с независимым возбуждением с учетом нелинейности упругой связи и нелинейности кривой намагничивания двигателя, система уравнений привода будет иметь вид:

$$L \frac{di_a}{dt} = E_n - C \Phi \dot{q}_1' - i_a r; \quad Q_n = C \Phi i_a; \quad w_n \frac{d\Phi}{dt} = E_\varepsilon - i_\varepsilon R_\varepsilon; \quad i_\varepsilon = f(\Phi); \quad m_1 \frac{dq_1'}{dt} = Q_n, \quad (2)$$

где L и r – эквивалентные индуктивность и активное сопротивление якорной цепи; Φ – поток возбуждения двигателя; R_ε , w_n – эквивалентное сопротивление цепи возбуждения и число витков обмотки возбуждения двигателя; C – конструктивная постоянная электродвигателя; E_n , E_ε – ЭДС преобразователей, питающих якорь двигателя и цепь возбуждения двигателя; i_a , i_ε – токи якорной цепи и цепи возбуждения двигателя.

Для задания желаемых законов изменения колебательных движений предлагается использовать конечные и дифференциальные уравнения, а также квадратичные оценки интенсивности этих движений.

Конечные уравнения колебательных движений могут быть представлены в виде экспоненциальных или гармонических функций времени, например

$$\Delta q = C e^{\lambda t}, \quad (3)$$

где $C = (C_1, \dots, C_l)$ – вектор-столбец произвольных постоянных; $e^{\lambda t} = (e^{\lambda_1 t}, \dots, e^{\lambda_l t})$ – вектор показательных функций; $\lambda_1, \dots, \lambda_j$ – различные действительные или комплексно-сопряженные числа, такие, что $\text{Re } \lambda_j < 0$.

Задание конечных уравнений колебательных движений более перспективно, чем обычно используемое в теории автоматического управления задание желаемых передаточных функций или эталонных моделей, поскольку при этом появляются более широкие возможности выбора технических средств реализации алгоритмов управления. Процедура отыскания компенсирующих воздействий по заданному виду требуемого закона не связана с необходимостью решения граничных задач и применима для широкого класса управляемых систем.

Дифференциальные уравнения колебательных движений исполнительных механизмов мехатронных систем могут заданы в виде

$$\sum_{i=0}^n \beta_i \frac{d^i \Delta q}{dt^i} = 0, \quad \beta_i = \text{const}. \quad (4)$$

Заданные дифференциальные уравнения охватывают не одно, а целый класс движений управляемых систем. Поэтому их задание позволяет реализовать либо целенаправленное изменение параметров объекта управления, либо определять адекватные управляющие воздействия.

Показано, что синтез алгоритмов управления колебаниями замкнутых мехатронных систем может быть осуществлен путем сочетания концепции ОЗД с методами аналитического конструирования оптимальных регуляторов, на основе квадратичных функционалов колебательных движений в виде

$$J = 0,5 \int_0^T (X' P X + Q_{дон}' F Q_{дон}) dt, \quad (5)$$

где X – вектор состояния упругих колебаний; $Q_{дон}$ – вектор управляющих воздействий; P, F – неотрицательно определенная и положительно определенная матрицы весовых коэффициентов, которые определяют заданный характер управляемого движения.

На примере двухмассовой расчетной схемы описывается процедура структурно-параметрического синтеза системы управления колебаниями мехатронных машин с упругими звеньями. Приводится математическая модель динамики этой системы на основе разделения абсолютного движения на апериодическую и колебательную составляющую, связанность между которыми определяется соотношением перемещающихся масс и механической характеристик приводов. Обсуждается возможность приближенного исследования упругих колебаний исполнительных механизмов электромеханических и мехатронных систем без учета их взаимной связи с программными движениями.

На основе решения ОЗД с помощью задания колебательного движения в виде гармонической функции времени определяются управляющие воздействия, обеспечивающие отсутствие колебательных движений второй массы в начале и конце периода разгона (торможения). Показывается, что найденные воздействия не зависят от структуры регулятора, в результате чего появляется возможность решения задачи не только параметрического, но и структурного синтеза системы управления движением, с помощью выражения полученных временных зависимостей через фазовые координаты. Например, путем пересчета этих воздействий в функции упругой деформации или её второй производной они могут быть реализованы с помощью замкнутых по упругой деформации или её ускорению систем управления.

Третья глава посвящена вопросам синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем с учетом упругости звеньев на основе решения ОЗД, путем задания желаемых законов колебательных движений. Анализируется влияние динамических характеристик приводов и замкнутости систем управления программным движением на эффективность управления колебаниями. Обсуждаются возможные пути практической реализации предлагаемых алгоритмов управления.

Приводятся результаты исследований алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем, синтезированных на основе задания конечных законов колебательных движений в виде (3). При этом постоянные c_i определялись по начальным значениям $\Delta q_0, \dots, \Delta q_0^{(i)}$ путем численного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 + \dots + c_l = \Delta q_0; \\ \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 + \dots + \lambda_l c_l = \Delta q_0'; \\ \dots \\ \lambda_1^{l-1} c_1 + \dots + \lambda_1^{l-1} c_l = \Delta q_0^{(l-1)}. \end{cases}$$

В качестве примера, на основе системы уравнений (1), после произведения необходимых вычислений с учетом этих новых постоянных, получены управляющие воздействия, обеспечивающие компенсацию упругих колебаний трехмассовой системы в виде:

$$Q_{\text{дон.}} = \left(\sum_{i=1}^l C_i e^{\lambda_i t} \sum_{j=0}^5 a_j \lambda_1^{5-j} \right) / \left(\sum_{i=1}^3 b_i p_i^{3-i} \right), \quad (6)$$

где $b_1 = 1$; $b_2 = 0$; $b_3 = \omega_2^2 + \omega_3^2 [1 + \gamma(n^{-1} - 1)]$; $a_0 = 1$; $a_1 = \mu$;

$a_2 = \omega_2^2 (1 + \gamma^{-1}) + \omega_3^2 [1 + \gamma(\eta^{-1} - 1)]$; $a_3 = \mu \{ \omega_2^2 + \omega_3^2 [1 + \gamma(\eta^{-1} - 1)] \}$; $a_4 = \omega_2^2 \omega_3^2 (\gamma^{-1} + \eta^{-1})$;

$a_5 = \omega_2^2 \omega_3^2 \mu$; $p = d/dt$; $\omega_2^2 = c_1/m_1$; $\omega_3^2 = c_3/m_3$; $\eta = m_1/(m_1 + m_3)$; $\mu = b_1/m_1$; $\gamma = m_1/m_2$.

Показано, что найденный закон управления (6) в виде временных зависимостей может быть реализован либо непосредственно программными средствами, либо пересчитан, путем исключения времени, в функции координат для управления по принципу обратной связи с постоянными или переменными коэффициентами. Поскольку эти коэффициенты определяются непосредственно по математической модели управляемого объекта предлагаемая система управления будет обладать свойством слабой чувствительности к параметрическим и координатным возмущениям.

Структурно-функциональная схема системы управления с дополнительными обратными связями показана на рис. 2. На этой схеме приняты следующие обозначения:

$B(p) = \sum_{i=1}^3 b_i p_i^{3-i}$, $A(p) = \sum_{i=1}^5 a_i p_i^{5-i}$.

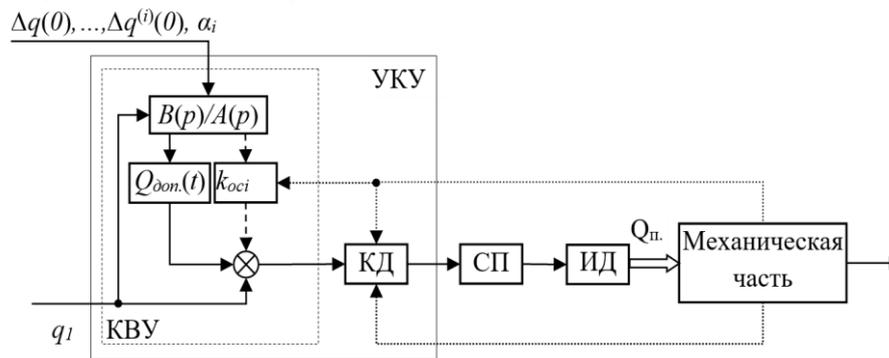


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы управления

В первом случае, на основе задания в УКУ математической модели объекта с начальными значениями и α_i вычисляются дополнительные компенсирующие воздействия $Q_{\text{дон.}}(t)$. Дополнительные сигналы в цифровой форме суммируются с сигналами программного движения q_1 и подаются на КД для дальнейшей обработки. Во втором случае, для получения дополнительных обратных связей, необходимо выразить функции времени $c_i e^{\lambda_i t}$ через упругие деформации и их производные путем дифференцирования по времени $(l-1)$ раз обеих частей уравнения (3) и подстановки полученных выражений в (6)

$$Q_{don} = \sum_{i=1}^l k_{oci} \Delta q^{(i-1)}, \quad (7)$$

где $k_{oci} = \sum_{j=0}^5 a_j \lambda_i^{5-j} / (\sum_i^3 b_i p_i^{3-i})$, $i = \overline{1, l}$.

На основе полученных сигналов от датчиков упругих деформаций, найденных коэффициентов усиления дополнительной обратной связи k_{oci} и их проверки на устойчивость с помощью критерия Гурвица, управляющие воздействия подаются на КД.

Для проверки эффективности предложенного алгоритма было проведено численное моделирование трехмассовой системы на основе уравнений (1) с учетом (7) в среде *Matlab Simulink* для различных параметров исходной системы. Входное воздействие задавалось в виде $Q_0 = 1(t)$ при $t \leq 0,25c$ и $Q_0 = 0$ при $t > 0,25c$.

Как показали исследования, дополнительные воздействия (7) позволили уменьшить амплитуды упругих колебаний, сократить длительность переходных процессов, не оказывая существенного влияния на характер абсолютного движения. Показано, что повышение частоты второй массы ω_3 и коэффициента η несколько снижает эффективность управления, а увеличение частоты третьей массы ω_2 или коэффициентов γ , μ приводит к повышению эффективности предложенного алгоритма. Уменьшение коэффициентов α_i в пределах устойчивости системы повышает эффективность управления.

В качестве иллюстрации, на рис. 3 приведены графики упругих колебаний при следующих параметрах $\omega_2 = 18$; $\omega_3 = 14$; $\mu = 0,05$; $\eta = 0,24$; $\gamma = 0,15$, а на рис. 4 графики абсолютного движения. Сплошные линии – движения без компенсирующего воздействия, а штриховые – с дополнительным воздействием на основе задания конечных уравнений колебательного движения.

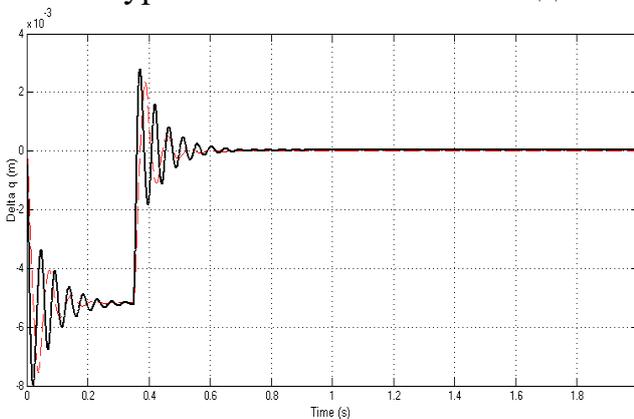


Рис. 3. Графики упругих колебаний

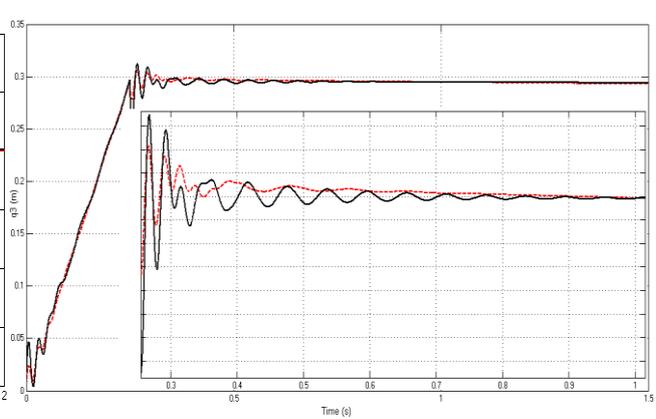


Рис. 4. Графики абсолютного движения

Из этих графиков следует, что дополнительные воздействия снижают интенсивность колебаний и уменьшают длительность переходных процессов. На рис. 3 декремент упругих колебаний увеличился с $\delta_0 = 0,33$ для исходной системы до $\delta_1 = 0,69$ для системы с компенсирующим воздействием; из рис. 4 следует, что дополнительное управление обеспечивает быстрое достижение установившего положения, сокращает длительность переходных процессов и время регулирования (величины перерегулирования уменьшились с $0,5c$ до $0,2c$ и с $1,06$ до $1,03$ соответственно).

Описываются результаты исследований алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем на основе задания дифференциальных уравнений колебательных движений в виде (4). Показано, что выбор требуемых дифференциаль-

ных уравнений движения замкнутой системы, удовлетворяющих сформулированным критериям эффективности управления, можно осуществлять либо на основе интегральных уравнений Вольтерра II рода, не требующих определения характеристических чисел и позволяющих построить специальные функции переходного процесса, либо на основе использования метода Н.П. Еругина, который позволяет построить уравнения движения механической системы по заданным свойствам одного из возможных движений этой системы. Показано, что требуемое движение может быть реализовано путем выделения старшей производной эталонного уравнения, представленного в виде (4), и подстановки последнего в систему (1). Для трехмассовой расчетной схемы это управление может быть представлено в виде

$$Q_{дон} = C_4 vp / (p + u), \quad (8)$$

где $C_1 = -\beta_0 \int_0^t \Delta q dt$, $C_2 = \int_0^t (C_1 - \beta_1 \cdot \Delta q) dt$, $C_3 = \int_0^t (C_2 - \beta_2 \cdot \Delta q) dt$, $C_4 = C_3 - \beta_3 \cdot \Delta q - \beta_4 \cdot \Delta q' - \Delta q^{(2)}$, $u = 6/\tau_m$, $v = 18/b_0 \tau_m^2$, $\tau_m = 1/\max|p_\mu|$, p_μ – корни характеристического уравнения управляемой системы.

Структурная схема системы с обратной связью по старшей производной показана на рис. 5.

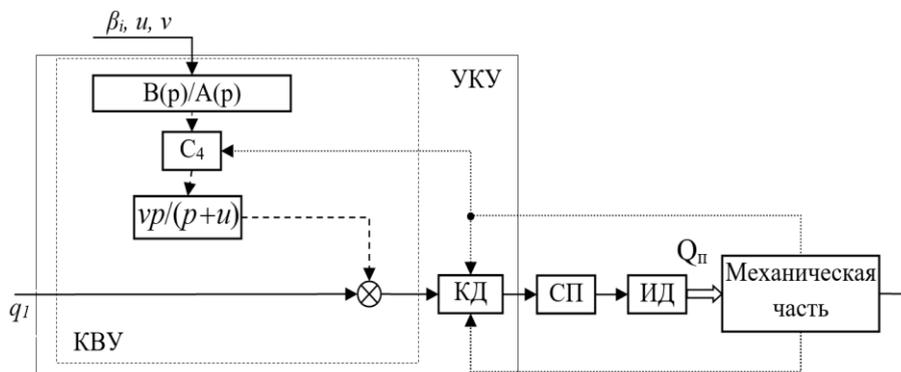


Рис. 5. Структурная схема управления с обратной связью по старшей производной

Как видно из этой структурной схемы, полученный закон (8) реализуется по принципу обратной связи с коэффициентами усиления β_i по упругой координате Δq и её производным до второго порядка.

Проведенное численное моделирование при различных параметрах исходной системы с воздействием показало, что при изменении параметров исходной системы эффективность управления движением мехатронной системы сохраняется.

Для синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем, описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка, целесообразно использовать метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов в сочетании с концепцией ОЗД, что связано с необходимостью вычисления квадратичных оценок колебательных движений.

С целью облегчения этой задачи, разработан алгоритм упрощения расчетных схем этих систем с помощью метода электромеханических аналогий, блок-схема

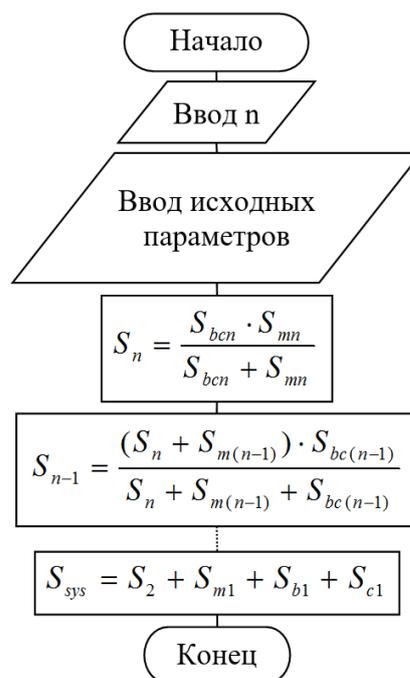


Рис. 6. Алгоритм вычисления сопротивления системы – S_{sys}

которого показана на рис. 6. При этом роль токов играют скорости движения масс, а роль напряжений – силы.

В отличие от обычных используемых эквивалентных замен типа «звезда – треугольник» или «треугольник – звезда» предложенный алгоритм вычисления комплексного сопротивления системы основан на непосредственном преобразовании расчетной схемы, в результате чего отношения W между токами через массы m_n (i_n) и m_l (i_l) имеют вид

$$W = \frac{S_{bcn}}{S_{bcn} + S_{mn}} \frac{S_{bc(n-1)}}{S_n + S_{m(n-1)} + S_{bc(n-1)}} \dots \frac{S_{bc2}}{S_3 + S_{m2} + S_{bc2}}, \quad (9)$$

где $S_m = Q_m / q_m' = mp$, $S_b = Q_b / q_b' = b$, $S_c = Q_c / q_c' = c / p$ (q_m' , q_b' , q_c' – соответственно скорости перемещения массы, точек крепления демпфера и пружины; Q_m , Q_b , Q_c – соответственно силы инерции, вязкого трения и упругости), $S_{bc} = S_b + S_c$, $p = d/dt$.

С учетом (9) отклонение токов $\Delta i = i_n - i_1$ может быть представлено в виде

$$\Delta i = (W - 1)i_1 \quad \text{или} \quad \Delta i = (W - 1)Q_0 / S_{sys}. \quad (10)$$

Вычисляя с помощью предложенного алгоритма сопротивление системы S_{sys} , на основе выражений (9) и (10) можно найти отклонение токов, которое в матричной форме примет вид:

$$\begin{aligned} X' &= AX + BQ_{don}; \\ Y &= CX + DQ_{don}, \end{aligned}$$

где X – вектор упругих отклонений; Y – вектор выхода; Q_{don} – вектор управляющих воздействий; A – матрица параметров системы; B – вектор коэффициентов усиления дополнительных воздействий; C – матрица выхода; D – матрица непосредственного воздействия входа на выход.

С помощью последних выражений можно определить компенсирующие воздействия, обеспечивающие минимум функционала (5)

$$Q_{don} = -F^{-1} B' K X. \quad (11)$$

где $B = [b_i]$; $F = [f_{il}]$; $K = [k_{ij}]$, $i, j = \overline{1,5}$ – решение стационарного матричного уравнения Риккати.

В качестве примера, были найдены дополнительные управляющие воздействия для трехмассовой мехатронной системы

$$\begin{aligned} Q_{don} = & [(b_1 k_{12} + b_3 k_{14}) \Delta q + (b_1 k_{22} + b_3 k_{24}) \Delta q' + (b_1 k_{23} + b_3 k_{34}) \Delta q'' + \\ & + (b_1 k_{24} + b_3 k_{44}) \Delta q^{(3)} + (b_1 k_{25} + b_3 k_{45}) \Delta q^{(4)}] f_{11}. \end{aligned} \quad (12)$$

Проведено исследование эффективности этих воздействий при различных значениях параметров исходной системы с входным сигналом $Q_0 = I(t)$ и нулевыми начальными условиями. Результаты исследований показали, что увеличением коэффициентов матрицы P или уменьшением f_{11} можно добиться желаемого вида колебательного движения.

В качестве иллюстрации сказанного, на рис. 7 приведены графики упругих колебаний при параметрах $\omega_2 = 16$; $\omega_3 = 12$; $\eta = 0,5$; $\gamma = 1$; $\mu = 0,1$. Кривые 1 – обозначают движение без дополнительного управляющего воздействия, а кривые 2 – при его наличии. Из графиков видно увеличение эффективности затухания колебаний при использовании дополнительного воздействия.

Проведено исследование влияния динамических характеристик приводов и замкнутости системы программного управления на эффективность управления упругими колебаниями. Показано, что увеличение постоянной времени приводов, а также наличие главной обратной связи по управляемой координате хотя и при-

водят к некоторому снижению эффективности управления упругими колебаниями, однако и в этих случаях она сохраняется на желаемом уровне.

В заключительной части главы предлагается алгоритм и программа структурно-параметрического синтеза систем управления колебаниями мехатронных машин с упругими звеньями, полученные на основе проведенных исследований.

В четвертой главе обсуждаются возможные пути технической реализации предлагаемых алгоритмов управления колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями и приводятся результаты численного моделирования их эффективности на примере электромеханического робота с позиционной системой управления.

Показано, что наиболее просто предлагаемые алгоритмы управления колебаниями мехатронных систем реализуются с помощью цифровых систем управления. В этом случае сигналы дополнительных воздействий в цифровой форме можно непосредственно суммировать с сигналами, определяющими программное управление и подавать на контроллеры и силовые блоки приводов движения. При использовании замкнутых систем управления с главной обратной связью по валу привода или валу исполнительных механизмов возникает необходимость преобразования полученных временных зависимостей для компенсирующих воздействий в функции упругих деформаций и использования датчиков упругих колебаний (ДУК). Решение проблемы упрощается для режимов позиционирования, когда появляется возможность отключения главной обратной связи.

Определяются возможности использования предлагаемых алгоритмов для управления колебательными движениями электромеханического промышленного робота «Электроника НЦТМ–01». Описываются необходимые доработки штатной системы управления движением и результаты экспериментальных исследований жесткостных характеристик и свободных колебаний исполнительного механизма робота для получения адекватной математической модели объекта управления.

Показано, что в направлении выдвижения рабочего органа робота расчетная схема исполнительного механизма может быть представлена в виде трехмассовой системы с переменными жесткостными и инерционными параметрами. Получена *Simulink*-модель системы управления движением для этой степени подвижности и проведены исследования эффективности предложенных алгоритмов управления колебаниями в режиме позиционирования. При этом исследовались амплитудные спектры и продолжительность колебательных движений при различных положениях рабочего органа робота, а также влияние запаздывания сигнала управления, вносящегося в систему техническими или программными средствами

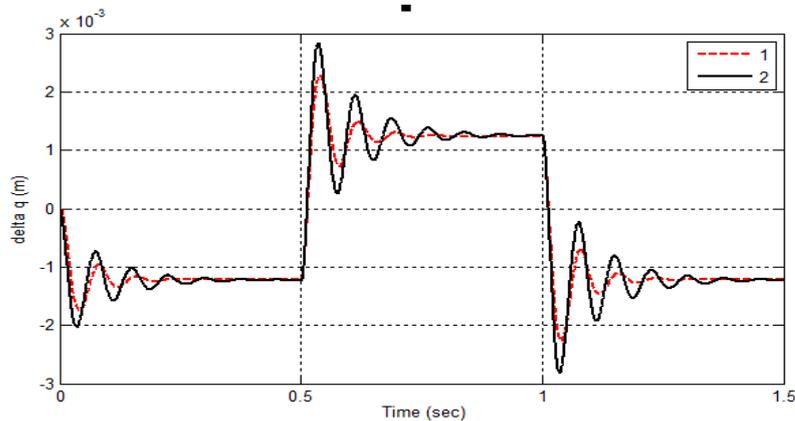


Рис. 7. Графики упругих колебаний

Проведенные исследования показали, что предложенные алгоритмы управления движением позволяют более чем в 1,5 раза снизить интенсивность и продолжительность колебательных движений исполнительного механизма робота по сравнению с традиционным управлением. При этом изменение параметров исполнительного механизма при различных положениях рабочего органа не приводило к существенному снижению эффективности управления упругими колебаниями. Определены допустимые пределы повышения временной задержки сигналов управления.

В качестве иллюстрации, на рис. 8 приведены графики упругих колебаний при втянутом (рис. 8, а) и выдвинутом (рис. 8, б) положениях рабочего органа, а на рис. 9 – график движения рабочего органа. Сплошные линии на этих графиках соответствуют движению исходной системы при воздействии $Q_0=I(t)$, а штриховые – движению с дополнительным воздействием.

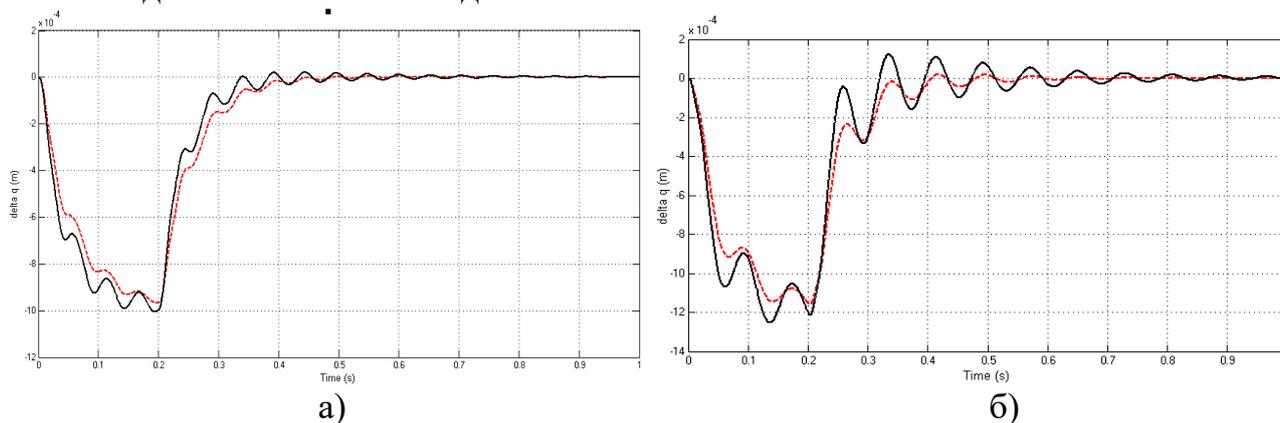


Рис. 8. Графики упругих колебаний

Из графиков видно, что дополнительное воздействие позволяет уменьшить амплитуды и продолжительность упругих колебаний: декременты колебаний увеличились со значения $\delta_0 = 0,45$ до $\delta_1 = 0,89$ (см. рис. 8, а) при втянутом и с $\delta_0 = 0,55$ до $\delta_1 = 1,13$ (см. рис. 8, б) – при выдвинутом положениях рабочего органа.

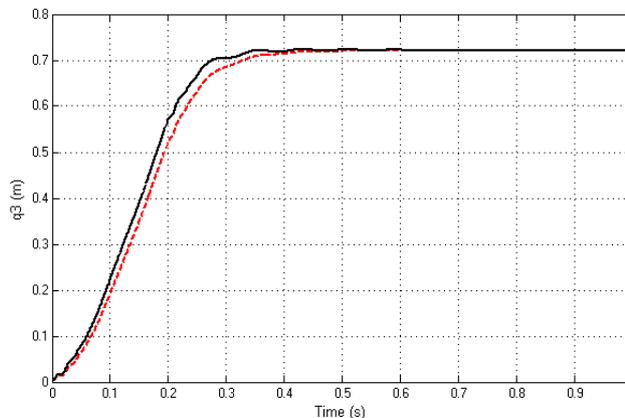


Рис. 9. График программного движения

При этом сокращается и время переходного процесса (см. рис 9). Уменьшение интенсивности колебательных движений и сокращение длительности переходных процессов позволят повысить быстродействие, точность работы и эффективность применения промышленного робота.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан единый подход к задаче синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем с упругими звеньями, основанный на развитии и использовании методов системного анализа и обратных задач динамики. Это позволяет определять требуемые управляющие воздействия, которые не накладывают ограничений на характер программного движения.

2. Предложены комплексные критерии эффективности систем управления дви-

жением мехатронных машин с упругими звеньями в виде заданных интегральных кривых или дифференциальных уравнений колебательных движений, которые позволяют учесть все основные показатели качества переходных процессов.

3. Разработан алгоритм управления движением мехатронных машин с упругими звеньями, основанные на определении не зависящих от структуры регулятора потребных управляющих воздействий путем решения обратных задач динамики по заданному виду колебательного движения. Реализованы процедуры структурно-параметрического синтеза систем управления движением этих машин, обладающие свойствами слабой чувствительности к параметрическим и координатным возмущениям.

4. Предложен способ упрощения математических моделей колебательных движений многомассовых мехатронных систем, основанный на использовании метода электромеханических аналогий.

5. Предложены алгоритмы и разработана моделирующая программа структурно-параметрического синтеза управления колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями.

6. Предложенные алгоритмы управления движением мехатронных систем с упругими звеньями позволяют в 1,5–2 раза снизить интенсивность и продолжительность колебательных движений исполнительных механизмов в переходных режимах работы, а также повысить быстродействие, точность работы и эффективность их применения.

7. Эффективность предлагаемых алгоритмов управления колебаниями мехатронных систем с учетом упругости звеньев подтверждена результатами численного моделирования процессов управления на примере серийной модели электромеханического промышленного робота.

8. Предложенные алгоритмы и программы управления колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями прошли апробацию и используются в учебном процессе Братского государственного университета на кафедре «Управление в технических системах» и Иркутского национального исследовательского технического университета, для подготовки инженеров и бакалавров на кафедрах «Соппротивление материалов и строительной механики» и «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы», а также нашли отражение в проекте региональной программы развития Иркутской области на период до 2030г.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ

1. **Ле Ба Хань.** Синтез алгоритмов управления колебаниями мехатронных систем на основе задания экспоненциальных законов изменения упругих координат / Н.К. Кузнецов, Ле Ба Хань // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №10. – С. 43-47.

2. **Ле Ба Хань.** Управление колебательными движениями мехатронных систем на основе задания дифференциальных уравнений движения исполнительных механизмов / Н.К. Кузнецов, Ле Ба Хань // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №6. – С. 21-26.

3. **Ле Ба Хань.** Синтез алгоритмов управления колебаниями многомассовых мехатронных систем на основе интегральных квадратичных оценок / Н.К. Кузнецов, Ле Ба Хань // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №12. – С. 83-88.

4. **Ле Ба Хань.** Применение метода электромеханических аналогий для синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями многомассовых мехатронных систем / Н.К. Кузнецов, Ле Ба Хань // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – №2. – С. 31-37.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

5. Свидетельство ОГРП для ЭВМ №2014613718. Программа синтеза алгоритмов управления движением многомассовых мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2014 г.

Публикации в других изданиях

6. **Ле Ба Хань**. Разработка алгоритмов управления колебаниями мехатронных систем на основе концепции обратных задач динамики. постановка задачи исследований / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: материалы. Всерос. научно-практической конф. – Иркутск. – 11-13 апреля 2012. – С. 196-202.

7. **Ле Ба Хань**. Компенсация упругих колебаний мехатронных систем на основе управления по старшей производной / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: матер. Всерос. научно-практической конф. – Иркутск. – 11-12 апреля 2013. – С. 205-209.

8. **Ле Ба Хань**. Управление упругими колебаниями трехмассовой мехатронной системы на основе решения обратной задачи динамики / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Механики – XXI веку. – Братск. – 14-16 мая 2013. – С. 24-27.

9. **Ле Ба Хань**. Разработка программы управления колебаниями трехмассовой мехатронной системы / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // V Международной конференции "Математика, её приложения и математическое образование". – Улан-Удэ. – 23-28 июня 2014. – С. 171-175.

10. **Ле Ба Хань**. Синтез алгоритмов управления колебаниями мехатронных систем на основе использования метода электромеханических аналогий / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: матер. Всерос. научно-практической конф. – Иркутск. – 10-12 апреля 2014. – С. 167-172.

11. **Ле Ба Хань**. Синтез алгоритмов управления упругими колебаниями многомассовых мехатронных систем на основе концепции обратных задач динамики / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Сборник научных трудов I международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск. – 2-6 декабря 2014 г. – С. 90-93.

12. **Ле Ба Хань**. Исследование эффективности алгоритмов управления упругими колебаниями многомассовых мехатронных систем на основе концепции обратных задач динамики / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань**, Нгуен Ш.Х. // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: матер. Всерос. научно-практической конф. – Иркутск. – 16-18 апреля 2015. – С. 341-347.

13. **Ле Ба Хань**. Системный подход в задачах синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем / Н.К. Кузнецов, **Ле Ба Хань** // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: матер. Всерос. научно-практической конф. – Иркутск. – 13-16 апреля 2016. – С. 311-316.

Подписано в печать 07.10.2016. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Зак. 244. Поз. плана 8н.

Отпечатано в типографии издательства

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный

исследовательский технический университет»

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83