

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИРКУТСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЛЕ БА ХАНЬ

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

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Кузнецов Н.К.**

Иркутск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Анализ методов синтеза систем управления движением объектов с учетом упругости конструкций	12
1.1. Особенности современных мехатронных машин как объекта управления	12
1.2. Систематизация методов управления движением мехатронных устройств с учетом упругости звеньев	19
1.3. Концепция обратных задач динамики – эффективный инструмент реализации методов системного анализа в задачах управления движением мехатронных систем с упругими звеньями.....	25
1.4. Цель и задачи исследований	32
Глава 2. Структурно-параметрический синтез систем управления упругими колебаниями на основе концепции обратных задач динамики.....	36
2.1. Выбор расчетных схем и математических моделей движения исполнительных механизмов мехатронных систем	36
2.2. Выбор критериев эффективности управления мехатронными системами.....	40
2.3. Определение компенсирующих воздействий в двухмассовой мехатронной системе на основе решения обратных задач динамики	43
2.4. Структурно-параметрический синтез системы управления движением.....	50
2.5. Выводы	57
Глава 3. Разработка и исследование эффективности алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем	58

3.1. Исследование алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем на основе задания конечных законов колебательных движений.....	58
3.2. Разработка алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем на основе задания дифференциальных уравнений колебательных движений.....	64
3.3. Использование метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов в задачах синтеза управления мехатронными системами	72
3.4. Исследование влияния динамических характеристик приводов и замкнутости системы управления на эффективность управления движением.....	84
3.5. Разработка алгоритма и программы структурно-параметрического синтеза систем управления	88
3.6. Выводы	92
Глава 4. Численное исследование эффективности алгоритмов управления упругими колебаниями электромеханического робота	93
4.1. Особенности реализации законов управления колебательными движениями исполнительных механизмов промышленных роботов	93
4.2. Математическая модель и идентификация параметров электромеханического робота с учетом упругих звеньев.....	97
4.3. Исследование эффективности систем управления колебаниями электромеханического робота	103
4.4. Выводы	110
Заключение	111
Библиографический список	113
Приложение	130

ВВЕДЕНИЕ

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. К ним можно отнести станки с числовым программным управлением, автоматические транспортные, складские и измерительные комплексы, гибкие производственные модули, автооператоры, промышленные и транспортные роботы и др.

В отличие от обычных машин, предназначенных для реализации явно выраженного установившегося движения, мехатронные системы представляют собой совокупность подсистем двигательного, передаточного и исполнительного механизмов с системой автоматического управления и позволяют осуществлять механическое движение любой сложности, в том числе и управляемые переходные режимы. Рост рабочих скоростей и нагрузок этих машин, 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. Решение этой проблемы осложняется разнородностью механических и электронных элементов и различным характером взаимодействия этих элементов, большим количеством управляемых координат, переменностью структуры и параметров исполнительных механизмов мехатронных машин.

К настоящему времени предложено большое число различных способов синтеза управления колебаниями мехатронных систем, вызванными упругой податливостью исполнительных механизмов. Большой вклад в этой области внесли известные отечественные ученые: Акимов Л.В., Бойчук Л.М., Борцов Ю.А., Бурдаков С.Ф., Бургин Б.Ш, Квартальнов Б.В., Ключев В.И., Колесников А.А., Кра-

совский А.А., Крутько П.Д., Летов А.М., Лихоманов А.М., Мишаков В.В, Нефедов В.В., Панин С.Ю., Петров Б.Н., Писарев А.Ю, Путов В.В, Ривин Е.И., Сабинин Ю.А., Сизых В.Н., Соколовский Г.Г., Челпанов И.Б., Чемоданов Б.К., Черноусько Ф.Л., Чиликин М.Г. 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., Yang Haiqiang и др.

В этих работах, проблема ограничения упругих колебаний решается путем обеспечения плавных законов программного движения; использования обратных связей по упругим деформациям; применения метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов; частотных и спектральных методов синтеза; методов передаточных функций и модального управления; методов на основе функций Ляпунова; методов оптимального, адаптивного, робастного и инвариантного управлений и т.д. Для характеристики эффективности и качества системы управления в указанных выше методах используются либо прямые показатели, такие, как время регулирования, величина перерегулирования, статическая ошибка, либо косвенные (интегральные, корневые) критерии качества. Применение косвенных критериев не всегда оказывается оправданным и пригодным для технических приложений. Это связано с тем обстоятельством, что до настоящего времени, в общем случае, не решена проблема выбора весовых коэффициентов в интегральных критериях и желаемого расположения полюсов замкнутой системы управления в корневых методах, гарантирующих заданные первичные показатели качества.

Как показал анализ, предлагаемые методы 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.

Таким образом, ограниченные возможности существующих методов синтеза систем управления упругими колебаниями и отсутствие адекватного формирования критериев качества, требуют разработки новых способов синтеза на основе непосредственного задания характера управляемого движения, определяющего требуемое качество функционирования системы управления.

В этой связи весьма перспективным представляется подход к решению проблемы синтеза алгоритмов управления движением упругих мехатронных систем, основанный на применении концепции обратных задач динамики (ОЗД), обеспечивающей возможность реализации непосредственных критериев эффективности систем управления движением. В настоящей работе поставлена задача синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем с учетом упругости звеньев, основанных на использовании системного подхода с помощью задания не зависящих от структуры регулятора аналитических зависимостей, обеспечивающих желаемый вид колебательного движения путем решения обратных задач динамики по определению потребных управляющих воздействий.

Работа выполнялась на кафедре «Конструирование и стандартизация в машиностроении» Иркутского национального исследовательского технического университета, в рамках государственной НИР §47/438. «Расширение функциональных возможностей машин методами управляемой механики» от 01.01.2012.

Объект исследования – системы управления движением мехатронных машин с учетом упругости звеньев.

Предмет исследования – алгоритмы управления колебательным движением исполнительных механизмов.

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

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи.

1. Выбор расчетных схем и декомпозиция математических моделей движения исполнительных механизмов мехатронных машин с учетом упругости звеньев.

2. Выбор непосредственных 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. Разработка математической модели электромеханического робота с учетом упругости звеньев и компьютерное моделирование процессов управления упругими колебаниями.

Методика исследований

При проведении диссертационного исследования применялись методы системного анализа, теории автоматического управления и математического

моделировании. Для реализации программной системы использована среда разработки *Matlab* и его пакет *Simulink*.

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.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.01: п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» и п. 7 «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем».

Научная новизна работы

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.

Практическая ценность полученных результатов

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, гибкие производственные модули и т.д.

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 веку»

(Братск, 2013 г.), на I международной научной конференции молодых ученых (Новосибирск, 2014 г.).

Публикации. Основные научные и практические результаты работы изложены в 13 статьях, включая 4 публикации из перечня научных журналов, рекомендованных ВАК, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 153 наименования и приложения. Объем работы составляет 133 страницы; 52 рисунка и 2 таблицы.

В первой главе анализируются особенности мехатронных машин как объектов управления, обосновывается необходимость учета упругости звеньев, обсуждаются известные методы синтеза систем управления упругими колебаниями исполнительных механизмов этих машин. На основе проведенного анализа определяются основная цель и задачи исследований, заключающиеся в синтезе алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов на основе решения обратных задач динамики и методов системного анализа.

Во второй главе выбираются расчетные схемы и математические модели мехатронных систем с упругими звеньями, основанные на декомпозиции управляемого движения на программное и колебательное и учитывающие динамические взаимодействия основных механических, электронных и информационных элементов. Предлагаются непосредственные критерии эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями в виде аналитических зависимостей, определяющих желаемый вид колебательного движения, не накладывающие ограничений на характер программного движения, определяемого технологическими процессами или условиями применения этих машин. На примере двухмассовой расчетной схемы обсуждается процедура структурно-параметрического синтеза системы управления колебаниями мехатронных машин с упругими звеньями.

Третья глава посвящена вопросам синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем с учетом упругости звеньев на основе решения ОЗД. Производится оценка эффективности управления упругими колебаниями мехатронных систем при различных вариантах задания колебательных движений и различных параметрах этих систем. Анализируется влияние динамических характеристик приводов и замкнутости систем управления программным движением на эффективность управления колебаниями. Обсуждаются возможные пути практической реализации предлагаемых алгоритмов управления.

В четвертой главе на примере электромеханического робота с позиционной системой управления приводятся результаты исследований эффективности предложенной системы управления колебаниями. Методом пассивного эксперимента выполняется идентификация основных параметров математической модели робота, производится численное моделирование эффективности алгоритмов управления колебаниями и обсуждаются полученные результаты.

Глава 1. Анализ методов синтеза систем управления движением объектов с учетом упругости конструкций

1.1. Особенности современных мехатронных машин как объекта управления

Автоматизация производственных процессов и развитие компьютерного управления движением привели к появлению нового класса машин и технологического оборудования автоматического действия, основанных на интеграции механических, электронных и информационных элементов. К ним можно отнести станки с числовым программным управлением, автоматические транспортные, складские и измерительные комплексы и промышленные роботы, многооперационные станки, автооператоры, промышленные роботы и манипуляторы [53, 58, 117, 118, 128] и др.

Следует отметить, что на начальном этапе появления, 60-е годы прошлого века, подобные машины не относятся к «мехатронной» категории, поскольку этот термин появился значительно позже и большинство функции в них реализовывалось, в основном механическим путем. В дальнейшем, по мере вытеснения механических узлов электронными и компьютерными компонентами начал осуществляться постепенный переход от механических к мехатронным технологиям создания управляемых машин [48].

В мехатронных системах укрупненно принято выделять три составные подсистемы - механическую, электронную и компьютерную, объединение которых и образует систему в целом (рис. 1.1). Наличие этих компонентов является первичным признаком, отличающим от остальных традиционных систем.

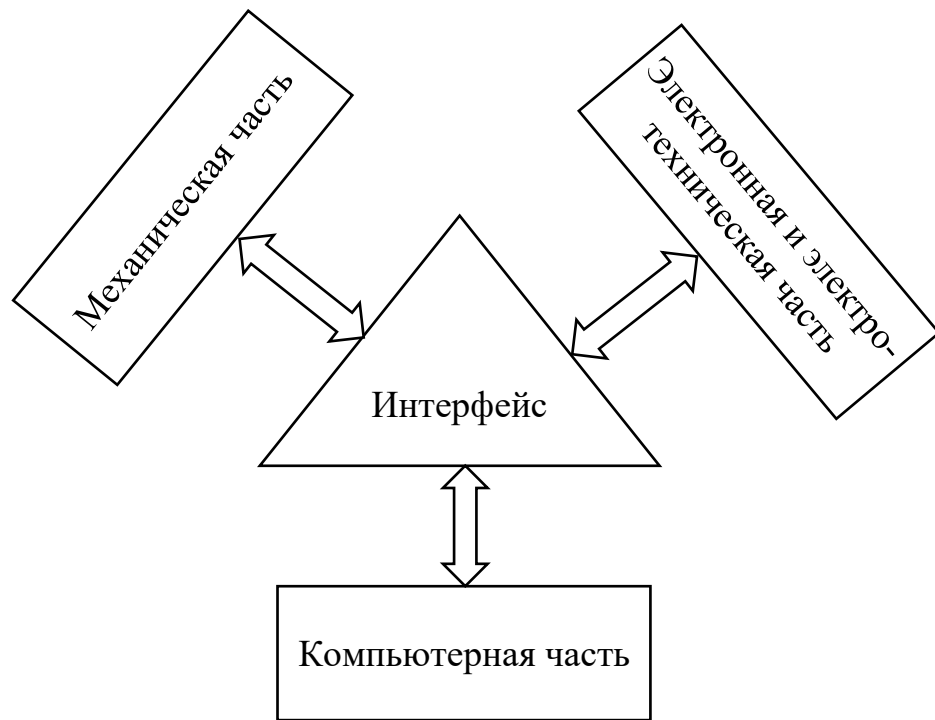


Рис. 1.1. Компоненты мехатронных систем

Обобщенная структура мехатронной системы представляется в виде на рис.1.2 [117].

При рассмотрении функциональности этих подсистем часто учитываются четыре части:

- механическое устройство представляет собой многозвенный;
- блок приводов, включающий в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
- информационное устройство предназначенное для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении машины и о фактическом состоянии ее подсистем;
- устройство компьютерного управления, представляющее собой комплекс аппаратных и программных средств для выработки сигналов управления приводами машины.

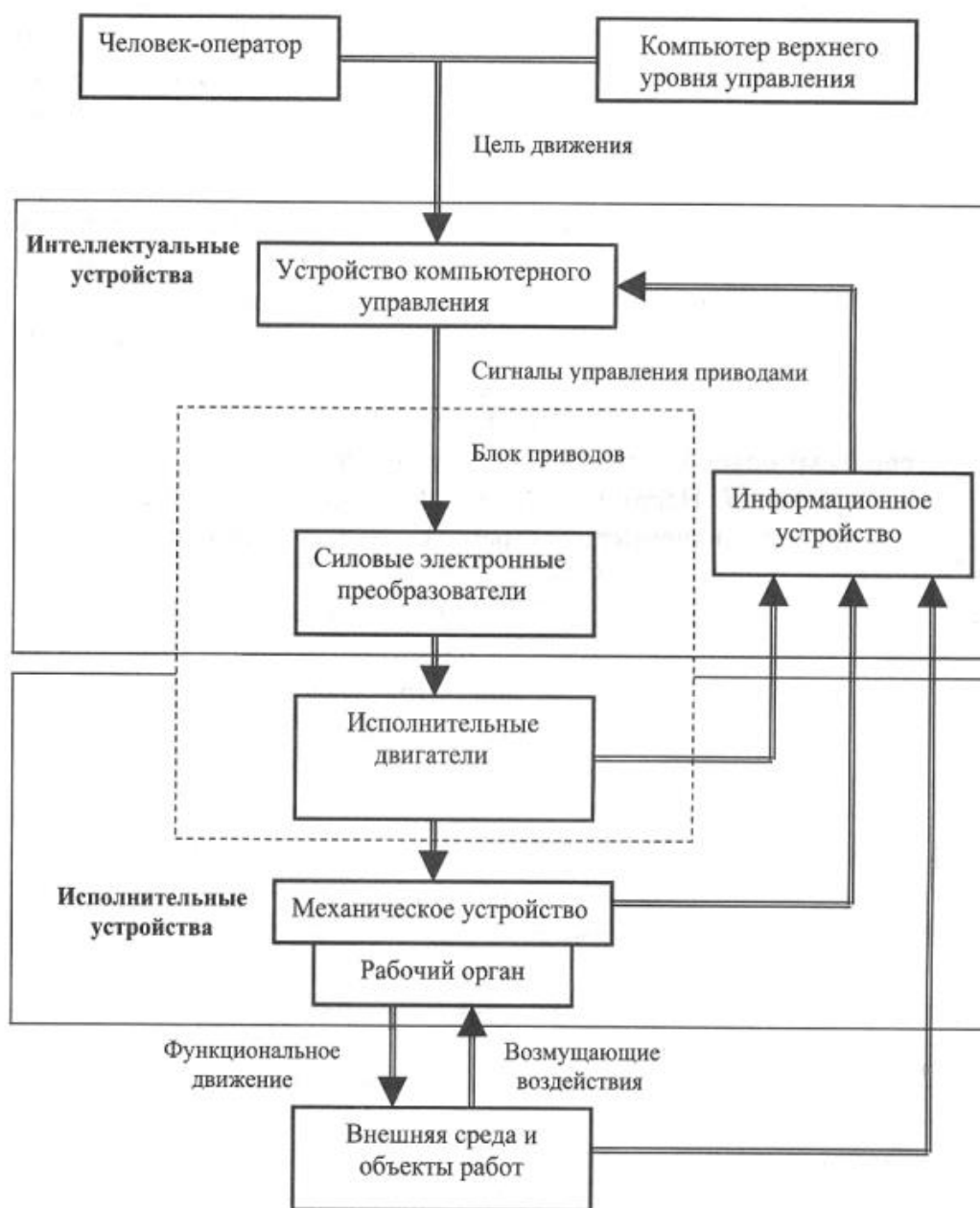


Рис. 1.2. Обобщенная структура мехатронных машин

Механическое устройство и двигатели объединены в группу исполнительных устройств. В состав группы интеллектуальных устройств включены электронная, управляющая и информационная части машин.

Устройство компьютерного управления – комплекс аппаратных и программных средств, предназначенных для выработки сигналов управления исполнительными двигателями. Управление движением реализуется не с помощью

операционных усилителей, а посредством либо специальных микропроцессорных типа цифровых сигнальных процессоров (DSP- Digital signal processing) или контролеров движения (motion controller), либо персональных компьютеров (типа PC-NC) [118].

Использование цифровых регуляторов позволяет, с одной стороны, обеспечить высокие скорости вычислений и производить цифровую обработку сигналов в реальном масштабе времени, а с другой стороны, реализовать более сложные, в том числе, интеллектуальные алгоритмы управления движением. К числу последних можно отнести и алгоритмы так называемого «бессенсорного» управления, т.е. управления на основе компьютерных моделей процессоров в исполнительном устройстве без использования датчиков обратных связей [118].

Силовые электронные преобразователи являются связующим звеном между устройством компьютерного управления и исполнительными двигателями. Они выполняют функции преобразования сигналов управления, защиты в аварийных режимах и диагностики.

Информационное устройство предназначено для сбора и передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии внешней среды и движущейся мехатронной машины.

Согласно этой блок-схеме имеются три группы сенсоров в информационном устройстве:

- 1) датчики информации о состоянии внешней среды и объектов работ;
- 2) датчики информации о движении механической части;
- 3) датчики обратной связи блока приводов.

Механическое устройство мехатронной машины, являющееся объектом управления, представляет собой многозвенный механизм в виде замкнутой или разомкнутой кинематической цепи с несколькими степенями подвижности, число которых определяется количеством подвижных звеньев и классом кинематических пар. Движение рабочего органа как конечного управляемого звена

обеспечивается взаимосвязанными (кинематически и динамически) перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства.

В состав механического устройства также могут входить механические передачи движения от исполнительных приводов к подвижным звеньям в виде зубчатых, планетарных и волновых редукторов, шарико-винтовых и фрикционных передач, валов и других передаточных элементов.

Наличие развитого программного управления в мехатронных системах позволяет обеспечить большее разнообразие выполняемых движений, большие диапазоны изменения скоростей и нагрузок и более высокую точность. Так число одновременно управляемых координат составляет 10 и выше *м/с*, скорости вращения шпинделей современных станков достигают 9000-250000 оборотов в минуту, точность позиционирования до 1 *мкм*.

Высокие скорости движения и значительные динамические нагрузки вызывают необходимость учета упругих свойств элементов механических устройств современных мехатронных машин в системах управления движением. В наибольшей степени это относится к исполнительным механизмам промышленных роботов из-за разомкнутости кинематической цепи, которая приводит к уменьшению жесткостных характеристик и консольному характеру приложения действующих сил. Необходимость учета упругости звеньев и механических передач движения возникает и в задачах управления движением современных многоцелевых станков, прокатных станов, грузоподъемных машин и другого технологического и транспортного оборудования [78, 93, 113].

Особенностью механического устройства мехатронной машины, как объекта управления, также является то обстоятельство, что движущие силы и моменты сил зачастую не могут непосредственно прикладываться к звеньям, движение которых определяется заданной программой [61, 101, 112]. Например, в промышленных роботах обычно задается движение рабочего органа, который

находится на конце кинематической цепи манипулятора, а приводы располагаются на основании или промежуточных звеньях [117, 141]. Так, у промышленного робота модели Тур-10 (см. рис. 1.3) приводы 6–9, располагающиеся на неподвижной раме 1, осуществляют заданное перемещение рабочего органа 5 через промежуточные звенья 2–4. Это, с одной стороны, увеличивает упругие свойства конструкции, а, с другой стороны, снижает эффективность управления.

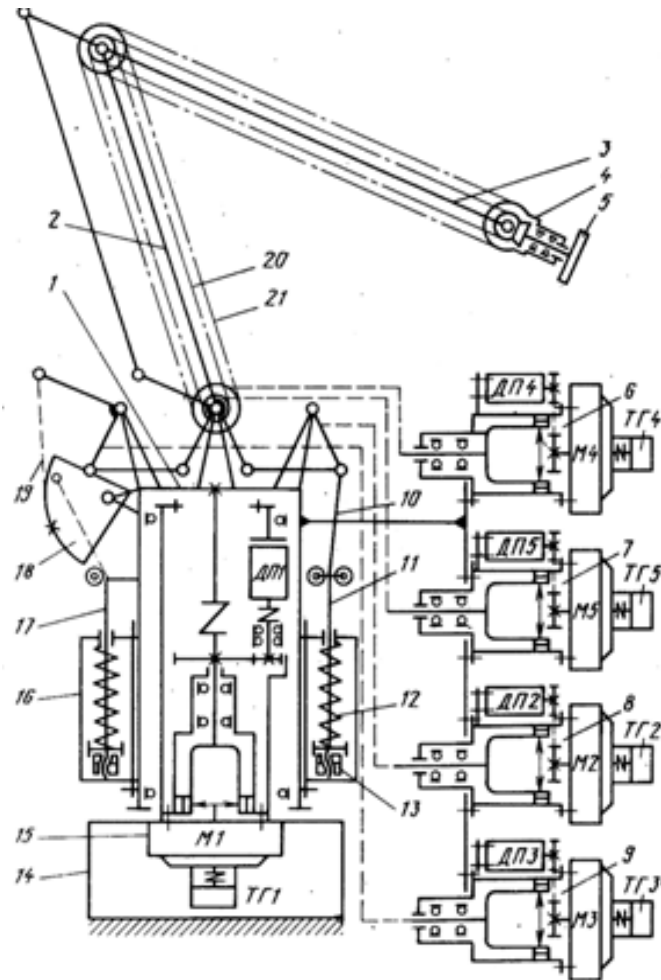


Рис.1.3. Кинематическая схема манипулятора ТУР–10

Исполнительные механизмы металлорежущих станков также являются многомассовыми системами со многими степенями подвижности. В качестве примера, на рис. 1.4 приведена схема исполнительного механизма фрезерного станка для двух координатных плоскостей. Принятые обозначения m , h ,

C с индексами – приведенные массы, коэффициенты сопротивления и жесткости элементов по координатным направлениям 1 – консоль, 2 – салазки, 3 – стол, 4 – шпиндель [93, 113].

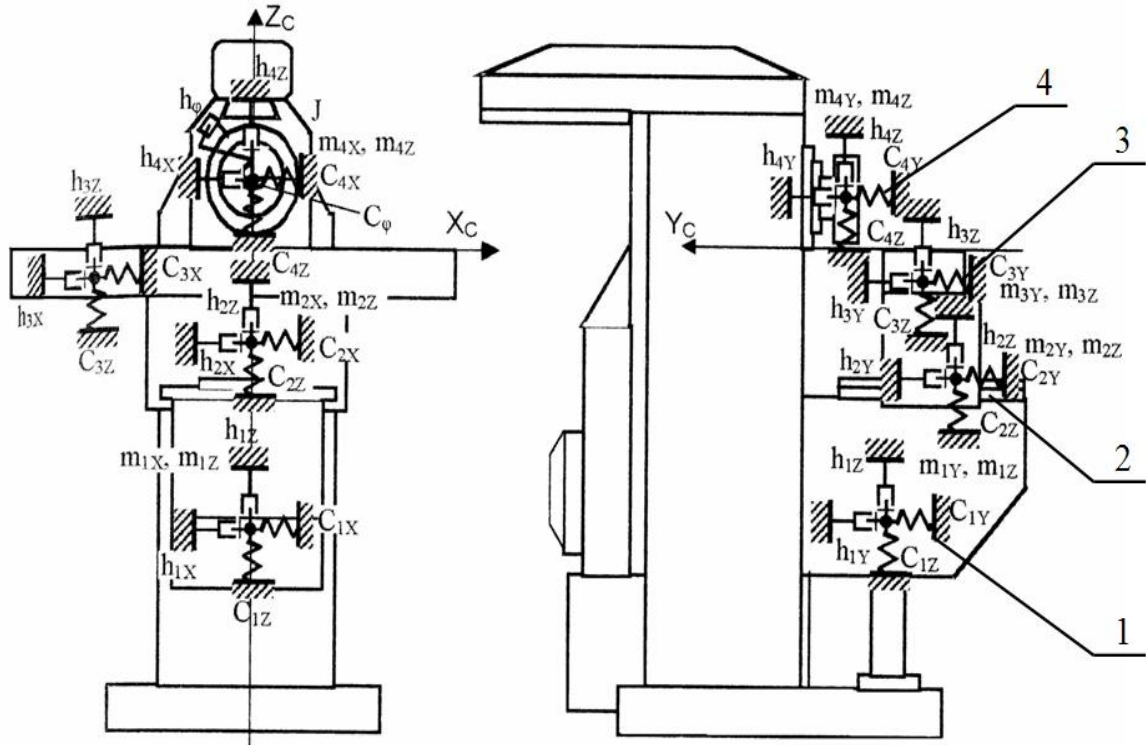


Рис. 1.4. Схематизация исполнительного механизма фрезерного станка

Таким образом, мехатронные машины следует рассматривать как сложные многомассовые объекты управления, в которых в режимах разгона, реверсирования и торможения исполнительных двигателей, а также изменения нагрузки возникают интенсивные колебательные движения подвижных звеньев, снижающие быстродействие, точность и надежность работы. В связи с этим вопросы синтеза систем управления занимают центральное место при проектировании мехатронных машин. Необходимость повышения точности, надежности работы мехатронных систем в комплексе с учетом различных механических, электрических факторов и т.п., влечет за собой необходимость применения метода системного анализа для обеспечения стабилизации заданных характеристик исполнительных подсистем.

1.2. Систематизация методов управления движением мехатронных устройств с учетом упругости звеньев

Отличительной особенностью мехатронных машин является то обстоятельство, что подсистемы различной физической природы должны быть связаны друг с другом. При этом большое значение для их функционирования имеет взаимодействие механических и электронно-цифровых компонентов как целостной системы [40, 57, 60, 102, 109].

Очевидно, что качество функционирования мехатронной машины во многом определяется характеристиками исполнительной подсистемы, состоящей из исполнительных двигателей и механических устройств, и интеллектуальной подсистемы компьютерного управления движением. При этом исполнительная подсистема представляет собой объекты, изменение свойств и характеристик которых связано с внесением изменений в их конструкцию, что зачастую не представляется возможным. Назначение интеллектуальной подсистемы – системы управления – состоит в выработке сигналов управления и коррекции свойств исполнительной подсистемы. В этой связи вопросы синтеза систем управления занимают одно из важнейших мест при создании мехатронных машин. Необходимость учета упругих свойств механической подсистемы влечет за собой необходимость разработки соответствующих алгоритмов управления движением [4, 5, 13, 20-24, 29, 61, 62, 135].

В настоящее время известно большое количество работ, посвященных учету упругости звеньев в электромеханических и мехатронных системах и управлению колебательными движениями этих систем.

В работах [17, 18, 57] получены расчетные схемы и дифференциальные уравнения движения передаточных механизмов электроприводов с учетом упругости звеньев. Проведено исследование влияния упругих свойств конструкции на переходный процесс в электроприводе с двумя степенями свободы. Показано, что наличие в системе упругой связи существенно

сказывается на изменении тока двигателя, что приводит к снижению точности выполняемых движений.

Работы [56, 122, 138] посвящены исследованию влияния демпфирующих свойств электроприводов на снижение интенсивности колебательных движений промышленных объектов. В них получены оптимальные значения коэффициента жесткости механической характеристики, электромеханической постоянной времени, соотношений между моментом инерции электродвигателя и механизма и других параметров привода, которые обеспечивают наибольшую эффективность демпфирования колебаний. В тоже время, эти методы не всегда могут быть эффективными, так как выбор значений параметров системы ограничен техническими характеристиками электроприводов.

Во многих работах, например [15, 16, 25-27, 127, 135, 137], для уменьшения уровня колебательных движений в переходных режимах работы применяются плавные, безударные законы движения в виде линейных или синусоидальных зависимостей. Однако при этом увеличивается время выполнения программных движений, что приводит к снижению быстродействия электромеханических систем. Метод квазистатической компенсации для управления движением электро-механических систем относительно заданной траектории, предложенный в работе [151], предполагает медленное движение манипулятора и компенсирует только статический прогиб.

Ряд работ посвящен использованию принципа обратной связи как по управляемым координатам, так и по упругим деформациям звеньев для ограничения колебательных движений исполнительных механизмов [7, 99, 123, 125, 145, 146]. В тоже время, как показано в работе [127], замыкание объектов управления по выходному валу исполнительных механизмов может привести даже к снижению эффективности управления упругими колебаниями.

В работе [78] рассмотрена задача управления упругими колебаниями с помощью дополнительных приводов, воздействующих на промежуточную массу,

располагающихся либо на неподвижном, либо на подвижном основаниях. Получены аналитические соотношения для выбора наиболее эффективной структуры цепей управления дополнительными приводами. В работах [62, 103] эта задача решается путем установления дополнительных двигателей, осуществляющих компенсацию упругих колебаний на основе соответствующих датчиков.

В перечисленных работах задача синтеза алгоритмов управления движением применяются различные методы: прямые методы синтеза, основанные на использовании принципа максимума; частотные, связанные с получением и анализом амплитудно- и фазо-частотных характеристик системы управления; корневые, базирующиеся на выборе параметров характеристического полинома, исходя из его корней и условий устойчивости; близкие к ним модальные методы, известные как методы размещения полюсов передаточной функции; методы, связанные с минимизацией интегральных квадратичных оценок упругих отклонений; методы, опирающиеся на использование стандартных форм Баттерворта передаточных функций; методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов; метод адаптивного и робастного управлений и т.д.

Применение принципа максимума для синтеза управления движением упругих механических систем позволяет реализовать оптимальное быстроедействие релейными законами управления [65, 141]. А в работах [4, 5, 15] определение алгоритмов управления свободными колебаниями исполнительных механизмов электромеханической системы предлагается производить с помощью методов, основанных на сочетании принципа максимума с асимптотическими методами теории колебаний. Однако общим недостатком принципа максимума является то, что управление является программной функцией времени, т.е. оно реализуется в виде разомкнутой системы, а это приводит к существенным ошибкам при наличии внешних воздействий [130]. Кроме того, задачи синтеза алгоритмов управления движением, как правило, решаются на основе существенно упрощенных математических моделей.

Корневые и частотные методы применяются при синтезе алгоритмов управления движением манипуляционных систем в работах [15, 25, 26, 27, 123, 135, 137, 145, 146]. Применение корневых методов не всегда оказывается оправданным и пригодным для технических приложений поскольку до настоящего времени, в общем случае, не решен вопрос выбора желаемых расположений полюсов замкнутой системы управления (не всегда удается сформировать косвенный критерий, который адекватно отражал бы физическое содержание управляемого процесса). А частотные методы синтеза, как правило, имеют область применения, ограниченную линейными стационарными системами с одним входом.

Исследование динамических свойств электромеханической системы с упругими конструкциями по амплитудно-частотным характеристикам проведено в работе [51]. Получены условия выбора оптимального коэффициента регламентации для снижения резонансного всплеска амплитудно-частотной характеристики позволяют сформировать требуемые динамические качества электромеханической системы по тому или иному критерию. Сложности метода состоит в требовании математических и алгоритмических построений.

Синтез систем управления с помощью модальных методов нашел широкое применение в реализации высоких показателей качества протекания процессов: повышения быстродействия, устранения колебательности при наличии упругости в кинематических связях [89, 126]. Однако практическое применение модальных методов сдерживается трудностями, возникающими в случае управления объектами переменной структуры, при наличии в структуре системы нелинейных звеньев и т. д. [100].

В работах [7, 61] для синтеза систем управления движением приводных механизмов, реализованных по принципу обратных связей, использовались интегральные функционалы от ошибок. В работе [29] этот подход применен для управления движением машинного агрегата с упругим передаточным механизмом с помощью уравнений Эйлера - Лагранжа. Однако интегральных методов не

всегда оказывается эффективным из-за нерешенности проблемы выбора весовых коэффициентов в интегральных критериях [19, 121, 134].

Метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов впервые был применен А.М. Летовым для решения задач управления летательными аппаратами [91]. Другое направление в теории аналитического конструирования связано с оптимизацией систем по критерию обобщенной работы А.А. Красовского [63, 64], сущность которого заключается в добавлении интегральной составляющей, определяющей ограничения на управления уже в оптимальной системе. Поскольку оптимальные управления на этапе задания требований к системе еще неизвестны, функционал получается полуопределенным, хотя и имеющим ясный физический смысл. Этот искусственный прием позволил существенно снизить вычислительные трудности рассматриваемого метода. Однако, применение этого метода для синтеза систем управления электромеханическими и мехатронными системами с упругими звеньями не всегда может оказаться эффективным, так как в большинстве случаев полученные результаты не могут быть реализованы точно вследствие необходимости использования всех фазовых координат [19].

Для обеспечения нечувствительности алгоритмов управления алгоритмов к параметрическим и внешним возмущениям и неопределенности находят применение принципы нечеткого, нейросетевого, оптимального, робастного и адаптивного управлений.

Задача робастного управления, как известно, заключается в минимизации чувствительности системы к параметрическим возмущениям [144, 147, 148, 150, 152]. Однако, как показано в работах [6, 107, 108], применение этого метода синтеза, например, для управления скоростью вращения электромеханических систем с упругими элементами в трансмиссии может приводить к решениям, не обладающим свойствами робастности в отношении параметров регулятора [6, 107, 108].

Нейрочеткие системы управления, а также системы управления с параметрической и сигнально-параметрической адаптацией были использованы для управления положением упругих исполнительных механизмов с электроприводами [119, 120]. В тоже время использование этих подходов зачастую ограничивается из-за специфики используемого математического аппарата и необходимости большого объема вычислений [153].

Возможность применения адаптивного управления электромеханическими системами с помощью алгоритма идентификации неизвестных параметров математической модели упругого объекта на основе неявной эталонной модели исследована в работах [8, 42, 43, 67, 68, 104, 116,]. В работах [142, 149] решена задача управления электромеханическими системами на основе адаптивного нелинейного регулятора с сигнатурным подавлением неизвестных элементов. Слабым местом предлагаемых методов синтеза управления является отсутствие возможности теоретической оценки верхнего предела границы устойчивости системы, поэтому расчетные параметры должны уточняться в процессе ее функционирования.

В работах [1 – 3] для решения задачи управления электроприводом при неизвестной реактивной нагрузке предлагается использовать полиномиальный метод синтеза регулятора. При этом для улучшения динамических характеристик частотно-регулируемого электропривода со сложной механической частью был предложен комплексный подход, основанный на поэтапном применении методов полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления.

Как показал анализ, в известных работах недостаточно используются возможности системного анализа, связанные с выявлением системных связей и установлением характера взаимодействий между разнородными элементами мехатронных машин. В этих работах, как правило, решаются задачи только параметрического синтеза при заданной структуре системы управления. Применяемые критерии эффективности управления не учитывают физическое содер-

жание управляемого процесса, а используемые математические модели зачастую не учитывают системные связи, либо описываются сложными системами взаимосвязанных уравнений.

Предлагаемые методы синтеза алгоритмов управления колебаниями электромеханических и мехатронных систем оказываются либо недостаточно эффективными, либо сложными в реализации, что требует разработки новых методов, свободных от указанных недостатков.

1.3. Концепция обратных задач динамики – эффективный инструмент реализации методов системного анализа в задачах управления движением мехатронных систем с упругими звеньями

Как было показано выше, корневые, частотные и интегральные методы синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем либо недостаточно эффективны, поскольку не позволяют учитывать все показатели качества переходных процессов и приводят к динамическим перегрузкам и расширению полосы пропускания частот, либо сложны в реализации из-за высокой размерности стандартных форм Кесслера и Баттерворта или трудностей выбора весовых коэффициентов и обеспечения заданных соотношений между фазовыми координатами в переходных режимах работы.

В данной работе, для решения проблемы управления упругими колебаниями исполнительных механизмов мехатронных систем используются методы системного анализа, позволяющие выявить системные связи и установить характер взаимодействий между разнородными элементами мехатронных систем 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 основу системного анализа, при решении задач управления движением мехатронных систем положена схема, используемая в работах Ф.И. Перегудова,

Ф.П. Тарасенко и И.И. Тихого (см. на рис. 1.5) для исследования функционирования исполнительных механизмов через взаимодействие объекта и средств определения его состояния [111, 129, 131].



Рис. 1.5. Схема исследования функционирования объекта

При исследовании процесса движения мехатронных систем с упругими звеньями, необходимо установить условия, при которых синтезированное управление не будет накладывать ограничений на программное движение этих систем. С этой целью представляется целесообразным использовать подход, основанный на разделении управляемого движения на программное, определяемое технологическим процессом или условиями применения мехатронной системы, и колебательное, обусловленное упругой податливостью исполнительного механизма и формировании требований только к виду колебательного движения (см. рис. 1.6).

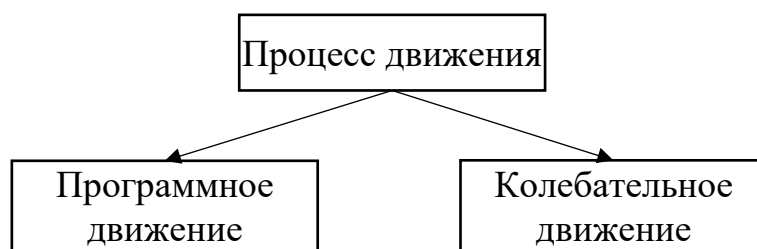


Рис. 1.6. Декомпозиция управляемого движения

На основе включающих ограничений и принятой декомпозиции движения, приведена на рис. 1.7 структура управления упругими колебаниями, как подсистемы управления движением исполнительных механизмов мехатронных систем.

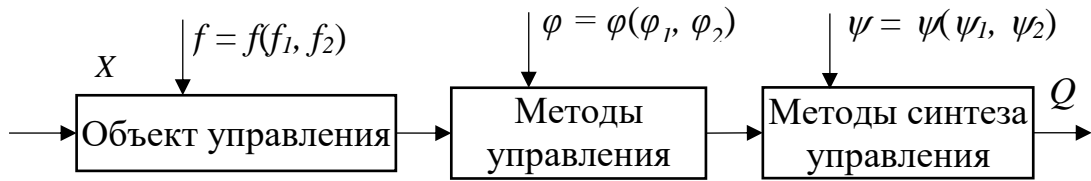


Рис. 1.7. Подсистема управления упругими колебаниями

При этом определение закона изменения управляющего воздействия $Q = F[X, f, \varphi, \psi]$, где X – вектор параметров исполнительных механизмов мехатронных систем; $f = f(f_1, f_2)$ – функция учета регулируемых и нерегулируемых параметров (ограничений); $\varphi = \varphi(\varphi_1, \varphi_2)$ – методы синтеза управления (разомкнутое или замкнутое управление); $\psi = \psi(\psi_1, \psi_2)$ – методы синтеза управления.

Получаемое потребное управляющее воздействие Q может быть реализовано либо непосредственно программными средствами, либо пересчитано путем исключения времени в функциональные зависимости от фазовых координат – для осуществления управления по принципу обратной связи. Структурная схема системы управления с обратной связью показана на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Структурная схема системы управления с обратной связью

Как показано в работах [71–73], практически любой метод синтеза законов управления движением базируется, так или иначе, на решении обратных задач динамики, которые возникли в рамках классической механики и под которыми понимаются задачи определения априори неизвестных управлений или каких-либо параметров системы по заданным движениям динамической системы. Теория синтеза алгоритмов управления, основанная на решениях ОЗД, обладает широкими возможностями для решения прикладных задач, поскольку

как для линейных, так и нелинейных моделей управляемых процессов уравнения синтезируемых алгоритмов получаются в замкнутой форме. Кроме того, метод ОЗД позволяет решать широкий круг задач значительно проще в процедурном отношении по сравнению с традиционными методами. Особенно важно, что синтезируемые структуры алгоритмов придают управляемым системам качественно новые свойства слабой чувствительности к параметрическим и координатным возмущениям.

Основы концепции ОЗД были заложены в работах Н.П. Еругина, в которых впервые была сформулирована обратная задача теории дифференциальных уравнений в виде задачи построения множества систем уравнений по заданным частным интегралам и указан метод решения этой задачи [49, 50]. Эта задача является наиболее общей математической постановкой обратных задач динамики и основополагающей в постановке многих задач теории управления движением материальных систем Летова-Калмана, Красовского и вариационного исчисления [63, 64, 91, 92], в частности, в задачах аналитического построения систем программного движения [33, 35, 36, 59]. В процессе дальнейших исследований оказалось, что метод Еругина позволил не только построить уравнения движения механической системы по заданным свойствам одного из возможных движений этой системы, но и построить эти уравнения с учетом дополнительных требований, например, устойчивости и оптимальности. Все это позволяет решать обратные задачи динамики в сочетании с задачами устойчивости и оптимальности заданного движения. Такие сочетания, а также дополнительные качественные и количественные требования к программе позволяют, используя неоднозначность решения самой задачи Еругина, доопределять правые части искомых дифференциальных уравнений движения, а также находить дополнительные условия для определения искомых функций управления, параметров и управляющих сил рассматриваемой материальной системы [33, 35, 36].

В работах А.С. Галиулина, а затем Б.Н. Петрова, П.Д. Крутько и Е.П. Попова обратные задачи теории дифференциальных уравнений Н.П. Еругина были

связаны с теорией управления и превратились в обратные задачи динамики [31–34, 114]. В последней работе впервые была продемонстрирована возможность и эффективность использования этих методов для решения задач синтеза систем управления. Авторы работы формируют и рассматривают обратные задачи динамики, как задачи построения всего множества дифференциальных уравнений программных движений. Показано, что этот метод может быть использован и для синтеза управляющих сил, и для изменения в нужном направлении параметров системы в процессе движения, и для построения специальных управляющих устройств (регуляторов) или сочетания этих возможностей. Дальнейшее развитие концепция ОЗД получила в работах [38, 39, 55, 140] для решения задач выбора законов управления и синтеза параметров регуляторов.

В ряде работ предложено использование численных и частотных методов решения ОЗД для структурно-параметрического синтеза автоматизированных электроприводов машинных агрегатов и многомерных автоматических систем [9, 10, 94–97, 110, 115]. В работе [6] коэффициенты вещественной передаточной функции объекта управления получаются с помощью решения обратной задачи при разработке, исследовании и реализации алгоритмических и программных средств самонастройки регуляторов исполнительных подсистем мехатронных устройств.

В некоторых работах, например [11, 54, 77, 143], для управления движением трехзвенного манипулятора построена программная траектория, обеспечивающая движение точки схвата манипулятора из заданной точки покоя в заданную точку покоя. Получено соответствующее этой траектории программное управление. Для стабилизации программного движения использован метод линеаризации нелинейной динамической системы обратной связью по состоянию и концепция ОЗД, с использованием которой задается требуемая динамика замкнутой системы. С позиций обратных задач динамики, задача разработки теоретических основ и конструктивных процедур синтеза многомерных систем управления проведена в работе [8].

Показано, что с помощью этого метода можно осуществлять движение объекта управления по некоторой траектории по заданной программе движения. В работе [131] для выполнения структурно-параметрического синтеза системы граничного управления объектами с распределенными параметрами. Метод ОЗД применяется также для осуществления движения схвата манипулятора вдоль некоторой траектории по заданной программе движения в работе [106].

В работах [44, 52, 66, 90, 125] задача управления угловым движением летательного аппарата решалась с помощью метода обратных задач динамики в сочетании с текущей оптимизацией на траекторном уровне. Содержание обратной задачи динамики заключается в определении законов управления рулями самолета из условия осуществления его движения по заданной траектории. При этом динамические характеристики проектируемой системы назначаются с помощью эталонных моделей для каждой степени свободы. Полученные законы управления из чисто программных переходят в управления с обратной связью. В работе [12] в качестве желаемых уравнений движения используются уравнения, полученные для управляемых систем с абсолютно жесткими звеньями.

Необходимо отметить, что в указанных работах. при синтезе управления электромеханическими устройствами на основе ОЗД, не учитываются упругие свойства звеньев.

В работах [69, 75] концепция ОЗД, в сочетании с идеей управления по старшим производным управляемых переменных, была применена к решению задач синтеза алгоритмов управления движением механических систем с учетом упругости звеньев. Задачи синтеза алгоритмов управления рассматривались применительно к дифференциальным математическим моделям третьего и четвертого порядков. В работе [73] предложено построение алгоритмов управления на базе ОЗД совместно с использованием метода управ-

ления по ускорению для полных математических моделей управляемых процессов, которые отражают фундаментальные законы механики. Для синтеза алгоритмов управления движением упругих исполнительных механизмов с учетом упругости звеньев, в работах [74, 76] определялись законы изменения и структуры управляющих сил по заданным свойствам программных движений на основе решения ОЗД. При этом структура механической системы предполагалась известной, а задача синтеза управления решалась на основе задания дифференциальных уравнений программных движений, которые не учитывали ограничений, связанных с условиями применения мехатронных машин или технологическими процессами.

Учитывая изложенное, можно сказать, что концепция ОЗД, при определенных условиях, может явиться эффективным инструментом реализации системного анализа к задачам управления движением мехатронных систем с упругими звеньями, поскольку, с одной стороны, позволяет воспользоваться не количественными (прямыми или косвенными) критериями, а непосредственными качественными критериями, например, в виде заданной кривой переходного процесса, которая учитывает все показатели качества движения, такие как минимальное время регулирования, критическое затухание, максимальная степень устойчивости или характеристики идеального фильтра [128]. С другой стороны, получаемые в замкнутой форме требуемые управляющие воздействия не будут зависеть от структуры регулятора, что позволит решить задачи структурно-параметрического синтеза системы управления движением путем выражения полученных временных зависимостей через фазовые координаты.

Из этого, однако, не следует, что теория синтеза алгоритмов управления, основанная на концепции ОЗД, обеспечивает окончательное решение проблемы управления движением мехатронных систем с упругими звеньями. Проблема использования данного метода синтеза заключается в том, что вид управляемого движения определяется условиями применения мехатронных систем или техно-

логическим процессом, параметры (выходные координаты) которого заранее неизвестны. Поэтому возможности применения данного подхода ограничены определенным классом мехатронных систем.

К настоящему времени процедуры синтеза систем управления движением мехатронных систем, с позиций обратных задач динамики, развиты еще недостаточно, особенно для систем с учетом упругости звеньев. Поэтому, дальнейшая разработка алгоритмов управления движением исполнительных механизмов этих систем в переходных режимах работы с позиций обратных задач динамики представляет собой актуальную и практически значимую проблему.

1.4. Цель и задачи исследований

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. Увеличение нагрузок и скоростей движения мехатронных систем, с одной стороны, и требований к точности и надежности функционирования, с другой, вызывают необходимость учета при их создании упругости звеньев механической конструкции.

В настоящее время эта проблема решается путем обеспечения плавных законов программного движения; использования обратных связей по упругим деформациям; применения метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов; частотных и спектральных методов синтеза; методов передаточных функций и модального управления; методов, основанных на использовании функций Ляпунова; методов оптимального, адаптивного, робастного и инвариантного управлений и т.д.

Как показал анализ, предлагаемые методы либо недостаточно эффективны, в том числе, вследствие увеличения времени выполнения программных движений

или несовпадения точек управления с точками наблюдения; либо сложны в реализации, например, из-за сложности выбора эталонных моделей или весовых коэффициентов функционалов качества, отсутствия полной информации о векторе состояния системы, невозможности мгновенных изменений управляющих воздействий, чувствительности к изменениям структуры и параметров объектов управления, нелинейных свойств приводов и регуляторов; либо приводят к нарушению законов программного движения и т.п.

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.

Проведенный анализ также показал, что концепция ОЗД при определенных условиях, может явиться эффективным инструментом реализации системного анализа к задачам управления движением мехатронных систем с упругими звеньями, поскольку, с одной стороны, позволяет воспользоваться не количественными (прямыми или косвенными) критериями, а непосредственными качественными критериями, например, в виде заданной кривой переходного процесса, которая учитывает все показатели качества движения, такие как минимальное время регулирования, критическое затухание, максимальная степень устойчивости или характеристики идеального фильтра. С другой стороны, поскольку по-

лучаемые в замкнутой форме потребные управляющие воздействия не будут зависеть от структуры регулятора, данный подход позволит решить задачи структурно-параметрического синтеза системы управления движением путем выражения полученных временных зависимостей через фазовые координаты.

В тоже время для использования концепции ОЗД и методов системного анализа необходимо установить условия, при которых синтезированное управление не будет накладывать ограничений на программное движение мехатронной системы. С этой целью представляется целесообразным использовать подход, основанный на разделении управляемого движения на программное, определяемое технологическим процессом или условиями применения мехатронной системы, и колебательное, обусловленное упругой податливостью исполнительного механизма, и формировании требований только к виду колебательного движения.

Целью диссертационной работы является разработка методов синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем с учетом упругости звеньев на основе решения обратных задач динамики и методов системного анализа.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Выбор расчетных схем и декомпозиция математических моделей движения исполнительных механизмов мехатронных машин с учетом упругости звеньев.

2. Выбор непосредственных критериев эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями, не накладывающих ограничений на характер программного движения.

3. Разработка методов и 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. Разработка математической модели электромеханического робота с учетом упругости звеньев и компьютерное моделирование процессов управления упругими колебаниями.

Глава 2. Структурно-параметрический синтез систем управления упругими колебаниями на основе концепции обратных задач динамики

2.1. Выбор расчетных схем и математических моделей движения исполнительных механизмов мехатронных систем

Мехатронные системы, как правило, являются сложными, многомассовыми и многосвязными объектами со многими степенями подвижности. Связанность движений по отдельным степеням подвижности, например, исполнительных механизмов промышленных роботов, обусловлена проявлением таких динамических эффектов, как кориолисовы и центробежные силы и моменты сил инерции. В других мехатронных системах, таких, как металлообрабатывающие комплексы, причинами появления перекрестных связей может служить взаимодействие через объект управления в виде рабочего инструмента или обрабатываемой заготовки.

В тоже время, поскольку задачи управления колебаниями рассматриваются в какой-либо точке позиционирования или окрестности заданной траектории перемещения, когда действие перекрестных связей ослабевает, появляется возможность упрощения математических моделей и изучения движений в направлении только одной степени подвижности. С другой стороны, модульный принцип построения мехатронных узлов и индивидуальное исполнение управляющих приводов по отдельным степеням подвижности также свидетельствуют в пользу декомпозиции математических моделей мехатронных систем и необходимости независимого рассмотрения движений по отдельным степеням подвижности. При этом связанность движений можно рассматривать как возмущения, влияние которых должно быть минимизировано алгоритмами управления, реализованными на основе решения ОЗД.

Для решения задачи синтеза алгоритмов управления колебаниями, независимых от условий применения мехатронных систем, управляемое движение представляется целесообразным разделить на программное, определяемое

технологическим процессом или условиями применения, и колебательное, обусловленное упругой податливостью исполнительных механизмов (см. рис. 2.2) [80]. Под программным движением будем понимать движение мехатронной системы с абсолютно жесткими звеньями под действием заданных сил. При этом связанность программного и колебательного движений можно учесть с помощью соответствующих инерционных сил. Такому разделению способствует также то обстоятельство, что электромеханические приводы, как правило, обладают достаточно «жесткими» механическими характеристиками, при которых колебания объекта управления практически не сказываются на колебаниях тока. Необходимо отметить также, что подобное разделение движений, помимо упрощения задачи синтеза алгоритмов управления колебаниями, снижает вычислительные трудности при управлении в режиме реального времени.

Наиболее часто расчетная схема исполнительного механизма мехатронных машин по отдельной степени подвижности представляется в виде двухмассовой колебательной системы. Эта расчетная схема обычно используется при исследовании, проектировании и расчетах различных технических объектов – машин, агрегатов, оборудования и разнообразных инженерных конструкций [30, 45, 136].

В тоже время, как было показано в первой главе, для исследования систем управления движением могут понадобиться и более сложные трех-, четырех- и многомассовые расчетные схемы [85]. Так, например, по координате подъема исполнительного механизма робота типа «Универсал-5» необходимо использовать трехмассовую, а по координате его поворота – четырехмассовую колебательную систему.

С учетом изложенного, расчетную схему системы управления движением мехатронной машины, в общем случае, представим в виде, показанном на рис. 2.1. На этом рисунке 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.

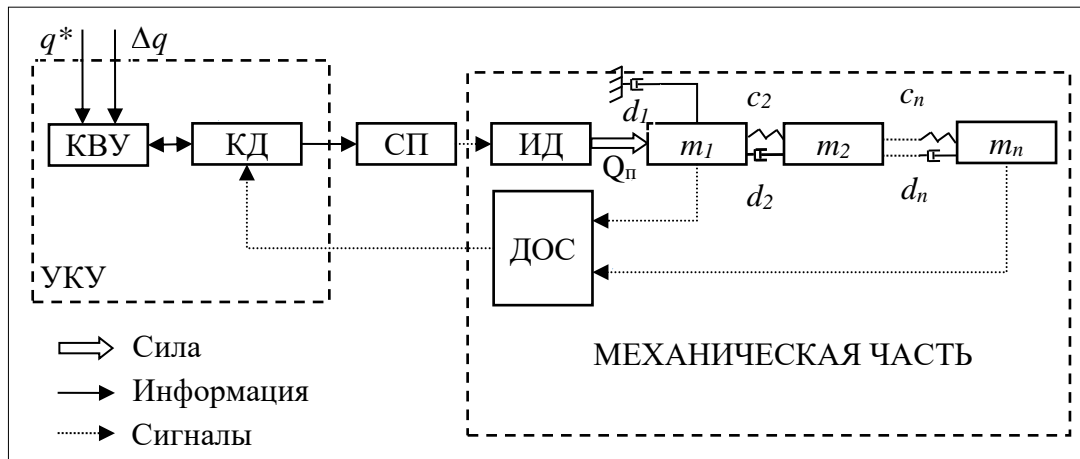


Рис. 2.1. Расчетная схема мехатронной системы

С учетом сказанного, механическая часть мехатронной системы, с учетом дополнительных воздействий, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} m_2 \Delta q_1'' + m_3 (\Delta q_1'' + \Delta q_2'') + \dots + m_n (\Delta q_1'' + \dots + \Delta q_{n-1}'') + d_1 \dot{q}_1' = Q_n - (m_1 + \dots + m_n) \dot{q}_1' \\ m_2 \Delta q_1'' - d_3 \Delta q_2' - c_3 \Delta q_2 + d_1 \dot{q}_1' = Q_n - (m_1 + m_2) \dot{q}_1' \\ (m_2 + m_3) \Delta q_1'' + m_3 \dot{q}_{n-2}' + d_2 \Delta q_1' + c_2 \Delta q_1 = -(m_2 + m_3) \dot{q}_1' \\ \dots \\ (m_{n-1} + m_n) (\Delta q_1'' + \dots + \Delta q_{n-1}'') + m_n \Delta q_{n-1}'' + d_{n-1} \Delta q_{n-2}' + c_{n-1} \Delta q_{n-2} = -(m_n + m_{n-1}) \dot{q}_1' \end{cases} \quad (2.1)$$

где $Q_n = Q_0 + Q_{\text{дон}}$; $\Delta q_i = q_{i+1} - q_i$, $i = \overline{1, n-1}$; q_1 – абсолютная координата программного движения; q_i – абсолютные координаты i -ой массы, $i = \overline{2, n}$; Q_0 и $Q_{\text{дон}}$ – движущие силы, которые управляют программным и колебательным движениями соответственно.

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

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = E_n - C\Phi q_1' - i_a r \\ w_n \frac{d\Phi}{dt} = E_\epsilon - i_\epsilon R_\epsilon, i_\epsilon = f(\Phi) \\ Q_n = C\Phi i_a \\ m_1 \frac{dq_1'}{dt} = Q_n, \end{cases} \quad (2.2)$$

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 – электродвижущая сила преобразователей, питающих якорь двигателя и цепь возбуждения двигателя; i_a , i_ϵ – токи якорной цепи и цепи возбуждения двигателя.

Необходимо отметить также, что при синтезе управления движением мехатронных систем необходимо также учитывать переменность параметров управляемых объектов, нелинейные свойства приводов, тип системы управления, а также запаздывание сигналов управления.

Таким образом, задача синтеза управления мехатронными системами как с одной, так и многими степенями подвижности исполнительных механизмов может быть сведена к определению дополнительных воздействий $Q_{дон}$ на основе решения ОЗД для компенсации колебательных движений Δq механической части расчетной схемы, показанной на рис. 2.1.

2.2. Выбор критериев эффективности управления мехатронными системами

Как известно, результаты системных исследований, для того чтобы быть успешными, должны удовлетворять заранее установленным критериям эффективности, опираться на определенный теоретический фундамент и в процессе своего применения порождать образцы для последующего использования. Рассмотрим теперь вопрос формирования требований к характеру колебательного движения, позволяющих учитывать основные показатели качества переходных процессов и не накладывать ограничений на характер программного движения.

Исходя из этого, для решения задачи синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем предлагается метод выбора критериев эффективности управления в виде не зависящих от структуры регулятора аналитических зависимостей для решения ОЗД по определению требуемых управляющих воздействий. В качестве возможных вариантов задания требуемых законов изменения колебательного движения можно использовать конечные уравнения, дифференциальные уравнения упругих колебаний или методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов.

В качестве конечных могут использовать экспоненциальные зависимости

$$\Delta q = C e^{\lambda t}, \quad (2.3)$$

или тригонометрические функции времени

$$\Delta q = [I - \cos(2\pi/T)t]C \quad (2.4)$$

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; $\lambda_1, \dots, \lambda_l$ – различные действительные или комплексно-сопряженные числа, такие, что $Re \lambda_i < 0$; I – единичная матрица размерности $m \times m$; $\cos(2\pi/T)t = \text{diag}[\cos(2\pi/T_1)t, \dots, \cos(2\pi/T_j)t]$ – диагональная мат-

рица косинусоидальных функций; T_1, \dots, T_j – значения времени разгона (торможения). Выбором численных значений коэффициентов C_l, λ_l, T_j уравнений (2.3) и (2.4) можно обеспечить требуемый характер изменения упругих деформаций.

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.

Найденные законы управления в виде временных зависимостей могут быть реализованы непосредственно программными средствами или пересчитаны путем исключения времени как функция координат для управления по принципу обратной связи или путем выбора новых значений параметров мехатронной машины и, прежде всего, исполнительного механизма.

В отличие от задания конечных уравнений, задание дифференциальных уравнений позволяет реализовать либо целенаправленное изменение параметров объекта управления, либо определять адекватные управляющие воздействия.

Как показано в первой главе, широко используемые стандартные формы Баттсворта, с биномиальным распределением корней и другие пришли в теорию электропривода из теории цепей и не связаны с потенциально достижимыми характеристиками силового элемента, что в практическом аспекте приводит к неоправданным динамическим перегрузкам в переходных режимах работы. При этом следует создавать новые стандартные формы, свободные от указанных недостатков.

Для этого, например, можно воспользоваться подходом, основанным либо на применении метода интегральных уравнений Вольттера II рода, не требующих определения характеристических чисел и позволяющих построить специальные функции переходного процесса [37], либо на основе использования свойств приводимости Н.П. Еругина [50].

Необходимо отметить, что порядок требуемых дифференциальных уравнений системы должен быть равен порядку объекта управления и решение этих уравнений должно быть устойчивым.

В общем случае, дифференциальные уравнения можно задать, например, в виде следующей зависимости

$$\sum_{i=0}^n \beta_i \frac{d^i \Delta q^*}{dt^i} = 0, \quad \beta_i = const. \quad (2.5)$$

Коэффициенты требуемых дифференциальных уравнений можно также выбрать по рекомендациям, приведенным, например, в работах [41, 46] из условий удовлетворения не только требуемым показателям колебательности, но и устойчивости.

При использовании уравнений (2.5) динамические воздействия, устраняющие упругие колебания, могут быть определены путем исключения высшей производной из заданного дифференциального уравнения движения [14].

Замкнутые мехатронные системы, в общем случае, описываются сложными системами дифференциальных уравнений. В этом случае для разработки алгоритмов управления колебаниями целесообразно воспользоваться методами аналитического конструирования оптимальных регуляторов [86]. При этом требование оптимальности системы по переходному процессу в смысле минимума квадратичного функционала равносильно требованию, что выходная переменная системы в ее свободном движении изменялась в соответствии с решением однородного дифференциального уравнения.

В качестве квадратичного функционала колебательного движения может быть принято, например, следующее выражение

$$J = 0,5 \int_0^T (X' Q X + U' F U) dt, \quad (2.6)$$

где X – вектор состояния упругих колебаний; U – вектор управляющих воздействий; Q – неотрицательно определенная, а F – положительно определенная матрица весовых коэффициентов.

2.3. Определение компенсирующих воздействий в двухмассовой мехатронной системе на основе решения обратных задач динамики

На примере двухмассовой расчетной схемы мехатронной системы опишем процедуру определения компенсирующих воздействий [85]. Расчетная схема этой системы показана на рис. 2.2. На этом рисунке приняты следующие обозначения: $УМ$ – усилитель мощности; $ЭД$ – электродвигатель; $СУ$ – система управления; J_n – приведенный момент инерции двигателя и редуктора; J – момент инерции звена исполнительного механизма; c – приведенный коэффициент жесткости; b_n – коэффициент вязкого трения; M_n – движущий момент электродвигателя, приведенный к валу редуктора; M_H – момент нагрузки.

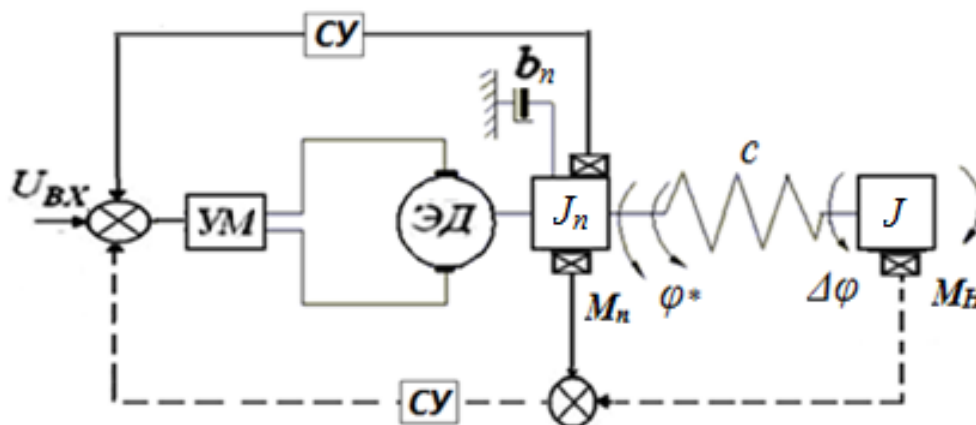


Рис. 2.2. Двухмассовая расчётная схема

Сначала получим математическую модель этой системы на основе представления управляемого движения в виде двух составляющих: программного движения, как системы с абсолютно жесткой упругой связью, описываемого углом поворота (φ^*) вала электродвигателя, приведенным к выходу редуктора и колебательного, определяемого углом ($\Delta\varphi$) упругой деформации.

Дифференциальные уравнения движения двухмассовой системы будут описываться следующей системой:

$$(J_n + J)\varphi^{*''} + J\Delta\varphi^{*''} + b_n\varphi^{*'} = M_n(t) \quad (2.7)$$

$$J\Delta\varphi^{*''} + J\varphi^{*''} + c\Delta\varphi = 0. \quad (2.8)$$

Определим колебательную составляющую движения, возникающую в системе при воздействии на нее постоянного момента M_0 . Пренебрегая моментами вязкого трения, из уравнения (2.7) при $b_n=0$ и $M_H=0$ выразим ускорение угла поворота вала электродвигателя

$$\varphi_*'' = (M_0 - J\Delta\varphi'') / (J_n + J). \quad (2.9)$$

Подставляя (2.9) в (2.8), получим

$$\Delta\varphi'' + \omega^2 \Delta\varphi = -M_0 / J_n, \quad (2.10)$$

где $\omega^2 = \omega_0^2 / n$, $\omega_0 = (c / J)^{1/2}$ – собственная частота звена исполнительного механизма при неподвижном двигателе и редукторе; $n = J_n / (J_n + J)$ – коэффициент, характеризующий отношение момента инерции двигателя и редуктора к полному моменту инерции системы.

Решение уравнения (2.10) при начальных условиях $\Delta\varphi(0) = \Delta\varphi'(0) = 0$ будет иметь вид

$$\Delta\varphi = -a_c (1 - \cos \omega t) / \omega_0^2, \quad (2.11)$$

где $a_c = M_0 / (J_n + J)$ – ускорение центра масс системы.

Как следует из выражения (2.11), под воздействием постоянного момента в системе появляются незатухающие упругие колебания. При этом их амплитуда будет определяться модулем ускорения центра масс a_c и собственной частотой ω_0 . С увеличением a_c и уменьшением ω_0 амплитуда упругих углов увеличивается.

Рассмотрим влияние упругих колебаний, возникающих в переходных режимах работы, на программное движение. На основе выражения (2.11), с учетом (2.9), находим координату φ_*

$$\varphi_* = a_c t^2 / 2 + a_c (1 - n) (1 - \cos \omega t) / \omega_0^2. \quad (2.12)$$

Из выражения (2.12) следует, что программное движение будет представлять собой сумму аperiodической и колебательной составляющих, причем ко-

лебательная составляющая, имея собственную частоту ω , сдвинута по фазе относительно $\Delta\varphi$ на угол π . С ростом n до его предельного значения, равного единице, амплитуда колебательной составляющей стремится к нулю.

С помощью выражений (2.11) и (2.12), определим координату абсолютного движения второй массы

$$\varphi = \varphi_* + \Delta\varphi = a_c t^2 / 2 - a_c (1 - n)(1 - \cos \omega t) / \omega_0^2. \quad (2.13)$$

На основе формулы (2.13) можно сделать вывод, что интенсивность упругих отклонений, при прочих равных условиях, обуславливается соотношением между моментами инерции звеньев. При увеличении n амплитуда колебаний увеличивается, а при уменьшении снижается, приближаясь к значению, определяемому выражением (2.11), которое получено без учета взаимной связи программного и колебательного движений.

Выполним синтез алгоритмов управления упругими колебаниями исполнительного механизма на основе задания закона (2.4), предполагая, что исполнительный механизм перемещается «из точки в точку», а процесс движения состоит из участков разгона, установившегося движения и торможения. Ускорение движения $|\ddot{\varphi}_*| \leq a$. Поставим задачу определения управляющего воздействия, при котором для любых допустимых значений времени разгона и торможения упругие колебания исполнительного механизма полностью гасятся.

Вначале рассмотрим режим разгона, предполагая, что в начальный момент времени упругие колебания отсутствуют, а координата задается в следующем виде

$$\Delta\varphi = \gamma_p \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right). \quad (2.14)$$

Здесь γ_p – постоянная величина; T_p – время разгона. Тогда при $t = 0$ и $t = T_p$ на основании (2.14) будет выполняться условие

$$\Delta\varphi = \Delta\dot{\varphi} = 0.$$

Для получения закона изменения ускорения упругой деформации продифференцируем дважды выражение (2.14),

$$\Delta\varphi'' = \frac{4\pi^2\gamma_P}{T_P^2} \cos \frac{2\pi}{T_P} t. \quad (2.15)$$

Из уравнений (2.7) и (2.8) при $b_n = 0$ будем иметь

$$\varphi_*'' = [M_n(t) + c\Delta\varphi] / J_n. \quad (2.16)$$

На основе выражений (2.16) и (2.7) получим

$$\Delta\varphi'' + \omega^2 \Delta\varphi = -M_n(t) / J_n. \quad (2.17)$$

Подставим выражения (2.14) и (2.15) в (2.17) и найдем требуемый закон изменения движущего момента

$$M_n(t) = -J_n\gamma_P[\omega^2(1 - \cos \frac{2\pi}{T_P} t) + \frac{4\pi^2}{T_P^2} \cos \frac{2\pi}{T_P} t]. \quad (2.18)$$

Определим постоянную γ_P путем подстановки выражений (2.14) и (2.18) в уравнение (2.16), получим

$$\varphi_*'' = -\gamma_P[\frac{4\pi^2}{T_P^2} \cos \frac{2\pi}{T_P} t + \omega_0^2(1 - \cos \frac{2\pi}{T_P} t)]. \quad (2.19)$$

Интегрируя выражение (2.19) дважды, находим координату и скорость программного движения

$$\dot{\varphi}_* = -\gamma_P[\frac{2\pi}{T_P} \sin \frac{2\pi}{T_P} t + \omega_0^2(t - \frac{T_P}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{T_P} t)] + C_1; \quad (2.20)$$

$$\varphi_* = \gamma_P \cos \frac{2\pi}{T_P} t - \omega_0^2\gamma_P(\frac{t^2}{2} + \frac{T_P^2}{4\pi^2} \cos \frac{2\pi}{T_P} t) + C_1 t + C_2. \quad (2.21)$$

Находим постоянные интегрирования C_1 и C_2 при начальных нулевых условиях

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -\gamma_P(1 - \omega_0^2 T_P^2 / 4\pi^2). \quad (2.22)$$

Подставляя это условие в выражение (2.20), получим

$$\gamma_P = -V_{ycm} / T_P \omega_0^2. \quad (2.23)$$

С учетом выражения (2.23) законы изменения движущего момента и ускорения вращения вала двигателя примут вид

$$M_n(t) = \frac{(J_* + J)V_{ycm}}{T_p} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right) + \frac{4\pi^2 m_1 V_{ycm}}{\omega_0^2 T_p^3} \cos \frac{2\pi}{T_p} t; \quad (2.24)$$

$$\varphi_*'' = \frac{V_{ycm}}{T} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) + \frac{4\pi^2 V_{ycm}}{\omega_0^2 T_p^3} \cos \frac{2\pi}{T_p} t. \quad (2.25)$$

Подставляя в выражение (2.25) предельное значение $\varphi_*''^{np} = a$, получим допустимую величину времени разгона

$$a = \frac{V_{ycm}}{T_p} \left[1 - \left(1 - \frac{4\pi^2}{\omega_0^2 T_p^2} \right) \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right]. \quad (2.26)$$

Максимальное значение ускорения будет наблюдаться при $t = 0$ и $t = T_p$.

При этом выражение (2.26) примет вид

$$a = 4\pi^2 V_{ycm} / \omega_0^2 T_p^3,$$

откуда допустимое время разгона

$$T_p \geq 2\pi / \omega_0. \quad (2.27)$$

Определим путь разгона из уравнения (2.21) с учетом выражений (2.22) и (2.23) при $t = T_p$

$$s_p = V_{ycm} T_p / 2. \quad (2.28)$$

В случае торможения, полагая, что перед торможением упругие деформации отсутствуют, а скорость движения $\dot{\varphi}_* = V_{ycm}$, а закон изменения упругих деформаций на этом участке задается в виде

$$\Delta\varphi = \gamma_m \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_m} t \right),$$

где γ_m – некоторая постоянная величина; T_m – время торможения.

Аналогичным образом, получим закон изменения движущего момента

$$M_n(t) = \frac{(J_n + J)V_{ycm}}{T_m} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_m} t \right) + \frac{4\pi^2 m_1 V_{ycm}}{\omega_0^2 T_m^3} \cos \frac{2\pi}{T_m} t. \quad (2.29)$$

Допустимое время торможения и тормозной путь определяются аналогично.

Видно, что полученные выражения получили без учета динамических свойств привода. Рассмотрим задачу определения компенсирующего воздействия с учетом этих свойств. При пренебрежении влиянием реакции якоря, вихревых токов и взаимной индуктивности между обмотками якоря и возбуждения и др., привод в системе уравнений (2.1) может быть описан следующим уравнением

$$(\tau p + 1)M_n = M_{n0} - b_n \dot{\varphi}^*, \quad (2.30)$$

где $\tau = rm_1 / (C\Phi)^2$ – постоянная времени привода; M_{n0} – движущая сила (момент) ненагруженного привода; M_n – текущее значение движущей силы (момента) привода.

Разрешая уравнения (2.7), (2.8) с учетом выражения (2.30) относительно $\Delta\varphi$, получим

$$J_* J \tau \Delta\varphi^{IV} + J_* J \Delta\varphi''' + [c\tau(J_* + J) + Jb_n u] \Delta\varphi'' + c(J_* + J) \Delta\varphi' + cb_n u \Delta\varphi = -m_2 M'_{n0}(t), \quad (2.31)$$

где u – передаточное отношение механической передачи.

Путем дифференцирования выражения (2.14) по времени и подстановки полученных производных в (2.31), получим зависимость для нахождения компенсирующего воздействия

$$M'_{n0}(t) = \gamma_P \left\{ \left[\frac{16\pi^4 J_* \tau}{T_P^4} + \omega_0^2 b_n u - \frac{4\pi^2 (J_* \omega^2 \tau + b_n u)}{T_P^2} \right] \cdot \cos \frac{2\pi}{T_P} t + \frac{2\pi J_*}{T_P} \left(\frac{4\pi^2}{T_P^2} - \omega^2 \right) \sin \frac{2\pi}{T} t - \omega_0^2 b_n u \right\}. \quad (2.32)$$

Интегрируя выражение (2.32), получим

$$M_{n0}(t) = \gamma_P \frac{T_P}{2\pi} \left\{ \left[\frac{16\pi^4 J_* \tau}{T_P^4} + \omega_0^2 b_n u - \frac{4\pi^2 (J_* \omega^2 \tau + b_n u)}{T_P^2} \right] \cdot \sin \frac{2\pi}{T_P} t - \right.$$

$$-J_* \left(\frac{4\pi^2}{T_p^2} - \omega^2 \right) \cos \frac{2\pi}{T} t - \omega_0^2 b_n u t \} + C_3, \quad (2.33)$$

где C_3 – постоянная интегрирования.

Полагая, что в начальный момент времени $M_{n_0}(0) = -4\pi^2 J_* \gamma_p / T_p^2$, определим постоянную интегрирования

$$C_3 = -J_* \gamma_p \omega^2.$$

На основе выражения (2.33), с учетом найденной постоянной C_3 , определим закон изменения движущего момента

$$M_{n_0}(t) = -J_* \gamma_p \left[\omega^2 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right) + \frac{4\pi^2}{T_p^2} \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right] - \omega_0^2 \gamma_p b_n u t + \left[\frac{b_n u T_p}{2\pi} \left(\omega_0^2 - \frac{4\pi^2}{T_p^2} \right) + \frac{2\pi m_n \tau}{T_p} \left(\frac{4\pi^2}{T_p^2} - \omega^2 \right) \right] \gamma_p \sin \frac{2\pi}{T_p} t. \quad (2.34)$$

Определим постоянную γ_p . Сначала, подставляем в (2.16) выражения (2.14) и (2.34), найдем ускорение вращателя вала двигателя

$$\varphi_*'' = -\omega^2 \gamma_p \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right) - \frac{4\pi^2 \gamma_p}{T_p^2} \cos \frac{2\pi}{T_p} t - \frac{\omega_0^2 \gamma_p b_n u t}{J_*} + \frac{c \gamma_p}{J_*} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right) + \left[\frac{b_n u T_p}{2\pi J_*} \left(\omega_0^2 - \frac{4\pi^2}{T_p^2} \right) + \frac{2\pi J_* \tau}{T_p} \left(\frac{4\pi^2}{T_p^2} - \omega^2 \right) \right] \gamma_p \sin \frac{2\pi}{T_p} t. \quad (2.35)$$

На основе начальных и граничных условий, из выражения (2.35) найдем постоянную

$$\gamma_p = -\frac{V_{ycm}}{\omega_0^2 T_p (1 - b_n u T_p / 2J_*)}. \quad (2.36)$$

Подставляем выражение (2.36) в (2.34), получим

$$M_{n_0}(t) = \frac{J_* V_{ycm}}{\omega_0^2 T_p (1 - b_n u T_p / 2J_*)} \left\{ J_* \left[\omega^2 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right) + \frac{4\pi^2}{T_p^2} \cos \frac{2\pi}{T_p} t \right] + \omega_0^2 b_n u t - \left[\frac{b_n u T_p}{2\pi} \left(\omega_0^2 - \frac{4\pi^2}{T_p^2} \right) + \frac{2\pi J_* \tau}{T_p} \left(\frac{4\pi^2}{T_p^2} - \omega^2 \right) \right] \sin \frac{2\pi}{T_p} t \right\}. \quad (2.37)$$

Найденный закон управления (2.37) с учетом динамической характеристики привода является программным.

2.4. Структурно-параметрический синтез системы управления движением

Задачу структурно-параметрического синтеза систем управления движением двухмассовой мехатронной системы можно решить путем пересчета найденных законов управления в функции, например, упругой деформации или её производных, для управления по принципу обратной связи.

Из выражений (2.14) и (2.23), выразим тригонометрическую функцию через упругую деформацию

$$\cos \frac{2\pi}{T} = 1 + \frac{\omega_0^2 T}{V_{уст}} \Delta\varphi. \quad (2.38)$$

Подставляя выражение (2.38) в уравнение (2.24), получим

$$M_n(t) = M_0 - c^* \Delta\varphi, \quad (2.39)$$

где $c^* = [(4\pi^2 / T_p^2 - \omega_0^2) J_* - c]$; $M_0 = 4\pi^2 J_* V_{уст} / \omega_0^2 T_p^3$ – постоянная составляющая момента вала двигателя.

При минимальном времени разгона в (2.27), коэффициент c^* равен

$$c^* = -c. \quad (2.40)$$

Здесь коэффициент c^* можно представить как новый коэффициент обратной связи по упругим отклонениям исполнительного механизма.

Подставляя (2.39) и (2.40) в уравнение (2.7) с учетом того, что $V_{уст} = aT_p$, найдем

$$J_n \varphi'' + c \Delta\varphi = J_n a - c^* \Delta\varphi, \quad (2.41)$$

или

$$\varphi'' = a.$$

Анализ выражения (2.41) показывает, что введение нового коэффициента обратной связи компенсирует влияние упругой деформации на движение вала двигателя. Объединяя уравнения (2.16) и (2.41), будем иметь

$$\Delta\varphi'' + \omega_0^2 \Delta\varphi = -a. \quad (2.42)$$

Решение уравнения (2.37) имеет вид

$$\Delta\varphi = -\frac{a}{\omega_0^2}(1 - \cos \omega_0 t).$$

При $t = 0$ и $t = T_p = 2\pi/\omega_0$ получим $\Delta\varphi = 0$, т.е. отсутствие упругих колебаний.

Для получения управления в виде функции ускорения упругой деформации, получим вторую производную выражения (2.14) и с учетом (2.23) будем иметь

$$\Delta\varphi'' = -\frac{4\pi^2 V_{ycm}}{\omega_0^2 T_p^3} \cos \frac{2\pi}{T_p} t,$$

откуда

$$\cos \frac{2\pi}{T_p} t = -\frac{\omega_0^2 T_p^3}{4\pi^2 V_{ycm}} \Delta\varphi''. \quad (2.43)$$

Подставляя выражение (2.43) в уравнение (2.24), будем иметь

$$M_n(t) = M_0' - J^* \Delta\varphi'', \quad (2.44)$$

где $J^* = [J\omega_0^2 T_p^2 + J_*(\omega_0^2 T_p^2 - 4\pi^2)]/4\pi^2$; $M_0' = (J_n + J)V_{ycm}/T_p$ – постоянная составляющая момента.

При $T_p = 2\pi/\omega_0$, коэффициент $J^* = J$, а коэффициенты c^* , J^* в (2.39) и (2.44) представляют как коэффициенты усиления обратных связей по упругой координате $\Delta\varphi$ и ее производным.

Структурная схема управления с обратной связью вида (2.39) показана на рис. 2.3. Как следует из этой структурно-функциональной схемы, для осуществления управления по принципу обратной связи надо измерять упругую координату $\Delta\varphi$. Полученный сигнал от датчика упругих деформаций, найденных коэффициентов усиления дополнительной обратной связи k_{oci} и их проверки на устойчивость с помощью критерия Гурвица, управляющие воздействия подаются на КД.

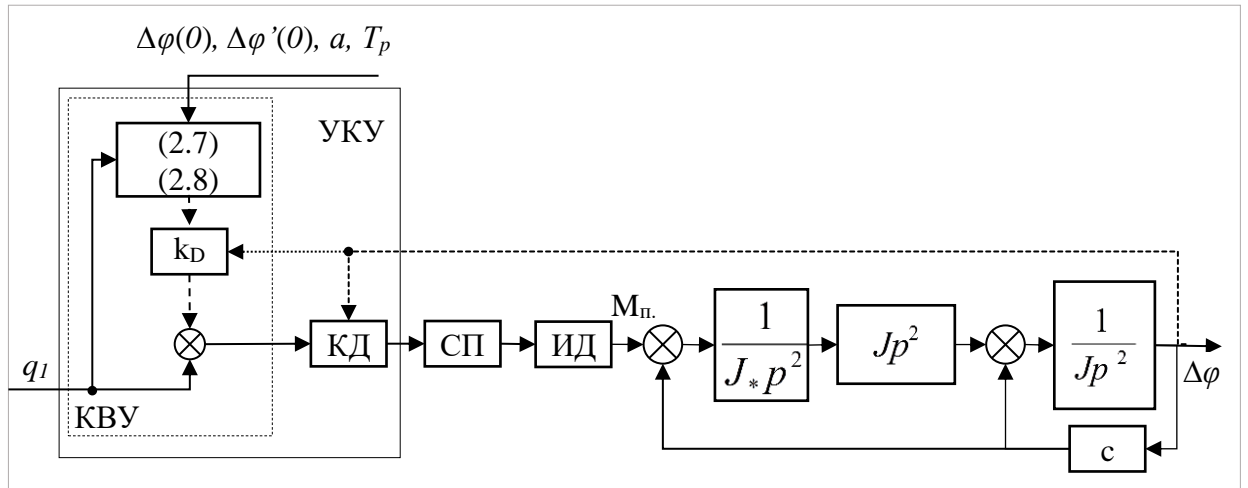


Рис. 2.3. Структурная схема системы с обратной связью по координате упругой деформации

Структурная схема системы управления с учетом управляющего воздействия (2.44) приведена на рис. 2.4. При этом коэффициент усиления обратной связи $k_A = J^*$. В этом случае требует измерять вторую производную упругой координаты.

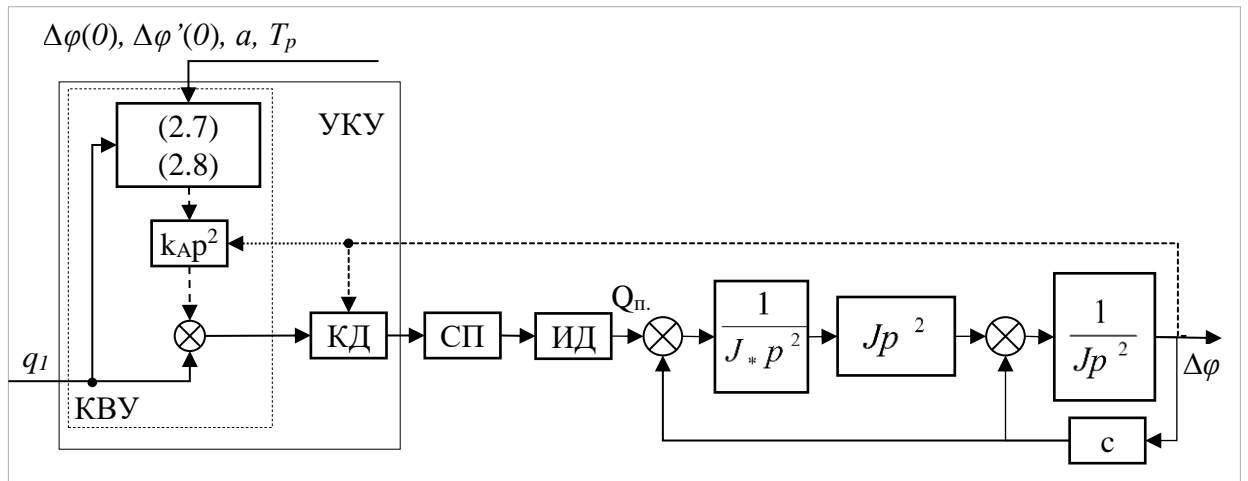


Рис. 2.4. Структурная схема системы с обратной связью по ускорению упругой деформации

Для выражения компенсирующего воздействия (2.32) через координаты системы, используем (2.14) и (2.31). Сначала получим зависимости:

$$\cos \frac{2\pi}{T_p} t = 1 + \frac{\omega_0^2 T_p (2J_* + b_n u T_p)}{2J_* V_{уст}} \Delta\varphi;$$

$$\sin \frac{2\pi}{T_p} t = -\frac{\omega_0^2 T_p^2 (2J_* + b_n u T_p)}{4\pi J_* V_{ycm}} \Delta\varphi'.$$

При подставлении этих выражений в уравнение (2.37), имеем

$$M_{n_0}(t) = \frac{8\pi^2 J_* V_{ycm}}{\omega_0^2 T_p^3 (2J_* + b_n u T_p)} + J_* \left(\frac{4\pi^2}{T_p} - \omega^2 \right) \Delta\varphi + \omega_0^2 b_n u t + \frac{T_p}{2\pi} \left[\frac{b_n u T_p}{2\pi} \left(\omega_0^2 - \frac{4\pi^2}{T_p^2} \right) + \frac{2\pi J_* \tau}{T_p} \left(\frac{4\pi^2}{T_p^2} - \omega^2 \right) \right] \Delta\varphi'. \quad (2.45)$$

Зависимость движущего момента привода от времени в выражении (2.45) сохраняется. Для избавления от этой зависимости предпоследнее слагаемое в уравнении (2.45) можно выразить следующим образом:

$$\omega_0^2 b_n u t = -\frac{4\pi^2 J_*}{T_p} + \frac{J_* \omega_0^2 T_p (2J_* + b_n u T_p)}{V_{ycm}} \varphi_*'' + \frac{\omega_0^2 (2J_* + b_n u T_p) (\omega_0^2 T_p^2 - 4\pi^2)}{V_{ycm} T_p} \Delta\varphi - \frac{\omega_0^2 T_p (2J_* + b_n u T_p)}{4\pi V_{ycm}} \left[\frac{b_n u T_p J_*}{2\pi J_*} \left(\omega_0^2 - \frac{4\pi^2}{T_p^2} \right) + \frac{2\pi \tau}{T_p} \left(\frac{4\pi^2}{T_p^2} - \omega^2 \right) \right] \Delta\varphi'. \quad (2.46)$$

Подставляя выражение (2.46) в уравнение (2.45), получим

$$M_{n_0}(t) = M_0'' + k_D \Delta\varphi + k_V \Delta\varphi' + k_A \varphi_*'', \quad (2.47)$$

где $M_0'' = 4\pi^2 J_* \{ 2(J_* + J) V_{ycm} + T_p (2J_* + b_n u T_p) [2J_*^2 - (J_* + J) \omega_0^2] \} / \omega_0^2 T_p^3 (J_* + J) (2J_* + b_n u T_p)$

– постоянная составляющая момента; коэффициент усиления обратной связи

- по упругому отклонению

$$k_D = \{ 2V_{ycm} [J(4\pi^2 - \omega_0^2 T_p^2) - J\omega_0^2 T_p^2] + \omega_0^2 T_p (2J_* + b_n u T_p) (\omega_0^2 T_p^2 - 4\pi^2) \} / 2V_{ycm} T_p^2;$$

- по скорости упругой деформации

$$k_V = [b_n u T_p (\omega_0^2 - 4\pi^2 / T_p^2) / 2\pi + 2\pi J_* \tau (4\pi^2 / T_p^2 - \omega^2) / T_p] [T_p / 2\pi - \omega_0^2 T_p^2 (2J_* + b_n u T_p) / 4\pi^2 J_* V_{ycm}];$$

- по ускорению вала двигателя

$$k_A = -m_1 m_2 \omega_0^2 T_p (2m_1 + b_1 u T_p) / (m_1 + m_2) V_{ycm}.$$

Структурная схема системы с дополнительными обратными связями вида (2.47) показана на рис. 2.5.

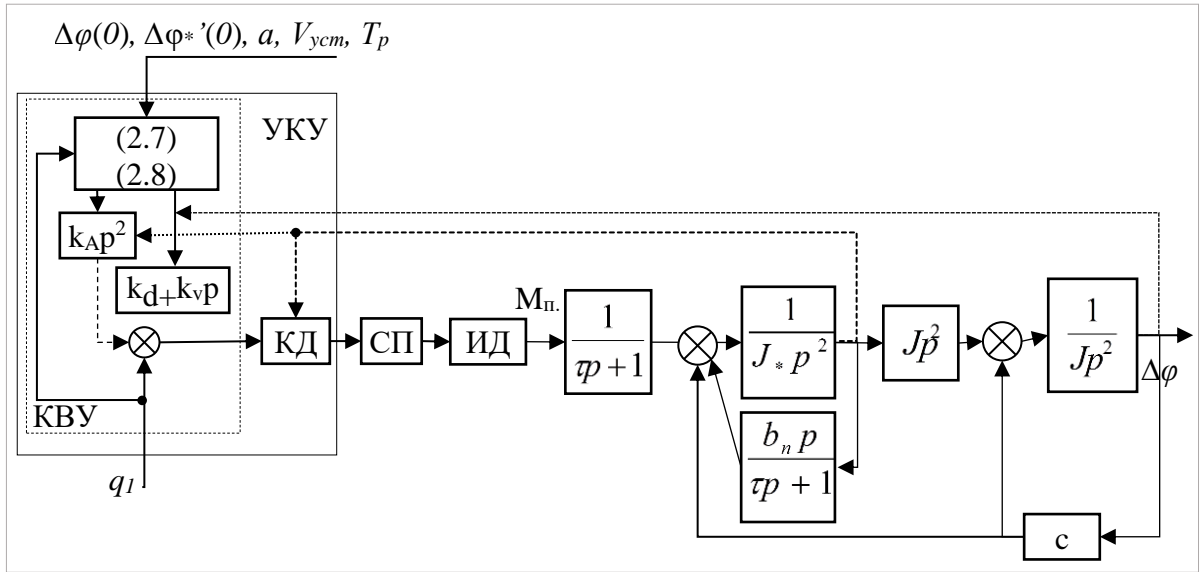


Рис. 2.5. Структурная схема двухмассовой системы с обратными связями

Как видно из этой структурной схемы, полученный закон (2.47) реализуется по принципу обратной связи с коэффициентами усиления k_A , k_V , k_D по упругой координате $\Delta\varphi$ и её производным до второго порядка.

Проверим условия устойчивости мехатронной системы с учетом дополнительных обратных связей. Сначала определим характеристическое уравнение системы с компенсирующим воздействием (2.47)

$$J_* J \tau p^4 + J(J_* - k_A) p^3 + [c \tau (J_* + J) + J(b_n u + k_V)] p^2 + [c(J_* + J) + Jk_D + ck_A] p + cb_n u = 0. \quad (2.48)$$

Коэффициенты уравнения (2.48) должны удовлетворять условиям положительности всех коэффициентов уравнения. Полагая для упрощения расчетов $T = 2\pi / \omega_0, V_{уст} = aT$, запишем

$$a > 2\omega_0 (J_* \omega_0 + \pi b_n u); \quad (2.49)$$

$$ca\tau(J_* + J) + Jb_n ua + J\omega_0^2 \tau [J_* \omega_0 (a + \omega_0^2) + \pi b_n u \omega^2] > J\tau [J_* (a\omega_0 + \omega_0^4) + \pi b_n u \omega_0^3]. \quad (2.50)$$

Из выражения (2.49) делаем вывод, это неравенство соблюдается не всегда. Так как при реальных значениях параметров $\omega_0 < \omega$, поэтому условие (2.50) выполняется практически всегда.

Согласно критерию устойчивости Гурвица, достаточным условием является следующее выражение

$$c(J_* - k_A)^2(c\tau + k_V) + (J_* - k_A)(c + k_D)[c\tau(J - J_*) + J(b_n u + k_V)] - J_* J \tau (c + k_D)^2 > 0. \quad (2.51)$$

Из выражений (2.47) в (2.51), получим следующее условие

$$c + J_* \omega_0^2 (a + \omega^2) + \pi b_n u \omega_0 \omega^2 > J_* (a \omega^2 + \omega_0^4) + \pi b_n u \omega_0^3.$$

Это условие выполняется всегда, так как $\omega > \omega_0$.

Проведено численное моделирование движений мехатронной системы на основе уравнений (2.7), (2.8) с учетом (2.39) с помощью *Matlab m.file* с входным воздействием $M_0 = I(t)$ для проверки эффективности управления.

Результаты исследований показали, что дополнительные воздействия позволили уменьшать амплитуды упругих колебаний, сократить длительность переходных процессов.

В качестве иллюстрации, на рис 2.6 приведены графики упругих колебаний при следующих параметрах исходной системы: $\omega_0 = 7,12$; $\mu = 2$; $n = 0,56$. Сплошные линии обозначают движения без компенсирующего воздействия, а штриховые – с учетом дополнительных воздействий (2.39).

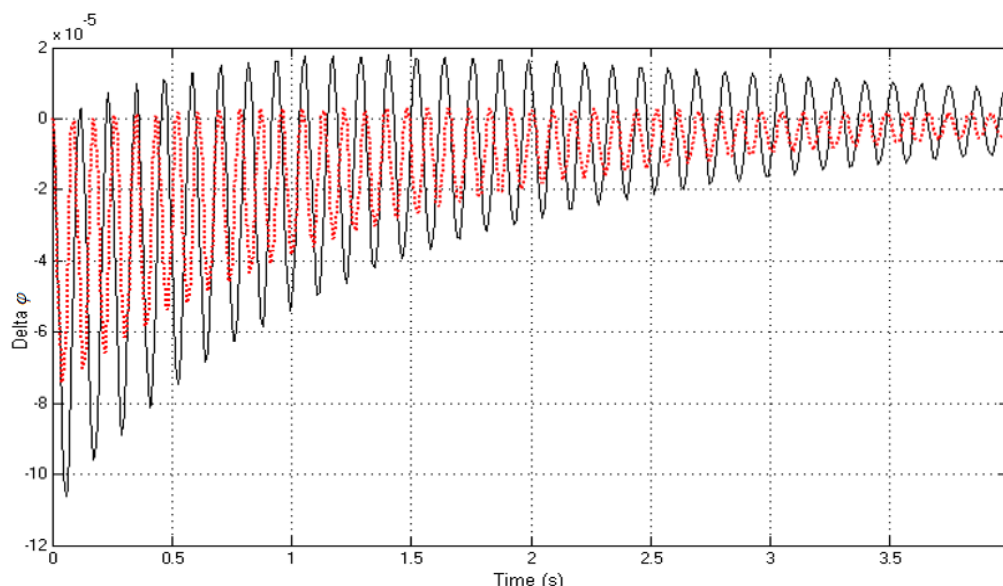


Рис. 2.6. Графики упругих колебаний

Как показали полученные графики, применение предлагаемого алгоритма управления двухмассовой мехатронной системой позволяет уменьшать интенсивность упругих колебаний, увеличивать декременты с $\delta_0 = 0,1$ для исходной системы до $\delta_l = 0,22$ с учетом дополнительных управляющих воздействий.

Также исследовано влияние динамической характеристики привода на эффективность управления. Для этого проведено численное моделирование движения двухмассовой мехатронной системы на основе компенсирующих воздействий (2.39) с учетом (2.30). На вход модели подавалось воздействие в виде $M_0 = I(t)$.

Результаты моделирования показали, что повышение постоянной времени τ за предельное значение снижает эффективность управления упругим движением. В качестве иллюстрации, приведены на рис. 2.7 графики программного движения при различных значениях постоянной времени (кривая 1 ($\tau = 0$), кривая 2 ($\tau = 0,05$), кривая 3 ($\tau = 0,1$), кривая 4 ($\tau = 0,15$)).

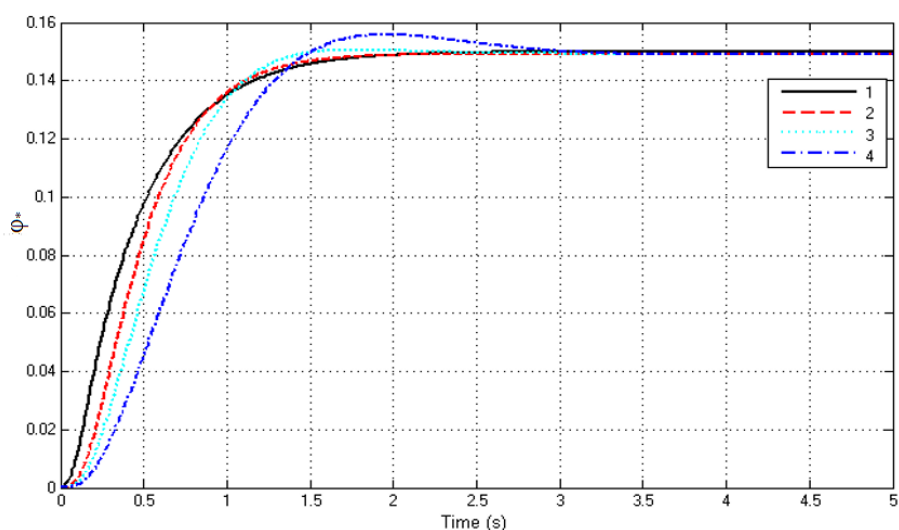


Рис. 2.7. Графики программного движения в зависимости от постоянной времени

Как следует из приведенных графиков, при повышении постоянной времени τ до $0,1c$ эффективность управления сохраняется (кривые 2, 3), при повышении постоянной времени τ до $0,15c$ приводит к увеличению продолжительности переходного процесса. Значение перерегулирования в переходном процессе увеличивается на $(3 - 5)\%$.

2.5. Выводы

1. Предложены расчетная схема и математическая модель мехатронных систем с упругими звеньями, основанная на декомпозиции управляемого движения на программное и колебательное, позволяющая не накладывать ограничений на характер программного движения, определяемого технологическими процессами или условиями применения этих систем.

2. В качестве критериев эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями предложены аналитические зависимости, определяющие заданный вид колебательного движения, которые позволяют не накладывать ограничений на структуру системы управления.

3. На примере двухмассовой расчетной схемы мехатронной системы, продемонстрирована процедура структурно-параметрического синтеза системы управления упругими колебаниями.

Глава 3. Разработка и исследование эффективности алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем

3.1. Исследование алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем на основе задания конечных законов колебательных движений

Рассмотрим задачу разработки алгоритмов управления упругими колебаниями на основе задания конечных законов изменения упругих координат [83]. При задании требуемых уравнений колебательного движения в виде (2.3), постоянные c_i определялись по начальным значениям $\Delta q_0, \dots, \Delta q_0^{(i)}$ в виде:

$$C = A^{-1} \Theta,$$

$$\text{где } C = [c_1, c_2, \dots, c_n], \quad A = \begin{bmatrix} I & I & \cdot & I \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdot & \lambda_n \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_1^{i-1} & \lambda_2^{i-1} & \cdot & \lambda_n^{i-1} \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Delta q_0 \\ \Delta q_0' \\ \cdot \\ \Delta q_0^{(i-1)} \end{bmatrix}.$$

После подстановки этих новых постоянных в системе уравнений (2.1) получаем управляющие воздействия, которые обеспечивать компенсацию упругих колебаний, на примере трехмассовой мехатронной системы в виде:

$$Q_{\text{дон.}} = \left(\sum_{i=1}^l C_i e_i^{\lambda_i t} \sum_{j=0}^5 a_j \lambda_1^{5-j} \right) / \left(\sum_{i=1}^3 b_i p_i^{3-i} \right) \quad (3.1)$$

где

$$\begin{aligned} b_1 &= I; \quad b_2 = 0; \quad b_3 = \omega_2^2 + \omega_3^2 [I + \gamma(n^{-1} - I)]; \quad a_0 = I; \quad a_1 = \mu; \\ a_2 &= \omega_2^2 (I + \gamma^{-1}) + \omega_3^2 [I + \gamma(\eta^{-1} - I)]; \quad a_3 = \mu \{ \omega_2^2 + \omega_3^2 [I + \gamma(\eta^{-1} - I)] \}; \\ a_4 &= \omega_2^2 \omega_3^2 (\gamma^{-1} + \eta^{-1}); \quad a_5 = \omega_2^2 \cdot \omega_3^2 \cdot \mu; \quad p = d/dt; \end{aligned}$$

$\omega_2 = \sqrt{c_2/m_2}$ – парциальная частота передаточного механизма; $\omega_3 = \sqrt{c_3/m_3}$ – парциальная частота исполнительного механизма; $\mu = b_1/m_1$ – относительный коэффициент демпфирования; $\gamma = m_1/m_2$, $\eta = m_1/(m_1 + m_3)$ – соответственно соотношение массы привода по сравнению с массами передаточного и исполнительного механизмов.

Найденный закон управления (3.1) 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.

В первом случае, на основе задания в УКУ математической модели объекта с исходными данными $\Delta q(0)$, $\Delta q'(0)$ и α_i вычисляются дополнительные компенсирующие воздействия $Q_{\text{дон.}}(t)$. Дополнительные сигналы в цифровой форме суммируются с сигналами программного движения q_l и подаются на КД для дальнейшей обработки (см. рис. 3.1).

Во втором случае, для получения дополнительных обратных связей необходимо выразить функции времени $c_i e^{\lambda_i t}$ через упругие деформации и их производные и подставить полученные выражения в (3.1).

Дифференцируя по времени $(l-1)$ раз обе части выражения (2.3), будем иметь

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^l \lambda_i c_i e^{\lambda_i t} = \Delta q'(t) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^l \lambda_i^{l-1} c_i e^{\lambda_i t} = \Delta q^{(l-1)}(t) \end{array} \right. .$$

Откуда

$$E = C_2^{-1} \cdot \Delta_2,$$

$$\text{где } E = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \\ \dots \\ c_l e^{\lambda_l t} \end{bmatrix}, \Delta_2 = \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta q' \\ \dots \\ \Delta q^{(l-1)} \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ c_1 \lambda_1 & c_2 \lambda_2 & \dots & c_n \lambda_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1 \lambda_1^{l-1} & c_2 \lambda_2^{l-1} & \dots & c_n \lambda_n^{l-1} \end{bmatrix}.$$

Подставив эти значения в (3.1), можно получить компенсирующие воздействия, которые реализуются в обратной связи по упругим деформациям:

$$Q_{\text{дон.}} = \left(\sum_{i=1}^l E(i) \cdot \sum_{j=0}^5 a_j \lambda_i^{5-j} \right) / \left(\sum_{i=1}^3 b_i p_i^{3-i} \right)$$

или

$$Q_{доп.} = \sum_{i=1}^l k_{oci} \Delta q^{(i-1)} \quad (3.2)$$

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 рис. 3.1 приведена структурно-функциональная схема системы формирования компенсирующих воздействий. На этой схеме приняты следующие обо-

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

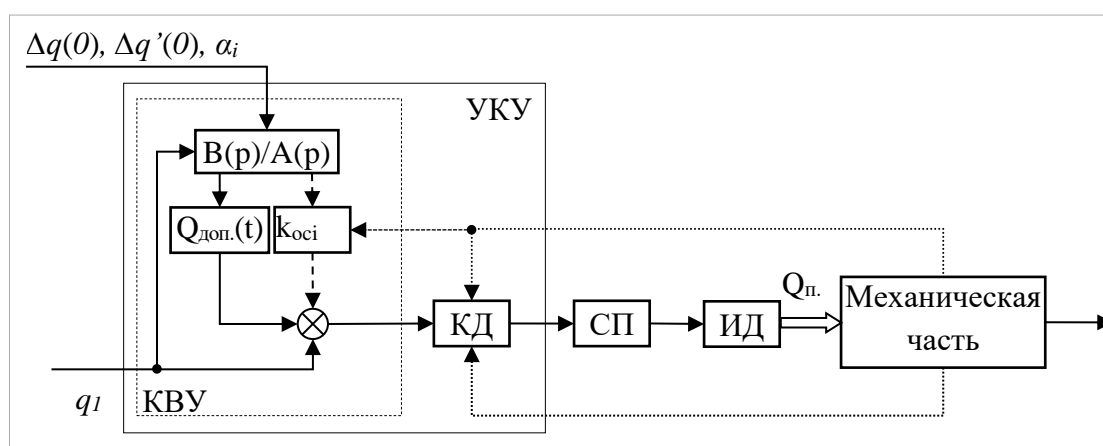


Рис. 3.1 Структурно-функциональная схема системы управления с дополнительными обратными связями

Как следует из этой структурно-функциональной схемы, 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 системы уравнения (2.1) с учетом (3.2) в *Matlab m.file* на примере трехмассовой расчетной схемы исполнительного механизма для различных параметров исходной системы. При этом $l = 2$ ($\alpha_1 = -5$ и $\alpha_2 = -10$), а входные воздействия Q_0 задавались в виде:

$$\begin{cases} Q_0 = 1 \text{ при } t \leq 0,25 \text{ с,} \\ Q_0 = 0 \text{ при } t > 0,25 \text{ с.} \end{cases}$$

При $l=2$ получаем:

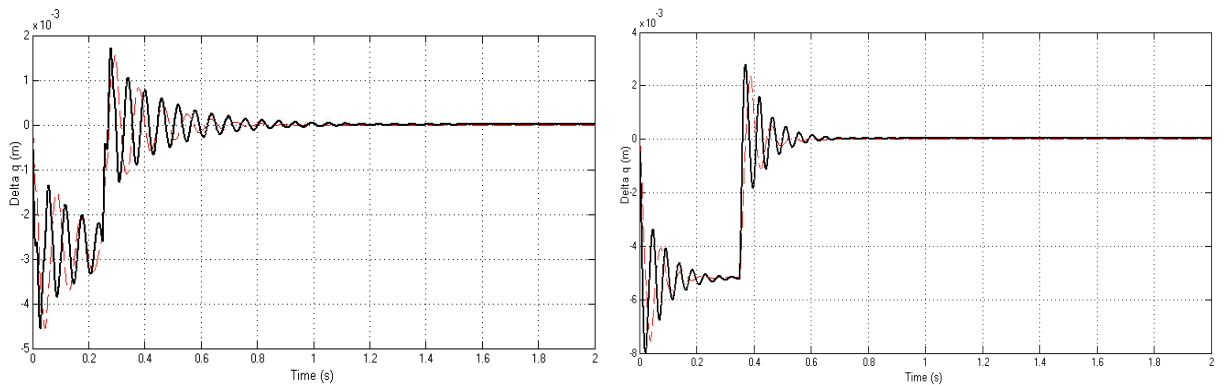
$$k_{oc1} = [\lambda_1 \lambda_2 [a_0(\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + a_1(\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) + a_2(\lambda_1 + \lambda_2) + a_3] + a_5],$$

$$k_{oc2} = \Delta q' [a_0(\lambda_2^4 + \lambda_2^3 \lambda_1 + \lambda_2^2 \lambda_1^2 + \lambda_2 \lambda_1^3 + \lambda_1^4) + a_1(\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + a_2(\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) + a_3(\lambda_1 + \lambda_2) + a_4].$$

Как показали результаты исследований, дополнительные воздействия (3.2) позволили уменьшать амплитуды упругих колебаний, сократить длительность переходных процессов. При этом, повышение третьей парциальной частоты ω_3 , коэффициентов μ и γ приводит к повышению эффективности предложенного алгоритма, а увеличение второй парциальной частоты ω_2 или коэффициента η несколько снижает эффективность управления. Уменьшение коэффициентов α_i в соответствии с условием устойчивости системы повышает эффективность управления.

В качестве иллюстрации на рис 3.2 – 3.4 приведены графики упругих колебаний при различных параметрах исходной системы. Сплошные линии обозначают движения без компенсирующего воздействия, а штриховые – с дополнительным воздействием на основе задании конечных уравнений колебательного движения.

Оценка влияния параметров системы на эффективность управления проводится поочередным изменением значений параметров исходной системы при постоянных остальных.



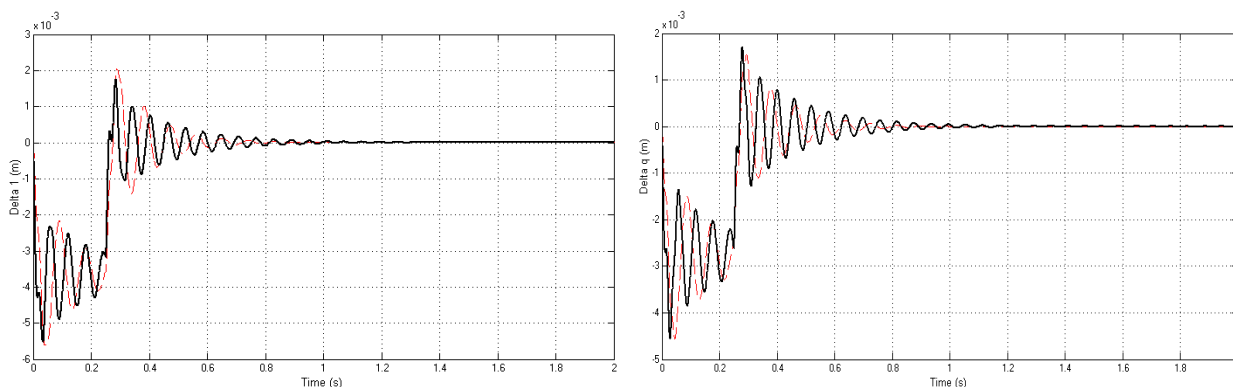
$$\omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0.08, \eta = 0.5, \gamma = 0.3 \quad \omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0.08, \eta = 0.24, \gamma = 0.3$$

а)

б)

Рис. 3.2. Графики упругих колебаний

На рис. 3.2 а) декременты колебаний увеличивается с $\delta_0 = 0,53$ для исходной системы до $\delta_1 = 0,66$ при использовании дополнительных управляющих воздействий (3.2). При снижении массы привода по сравнению с массой исполнительного механизма, определяемого коэффициентом η приводит к повышению эффективности управления упругими колебаниями, декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,51$ до $\delta_1 = 1,25$ (см. рис. 3.2 б).



$$\omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0,08, \eta = 0,24, \gamma = 0,15 \quad \omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0,05, \eta = 0,24, \gamma = 0,3$$

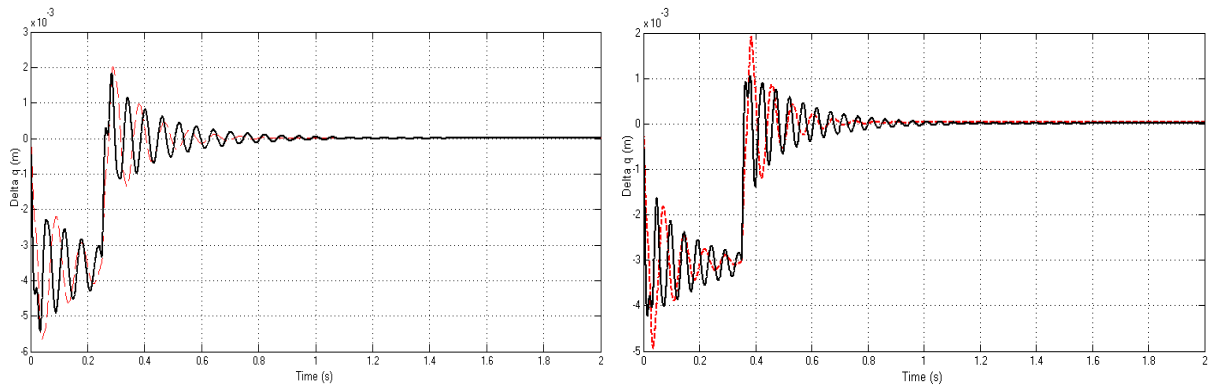
а)

б)

Рис. 3.3. Графики упругих колебаний

Уменьшение массы привода по сравнению с массой передаточного механизма, определяемого коэффициентом γ – к снижению эффективности компенсирующих воздействий. Как показано на рис. 3.3 а) декременты колебаний увеличиваются в небольшой степени с $\delta_0 = 0,58$ до $\delta_1 = 0,69$. При снижении коэффициента μ с 0,08 до 0,05 (рис. 3.3 б) декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,45$ до $\delta_1 = 0,51$.

На рис 3.4 а) показаны графики упругих колебаний при повышении парциальной частоты ω_2 , в результате этого эффективность управления несколько уменьшается. При этом декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,52$ до $\delta_1 = 0,6$. Для случая повышения парциальной частоты ω_3 декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,14$ до $\delta_1 = 0,70$ (см. рис 3.4 б)).



$$\omega_2 = 18, \omega_3 = 14, \mu = 0,05, \eta = 0,24, \gamma = 0,15 \quad \omega_2 = 14, \omega_3 = 18, \mu = 0,05, \eta = 0,24, \gamma = 0,15$$

а)

б)

Рис. 3.4. Графики упругих колебаний

Проведенные исследования также показали, что дополнительные воздействия (3.3) позволяют сократить длительность переходных процессов программного движения и движения второй массы.

В качестве иллюстрации приведены на рис 3.5 и рис. 3.6 графики программного движения и графики движения второй массы при следующих параметрах исходной системы: $\omega_2 = 18; \omega_3 = 14; \mu = 0,05; \eta = 0,24; \gamma = 0,15$.

Как следует из этих графиков, на рис. 3.5 время регулирования и значение перерегулирования программного движения в переходном процессе уменьшались с 0,5с до 0,2с и с 8,2% до 3,7%, а на рис. 3.6 эти значения для движения второй массы также снижались с 0,6с до 0,2с и с 12,3% до 5,5% соответственно.

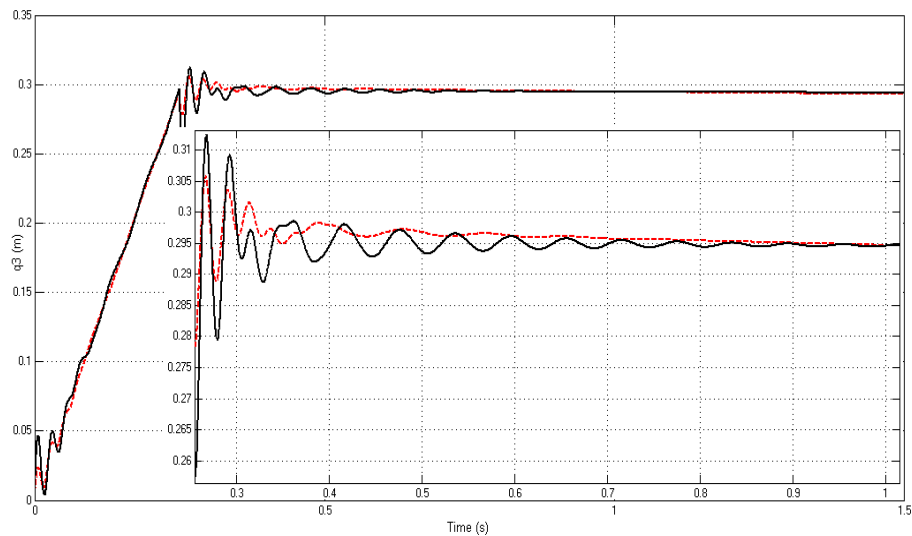


Рис. 3.5. Графики программного движения

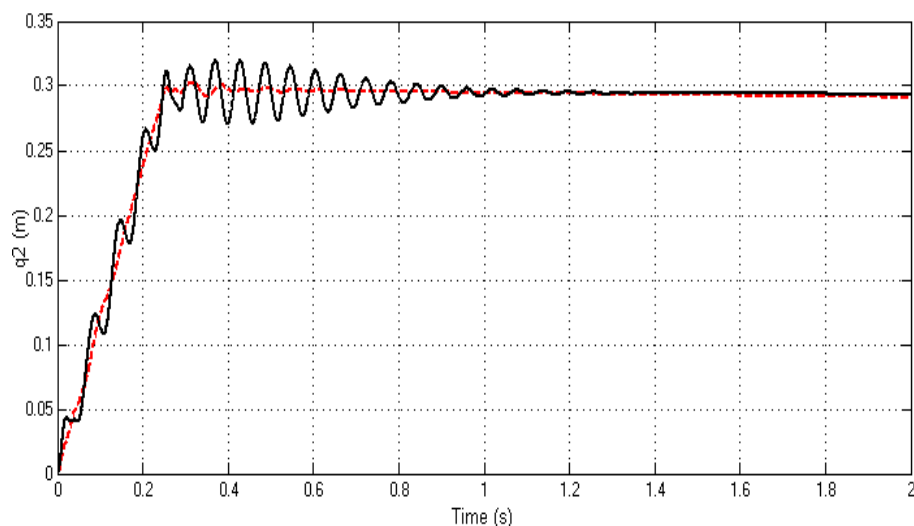


Рис. 3.6. Графики движения второй массы

Таким образом, применение алгоритма управления колебательным движением исполнительных механизмов мехатронных систем на основе задания конечного закона изменения упругих координат позволит повысить быстродействие, снизить амплитуды колебаний, а также сократить длительность переходных процессов программного движения и движения второй массы. Кроме этого, преимуществом этой системы управления также является несложная аналитическая процедура определения компенсирующего воздействия.

3.2. Разработка алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем на основе задания дифференциальных уравнений колебательных движений

Как было отмечено ранее, получаемые при задании конечных уравнений движений результаты справедливы только для конкретных начальных условий движения. В отличие от конечных уравнений, дифференциальные уравнения охватывают не одно, а целый класс движений систем. Для математической модели (2.1) на примере трехмассовой расчетной схемы будем рассматривать задачу управления упругими колебаниями мехатронной системы на основе задания дифференциального уравнения колебательного движения эталонной модели

[88]. При этом необходимые управляющие воздействия определяются по старшим производным упругих перемещений [61].

Как и в главе 2, зададим это уравнение в виде

$$\sum_{i=0}^5 \beta_0 \frac{d^i \Delta q^*}{dt^i} = 0, \quad \beta_i = \text{const}. \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) будет представлять собой модель эталонной системы, а постоянные β_i являются эталонными коэффициентами. Пусть в начальный момент времени $t = 0$, упругие отклонения системы определяются значениями:

$$\Delta q(0) = \Delta q_0, \quad \Delta q^{(n)}(0) = \Delta q_{n0}, \quad n = \overline{1 \div 5}. \quad (3.5)$$

Требуется синтезировать управляющее воздействие

$$Q_{\text{дон}} = Q(\Delta q, \Delta q', \Delta q'' \dots, \Delta q^{(5)}), \quad (3.6)$$

при котором замкнутая система (2.1) и (3.6) переходит из точки (3.5) в окрестность стационарного состояния:

$$\Delta q = 0, \Delta q' = 0, \dots, \Delta q^{(5)} = 0, \quad (3.7)$$

При этом необходимо, чтобы переходный процесс $\Delta q \rightarrow 0$ с требуемой степенью приближения следовал за эталонным процессом $\Delta q^* \rightarrow 0$ с начальными условиями (3.5).

Выразим управляющее воздействие в виде функции старшей производной

$$Q''_{\text{дон}} + uQ'_{\text{дон}} = v(k^* - \Delta q^{(5)}), \quad (3.8)$$

где $u, v = \text{const}$; k^* – требуемое значение пятой производной.

Требуемое значение пятой производной, соответствующее движению модели (3.4), определим по формуле

$$k^* = -\beta_0 \Delta q - \sum_{i=1}^4 \beta_i \Delta q^{(i)} \quad (3.9)$$

при условии, что $\Delta q = \Delta q^*$, $t \geq 0$.

На основе уравнений (3.4), (3.8) и (3.9) исследуем свойства замкнутой системы (3.4) и (3.6). Уравнение замкнутой системы в операторной форме имеет вид

$$\left[(p^2 + up)A(p) + vB(p)(p^5 + \sum_{i=0}^5 \beta_i p^i) \right] \Delta q = 0. \quad (3.10)$$

Параметры u и v находятся из условий устойчивости. Разделив обе части (3.10) на v и осуществив затем предельный переход при $v \rightarrow \infty$, можно установить, что (3.10) будет переходить в (3.4). Следовательно, управляемый процесс $\Delta q \rightarrow 0$ теоретически точно совпадает с процессом $\Delta q^* \rightarrow 0$.

Для минимизации объема измеряемой информации преобразуем выражение (3.8) к виду

$$(p^2 + up)Q_{don.} = vp \left(\frac{k^*}{p} - \Delta q^{(4)} \right)$$

или

$$(p^2 + up)Q_{don.} = vp(\Delta q^{*(4)} - \Delta q^{(4)}) \quad (3.11)$$

так как по определению $k^* = \Delta q^{*(5)}$.

Дважды интегрируя обе части (3.11) при нулевых начальных условиях, будем иметь

$$(1 + 1/p)Q_{don.} = vp(\Delta q^{*(2)} - \Delta q^{(2)}) \quad (3.12)$$

Для реализации алгоритма (3.12) найдем значение второй производной $\Delta q^{*(2)}$. Интегрируя обе части (3.9) при нулевых начальных условиях, имеем

$$\Delta q^{*(4)} = C_1 - \beta_1 \cdot \Delta q - \beta_2 \cdot \Delta q' - \beta_3 \cdot \Delta q^{(2)} - \beta_4 \cdot \Delta q^{(3)}. \quad (3.13)$$

Дважды интегрируя (3.13), найдем $\Delta q^{*(2)}$

$$\Delta q^{*(2)} = C_3 - \beta_3 \cdot \Delta q - \beta_4 \cdot \Delta q' \quad (3.14)$$

где $C_1 = -\beta_0 \int_0^t \Delta q dt$; $C_2 = \int_0^t (C_1 - \beta_1 \cdot \Delta q) dt$; $C_3 = \int_0^t (C_2 - \beta_2 \cdot \Delta q) dt$.

На основании выражений (3.12) и (3.14) получим закон изменения движущей силы привода (без учета его динамической характеристики)

$$Q_{don.} = C_4 vp / (p + u), \quad (3.15)$$

где $C_4 = C_3 - \beta_3 \cdot \Delta q - \beta_4 \cdot \Delta q' - \Delta q^{(2)}$.

Структурная схема мехатронной системы с обратной связью по старшей производной показана на рис. 3.7

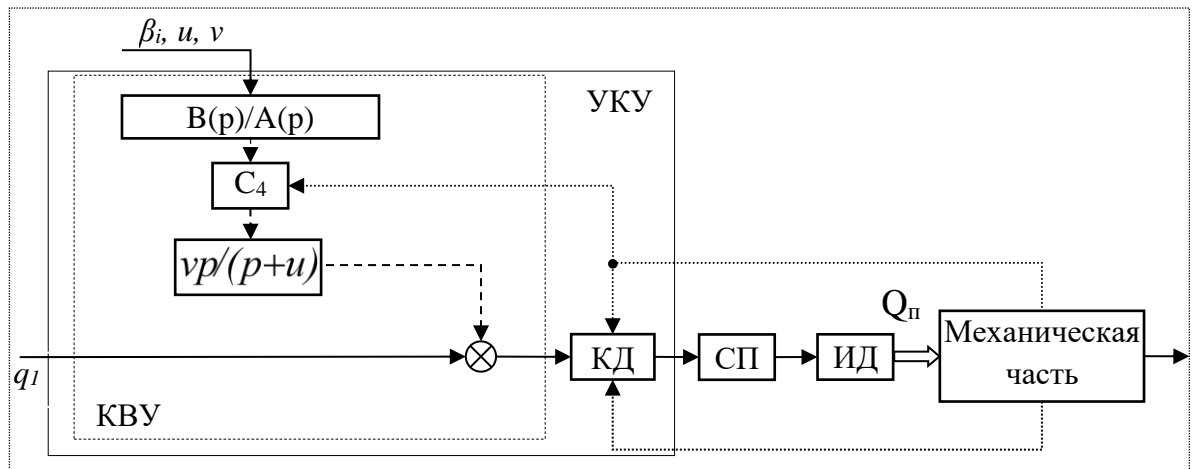


Рис. 3.7. Структурная схема мехатронной системы с обратной связью по старшей производной

Как видно из этой структурной схемы, коэффициенты β_i ($i = \overline{1 \div 4}$) представляются как коэффициенты усиления дополнительной обратной связи по упругой координате Δq и её производным. Для реализации данного управления необходимо вводить информацию о величине упругого отклонения Δq и его производных $\Delta q'$, $\Delta q''$. Отметим факт, что система управления, реализованная с помощью этого метода, не требует проверки на устойчивость.

Как было показано во второй главе, для получения коэффициентов требуемого дифференциального уравнения колебательного движения можно воспользоваться уравнением Вольттера 2-ого рода. Для механической системы (2.1) с тремя массами, дифференциальные уравнения колебаний записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{q}_1 + d_1 \dot{q}_1 - d_2 \Delta q_1' - c_2 \Delta q_1 = Q_n \\ m_2 \ddot{q}_2 + d_2 \Delta q_1' + c_2 \Delta q_1 - d_3 \Delta q_2' - c_3 \Delta q_2 = 0 \\ m_3 \ddot{q}_3 + d_3 \Delta q_2' + c_3 \Delta q_2 = 0, \end{cases} \quad (3.16)$$

Полагая

$$F_2 = -c_2 \Delta q_1; \quad F_3 = -c_3 \Delta q_2,$$

приведем систему (3.16) к одному уравнению относительно переменной F_2 :

$$F_2^{(4)} + p_1 F_2^{(3)} + p_2 F_2'' + p_3 F_2' + p_4 F_2 = 0, \quad (3.17)$$

$$\text{где } p_1 = d_2 \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} + d_3 \frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3}; \quad p_2 = c_2 \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} + c_3 \frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3} + c_2 c_3 \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3};$$

$$p_3 = (d_2 c_3 + d_3 c_2) \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3}; \quad p_4 = c_2 c_3 \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3}.$$

Введем согласно условию приводимости в [37] следующую замену переменной в уравнении (3.17)

$$F_2 = q e^{-\frac{p_1 t}{4}}. \quad (3.18)$$

Дифференцируя равенство (3.18) четыре раза и подставляя в уравнение (3.17) значение функции F_2 и ее производных, получим

$$q^{(4)} + b_2 q^{(2)} + b_3 q' + b_4 q = 0, \quad (3.19)$$

$$\text{где } b_2 = p_2 - \frac{3}{8} p_1^2; \quad b_3 = p_3 - \frac{1}{2} p_1 p_2 + \frac{1}{8} p_1^3; \quad b_4 = p_4 - \frac{1}{4} p_1 p_3 + \frac{1}{16} p_2 p_1^2 - \frac{3}{256} p_1^4.$$

Согласно условию наибольшего значения коэффициента p_1 [37], обращаясь к формулам (3.17), замечаем, что его величина определяется не только коэффициентами затухания системы d_2 и d_3 , но и соотношениями между массами системы. При этом максимальная величина p_1 достигается при наибольших значениях как d_2, d_3 , так и $\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}$, $\frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3}$, то есть

$$\max p_1 \rightarrow \begin{cases} \max d_2 \\ \max d_3 \\ \max \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \\ \max \frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3} \end{cases} \quad (3.20)$$

Однако, коэффициенты затухания d_2 и d_3 могут быть разными, поэтому массы системы часто выбираются в зависимости от отношения этих значений.

Пусть, например, если $d_3 > d_2$, тогда выгодно увеличивать второе слагаемое в формуле для p_1 . Для этого необходимо выполнить условие.

$$m_1 > m_3, \quad (3.21)$$

если $d_2 > d_3$

$$m_1 < m_3. \quad (3.22)$$

Соблюдение неравенства (3.21) и (3.22) является обязательным в зависимости от величин b_2 и b_3 . Величину массы m_2 лучше выбирать всегда как можно меньшей.

Кроме этого, все коэффициенты b_i , имеющие нечетный индекс, должны обращаться в нуль [37]. С учетом того, что в механических системах всегда $d_i \ll c_i$, и отбрасывая величины высоких порядков малости, второе условие эквивалентно следующему выражению

$$c_2 = c_3 \frac{d_3 \left(\frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3} \right)^2 - d_2 \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3} - \frac{1}{m_2^2} \right)}{d_3 \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3} - \frac{1}{m_2^2} \right) - d_2 \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^2}. \quad (3.23)$$

Так как всегда $c_2 > 0$ и $c_3 > 0$, то

$$d_3 \left(\frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3} \right)^2 - d_2 \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3} - \frac{1}{m_2^2} \right) > 0, \quad (3.24)$$

$$d_3 \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3} - \frac{1}{m_2^2} \right) - d_2 \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^2 > 0 \quad (3.25)$$

или

$$d_3 \left(\frac{m_2 + m_3}{m_2 m_3} \right)^2 - d_2 \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3} - \frac{1}{m_2^2} \right) < 0, \quad (3.26)$$

$$d_3 \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 m_2 m_3} - \frac{1}{m_2^2} \right) - d_2 \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^2 < 0. \quad (3.27)$$

Отсюда можно делать вывод, что m_2 не может быть сколько малой по сравнению с m_1 и m_3 , а должна быть такой, чтобы соблюдались условия (3.24) и (3.25) или (3.26) и (3.27).

Таким образом, исходная система (3.16) с учетом полученных значений параметров, удовлетворяющих условиям (3.21) – (3.27) в зависимости от величин b_2, b_3 является эталонной системы.

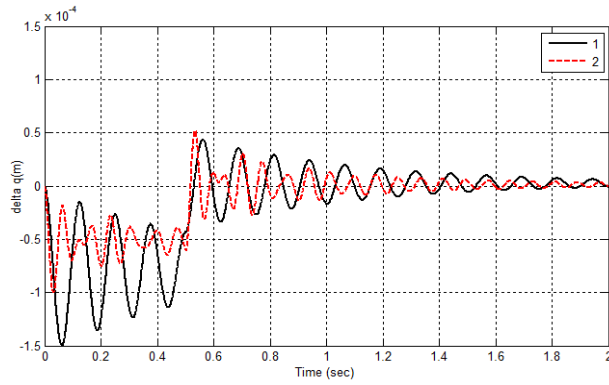
Для проверки эффективности предложенного алгоритма было проведено численное моделирование движения системы уравнения (2.1) с учетом дополнительного воздействия (3.15) в *Matlab m.file* для различных параметров исходной системы. При этом входные воздействия Q_0 задавались в виде:

$$\begin{cases} Q_0 = 1 \text{ при } t \leq 0.5 \text{ с,} \\ Q_0 = 0 \text{ при } t > 0.5 \text{ с.} \end{cases}$$

Как показали результаты исследований, дополнительные воздействия (3.15) позволили уменьшать амплитуды упругих колебаний, сократить длительность переходных процессов. При этом повышение частоты второй массы ω_2 и коэффициента η несколько снижает эффективность управления, а увеличение частоты третьей массы ω_3 или коэффициентов γ, μ приводит к повышению эффективности предложенного алгоритма. Уменьшение коэффициентов α_i в соответствии с условием устойчивости системы повышает эффективность управления.

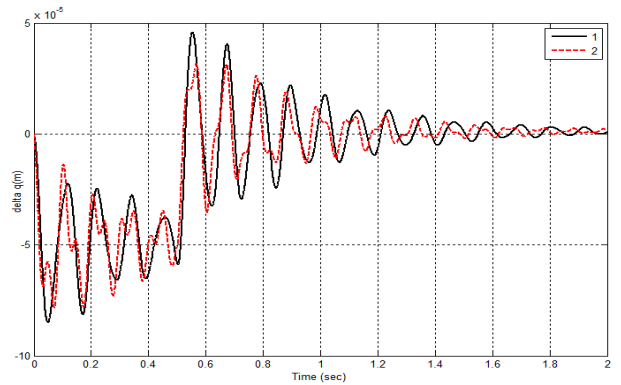
В качестве иллюстрации приведены на рис 3.8 – 3.10 графики упругих колебаний при различных параметрах исходной системы. Кривые 1 обозначают движения без компенсирующего воздействия, а кривые 2 – с дополнительным воздействием на основе задания дифференциальных уравнений колебательного движения.

Как следует из графиков, приведенных на рис. 3.8 а) декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,11$ для исходной системы до $\delta_1 = 0,15$ при использовании дополнительных управляющих воздействий (3.15). При повышении значения парциальной частоты ω_3 эффективность управления упругими колебаниями несколько снижается, декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,12$ до $\delta_1 = 0,17$ (см. рис. 3.8 б)).



$$\omega_2 = 8, \omega_3 = 8, \eta = 0,5, \gamma = 1, \mu = 0,2$$

а)

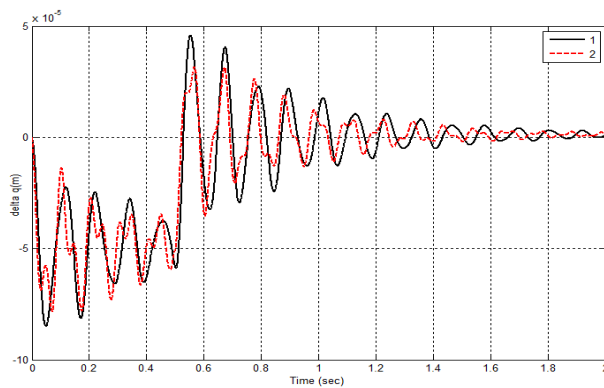


$$\omega_2 = 8, \omega_3 = 15, \eta = 0,5, \gamma = 1, \mu = 0,2$$

б)

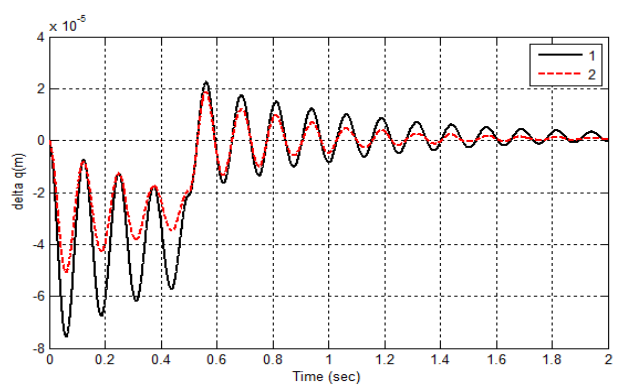
Рис. 3.8. Графики упругих колебаний

На рис 3.9 а) показаны графики упругих колебаний при повышении парциальной частоты ω_2 . В результате этого эффективность управления увеличивается. При этом декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,1$ до $\delta_1 = 0,15$. Увеличение массы привода по сравнению с массой исполнительного механизма, определяемого коэффициентом η приводит к снижению эффективности управления, декременты колебаний $\delta_0 = 0,12$ до $\delta_1 = 0,15$.



$$\omega_2 = 15, \omega_3 = 8, \eta = 0,5, \gamma = 1, \mu = 0,2$$

а)



$$\omega_2 = 8, \omega_3 = 8, \eta = 0,67, \gamma = 1, \mu = 0,2$$

б)

Рис. 3.9. Графики упругих колебаний

При уменьшении коэффициента μ с 0,2 до 0,1 (рис. 3.10 б)), декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,11$ до $\delta_1 = 0,21$, а увеличение массы привода

по сравнению с массой передаточного механизма, определяемого коэффициентом γ – к повышению эффективности компенсирующих воздействий. Как видно из графика, показанных на рис. 3.10 а) декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,11$ до $\delta_1 = 0,14$.

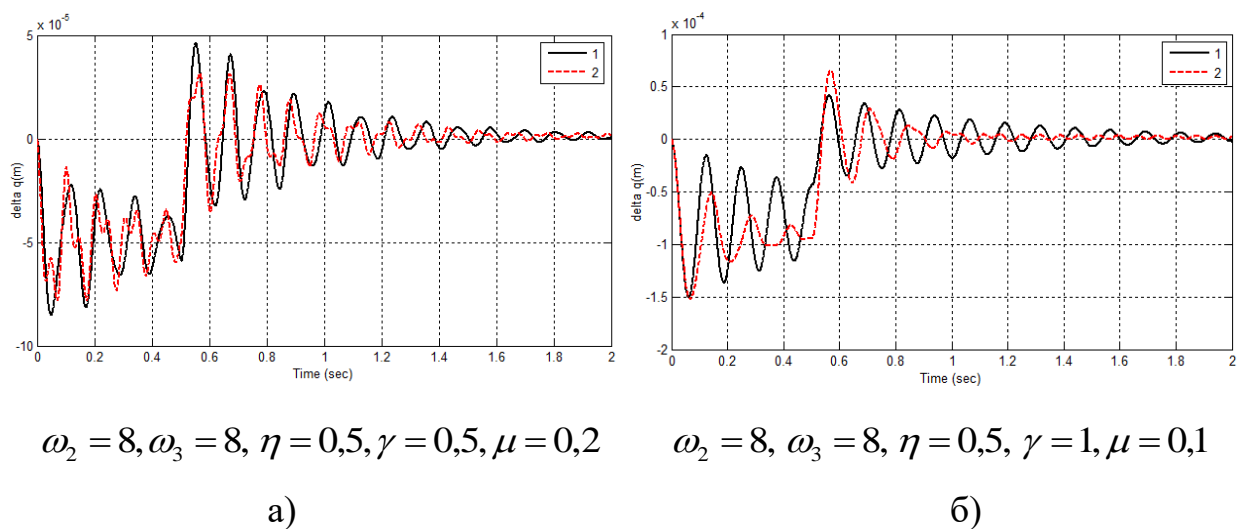


Рис. 3.10. График упругих колебаний

Таким образом, предлагаемые алгоритмы управления колебательными движениям исполнительных механизмов мехатронных систем оказываются удобными не только в практическом, но и вычислительном аспектах, так как при этом требуется вычисление малых отклонений от абсолютных координат и меньшая точность вычисления при управлении в реальном времени.

3.3. Использование метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов в задачах синтеза управления мехатронными системами

В этой главе, будем решать задачу синтеза алгоритмов управления колебаниями трехмассовой мехатронной системы на основе использования метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) [84, 86]. Задача исследования и синтеза алгоритмов управления движением мехатронных систем, исполнительные механизмы которых описываются дифференциальными

уравнениями высокого порядка, представляет собой довольно трудоемкую задачу. При этом часто используются АКОР [80], которые дают комплексную оценку интенсивности колебательных процессов.

С целью облегчения этой задачи, сначала разработаем алгоритмы упрощения расчетных схем этих систем с помощью метода электромеханического подобия [47, 81]. Применение этого метода позволяет упростить задачу синтеза алгоритмов управления, сведя её к эквивалентной задаче управления по отклонению токов через массы $m_n (i_n)$ и $m_l (i_l)$. Однако его использование затруднено сложностью вычисления комплексного сопротивления системы при большом числе элементов. Ниже предлагается другим способом, основанным на определении значений полного комплексного сопротивления и отношения токов i_n и i_l .

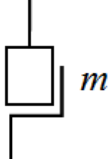
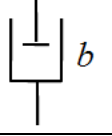
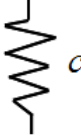
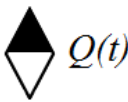
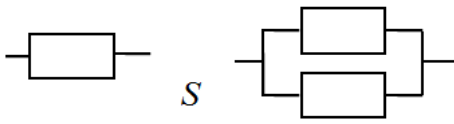
Механическая часть приведенной расчетной схемы на рис. 2.1 представляет собой электромеханическую цепь, выражающую взаимосвязь между носителями механической энергии. При этом роль токов играют скорости движения масс, а роль напряжений – силы.

Хотя в механике машин не существует цепей, рассматриваемых в электротехнике, введение этого понятия позволяет значительно упростить многие решаемые в ней задачи анализа и синтеза. На основе применения метода электрических подобий, представляем расчетную схему, показанную на рис. 2.1, в виде электромеханической цепи, выражающей собой условную взаимосвязь между носителями механической энергии.

Для перехода от расчетной схемы в виде колебательной системы к электромеханической цепи воспользуемся условными обозначениями основных элементов, приведенными в таблице 3.1. Условное обозначение массы подчеркивает, что перемещение, скорость и ускорение массы рассматриваются по отношению к какой-либо системе. Элемент массы рассматривается как имеющий два плюса – один из них расположен на самой массе, а второй – на системе отсчета. Рядом с обозначением проставляется индекс массы m . Условное обозначение со-

противления представляет собой схему демпфера, состоящего из корпуса и подвижного поршня с индексом b . Условное обозначение жесткости представляет собой схему пружины с индексом c . Условное обозначение силы представляет собой ромб, в котором имеется затемненный треугольник, с индексом $Q(t)$. Масса, сопротивление и жесткость являются пассивными элементами цепи, которые изображаются в виде прямоугольников с указанием частного комплексного сопротивления.

Таблица 3.1
Условные обозначения элементов и звеньев

Элементы	Условные обозначения
Массы	
Сопротивления	
Жесткости	
Силы	
Пассивными элементами	

Частным комплексным сопротивлением (ЧКС) называется частное от деления силы на скорость, которое может быть записано в виде

$$S_m = \frac{Q_m}{q_m} = mp; \quad S_b = \frac{Q_b}{q_b} = b; \quad S_c = \frac{Q_c}{q_c} = \frac{c}{p}; \quad (3.28)$$

где 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.

На основе использования этих обозначений, расчетную схему системы можно заменить структурной схемой электромеханической цепи, изображенной на рис. 3.11.

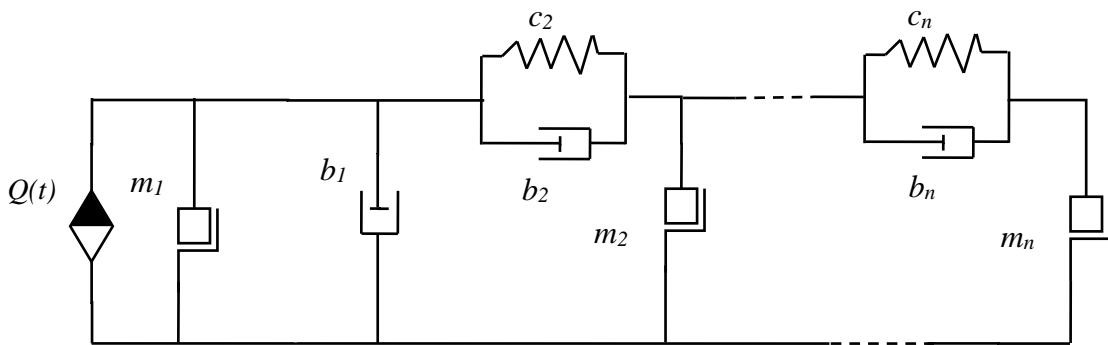


Рис. 3.11. Электромеханическая цепь с условными

На этом рисунке роль токов играют скорости движения масс, а роль напряжений – силы. Преобразуя эту расчетную схему с помощью известных принципов преобразований в электрических цепях, получим расчетную цепь системы, которая показана на рис. 3.12. С помощью этой цепи задача синтеза алгоритмов управления колебаниями системы, приведенной на рис. 2.1, может быть сведена к эквивалентной задаче управления разностью токов через массы $m_n (i_n)$ и $m_1 (i_1)$.

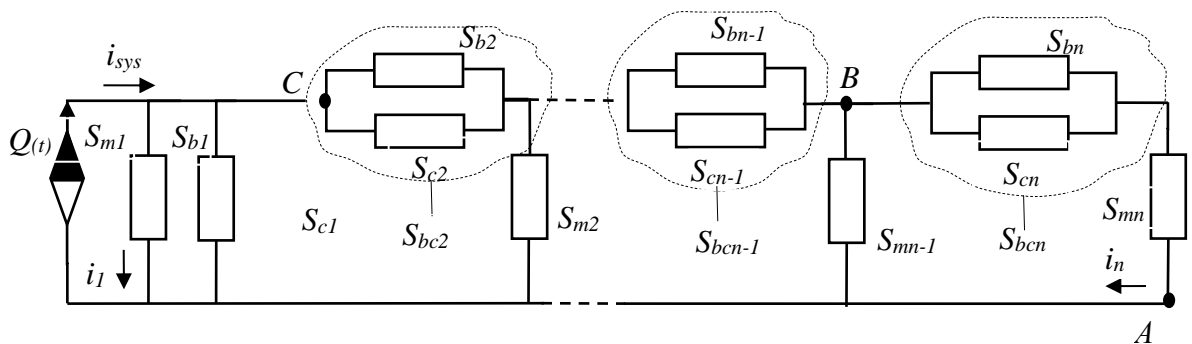


Рис. 3.12. Расчетная цепь системы

Для определения с помощью расчетной цепи сопротивления системы S_{sys} обычно используются эквивалентные замены типа «звезда – треугольник» или «треугольник – звезда» [124]. Недостатком этих методов является сложность процедуры вычисления S_{sys} при большом числе элементов. Определим это сопротивление другим способом, основанным на непосредственном преобразовании расчетной схемы, согласно алгоритма, приведенного на рис. 3.13.



Рис. 3.13. Алгоритм вычисления сопротивления – S_{sys}

Известно, что при последовательном соединении элементов полное комплексное сопротивление определяется дробным выражением, числитель которого представляет собой произведение, а знаменатель – сумму ЧКС отдельных элементов, составляющих данное соединение. При параллельном соединении элементов полное комплексное сопротивление соединения находится как сумма ЧКС элементов, образующих соединение. Как следует из этого алгоритма,

нахождение сопротивления системы S_{sys} начинается с последней массы m_n . Сначала определяется комплексное сопротивление участка AB (см. рис. 3.12), которое обозначается S_n . Затем производится последовательное вычисление комплексных сопротивлений следующих участков до участка с индексом 1.

В результате расчетов получается электрическая цепь для определения i_{sys} , эквивалентная исходной цепи (см. рис. 3.14).

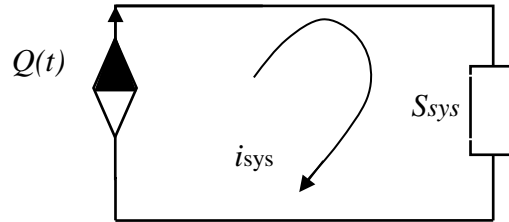


Рис. 3.14. Электрическая цепь для определения i_{sys}

По этой электрической цепи находим значение тока системы

$$i_{sys} = \frac{Q(t)}{S_{sys}}. \quad (3.29)$$

Для определения отношения между токами через массы m_n (i_n) и m_1 (i_1) воспользуемся следующим выражением

$$W = \frac{i_n}{i_1} = \frac{S_{bcn}}{S_{bcn} + S_{mn}} \frac{S_{bc(n-1)}}{S_n + S_{m(n-1)} + S_{bc(n-1)}} \dots \frac{S_{bc2}}{S_3 + S_{m2} + S_{bc2}}. \quad (3.30)$$

Откуда

$$\begin{aligned} \Delta i &= i_n - i_1 \\ \Delta i &= (W - 1)i_1. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Из выражения (3.31), с учетом (3.30), найдем

$$\Delta i = (W - 1) \frac{Q(t)}{S_{sys}}. \quad (3.32)$$

Теперь рассмотрим применение предлагаемый алгоритм для разработки алгоритмов управления упругими колебаниями трехмассовой мехатронной системы. Сначала с помощью алгоритма, приведенного на рис. 3.13, вычисляется сопротивление S_{sys} трехмассовой системы

$$S_{sys} = \frac{(S_{m3}S_{bc3} + S_{m2}S_{m3} + S_{m2}S_{bc3})S_{bc2}}{S_{m3}S_{bc3} + S_{m2}S_{m3} + S_{m2}S_{bc3} + S_{m3}S_{bc2} + S_{bc2}S_{bc3}} + S_{m1} + S_{bc1}. \quad (3.33)$$

Из выражения (3.30) можно найти отношение между токами

$$W = \frac{i_n}{i_1} = \frac{S_{bc3}}{S_{bc3} + S_{m3}} \frac{S_{bc2}}{S_3 + S_{m2} + S_{bc2}}. \quad (3.34)$$

Используя (3.28), перепишем выражение (3.33) в виде

$$S_{sys} = \frac{a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6}{s_0 p^5 + s_1 p^4 + s_2 p^3 + s_3 p^2 + s_4 p + s_5} \quad (3.35)$$

$$a_0 = m_1 m_2 m_3; a_1 = m_2 m_3 (d_1 + d_2) + m_1 (m_2 d_3 + m_3 d_2 + m_3 d_3);$$

$$a_2 = m_2 m_3 c_1 + m_1 (m_2 c_3 + m_3 c_2 + m_3 c_3 + d_2 d_3) + d_1 (m_2 d_3 + m_3 d_2 + m_3 d_3) + m_3 d_2 d_3 + m_2 d_2 d_3 + m_2 m_3 c_2;$$

$$a_3 = c_1 (m_2 d_3 + m_3 d_2 + m_3 d_3) + d_1 (m_2 c_3 + m_3 c_2 + m_3 c_3 + d_2 d_3)$$

где

$$+ m_1 (d_2 c_3 + d_3 c_2) + m_3 d_2 c_3 + m_2 d_2 c_3 + m_3 d_3 c_2 + m_2 d_3 c_2;$$

$$a_4 = c_1 (m_2 c_3 + m_3 c_2 + m_3 c_3 + d_2 d_3) + d_1 (a_5 = c_1 (d_2 c_3 + d_3 c_2) + d_1 c_2 c_3; d_2 c_3 + d_3 c_2) + m_1 c_2 c_3 + c_2 c_3 (m_2 + m_3);$$

$$a_5 = c_1 (d_2 c_3 + d_3 c_2) + d_1 c_2 c_3; a_6 = c_1 c_2 c_3; s_0 = m_2 m_3; s_1 = m_3 d_3 + m_2 d_3 + m_3 d_2;$$

$$s_2 = m_3 c_3 + m_3 c_2 + m_2 c_3 + d_2 d_3; s_3 = d_2 c_3 + d_3 c_2; s_4 = c_2 c_3; s_5 = 0.$$

С учетом (3.28) выражение (3.34) принимает вид

$$W = \frac{\alpha_0 p^2 + \alpha_1 p + \alpha_2}{\beta_0 p^4 + \beta_1 p^3 + \beta_2 p^2 + \beta_3 p + \beta_4}, \quad (3.36)$$

где $\alpha_0 = d_2 d_3; \alpha_1 = d_3 c_2 + d_2 c_3; \alpha_2 = c_2 c_3; \beta_0 = m_2 m_3; \beta_1 = m_2 d_3 + m_3 d_2 + m_3 d_3;$
 $\beta_2 = m_2 c_3 + m_3 c_2 + m_3 c_3 + d_2 d_3; \beta_3 = c_2 d_3 + c_2 d_3; \beta_4 = c_2 c_3.$

На основе выражений (3.35) и (3.36), перепишем (3.32) в матричной форме:

$$\begin{aligned} X' &= AX + BU \\ Y &= CX + DU. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Здесь X – вектор состояния динамической системы; Y – вектор выхода; U – вектор управляющих воздействий; A – матрица динамических параметров системы; B – вектор коэффициентов усиления управляющих воздействий; C – матрица выхода; D – матрица непосредственного воздействия входа на выход:

$$X = \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta q' \\ \Delta q'' \\ \Delta q^{(3)} \\ \Delta q^{(4)} \end{bmatrix}; Y = \Delta q(t); U = u(t); A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-a_5}{a_0} & \frac{-a_4}{a_0} & \frac{-a_3}{a_0} & \frac{-a_2}{a_0} & \frac{-a_1}{a_0} \end{bmatrix}.$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; C = [I \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; D = 0.$$

В качестве используемого интеграла, используем следующее выражение

$$J = 0,5 \int_0^T (X' P X + U' F U) dt, \quad (3.38)$$

где P, F – неотрицательно определенная и положительно определенная матрицы весовых коэффициентов. Обычно матрицы P и F назначаются постоянными и диагональными [70].

Компенсирющие воздействия Q_0 , при котором реализуется минимум квадратичного функционала J , формируются по вектору состояния динамической системы

$$Q_{0on.} = -F^{-1} B^T K X. \quad (3.39)$$

В этом выражении K представляет собой решение стационарного матричного уравнения Риккати:

$$KA + A^T K - KBF^{-1}B^T K + P = 0 \quad (3.40)$$

Для нахождения компенсирующих воздействий (3.39) разрешим уравнение (3.40). При этом матрицы весовых коэффициентов, входящие в это уравнение, зададим в виде:

$$K = [k_{ij}], \quad i, j = 1 \div 5,$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} \end{bmatrix}, F = [f_{11}]. \quad (3.41)$$

Из уравнения (3.40) получим следующую систему уравнений относительно компонентов матрицы K :

$$\begin{aligned} \frac{-2}{a_0}(k_{11}a_5 + k_{12}a_4 + k_{13}a_3 + k_{14}a_2 + k_{15}a_1) - b_1(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{12} + b_3(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{14} + p_{11} &= 0, \\ k_{11} - \frac{1}{a_0}(k_{12}a_5 + k_{22}a_4 + k_{23}a_3 + k_{24}a_2 + k_{25}a_1) - b_1(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{22} + b_3(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{24} &= 0, \\ k_{12} - \frac{1}{a_0}(k_{13}a_5 + k_{23}a_4 + k_{33}a_3 + k_{34}a_2 + k_{35}a_1) - b_1(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{23} + b_3(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{34} &= 0, \\ k_{13} - \frac{1}{a_0}(k_{14}a_5 + k_{24}a_4 + k_{34}a_3 + k_{44}a_2 + k_{45}a_1) - b_1(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{24} + b_3(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{44} &= 0, \\ k_{14} - \frac{1}{a_0}(k_{15}a_5 + k_{25}a_4 + k_{35}a_3 + k_{45}a_2 + k_{55}a_1) - b_1(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{25} + b_3(b_1k_{12} + b_3k_{14})k_{45} &= 0, \\ k_{12} + k_{12} + b_1(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{22} + b_3(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{24} + p_{22} &= 0, \\ k_{22} + k_{13} + b_1(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{23} + b_3(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{34} &= 0, \\ k_{23} + k_{14} + b_1(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{24} + b_3(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{44} &= 0, \\ k_{24} + k_{15} + b_1(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{25} + b_3(b_1k_{22} + b_3k_{24})k_{45} &= 0, \\ k_{32} + k_{23} + b_1(b_1k_{23} + b_3k_{34})k_{23} + b_3(b_1k_{23} + b_3k_{34})k_{34} + p_{33} &= 0, \\ k_{33} + k_{24} + b_1(b_1k_{23} + b_3k_{34})k_{24} + b_3(b_1k_{23} + b_3k_{34})k_{44} &= 0, \\ k_{34} + k_{25} + b_1(b_1k_{23} + b_3k_{34})k_{25} + b_3(b_1k_{23} + b_3k_{34})k_{45} &= 0, \\ k_{34} + k_{34} + b_1(b_1k_{24} + b_3k_{44})k_{24} + b_3(b_1k_{24} + b_3k_{44})k_{44} + p_{44} &= 0, \\ k_{44} + k_{35} + b_1(b_1k_{24} + b_3k_{44})k_{25} + b_3(b_1k_{24} + b_3k_{44})k_{45} &= 0, \\ k_{45} + b_1(b_1k_{25} + b_3k_{45})k_{25} + b_3(b_1k_{25} + b_3k_{45})k_{45} + p_{55} &= 0. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Поскольку определение корней (3.37) аналитическими методами затруднено, воспользуемся численными методами решения. Согласно выражениям (3.39), (3.41), и (3.42) с учетом критерия качества (3.38), запишем компенсирующее воздействие в виде

$$Q_{\text{дон.}} = [(b_1k_{12} + b_3k_{14})\Delta q + (b_1k_{22} + b_3k_{24})\Delta q' + (b_1k_{23} + b_3k_{34})\Delta q'' + (b_1k_{24} + b_3k_{44})\Delta q^{(3)} + (b_1k_{25} + b_3k_{45})\Delta q^{(4)}] f_{11}. \quad (3.43)$$

Функциональная структура управления движением мехатронных систем на основе уравнений (3.37) и (3.43) показана на рис. 3.15.

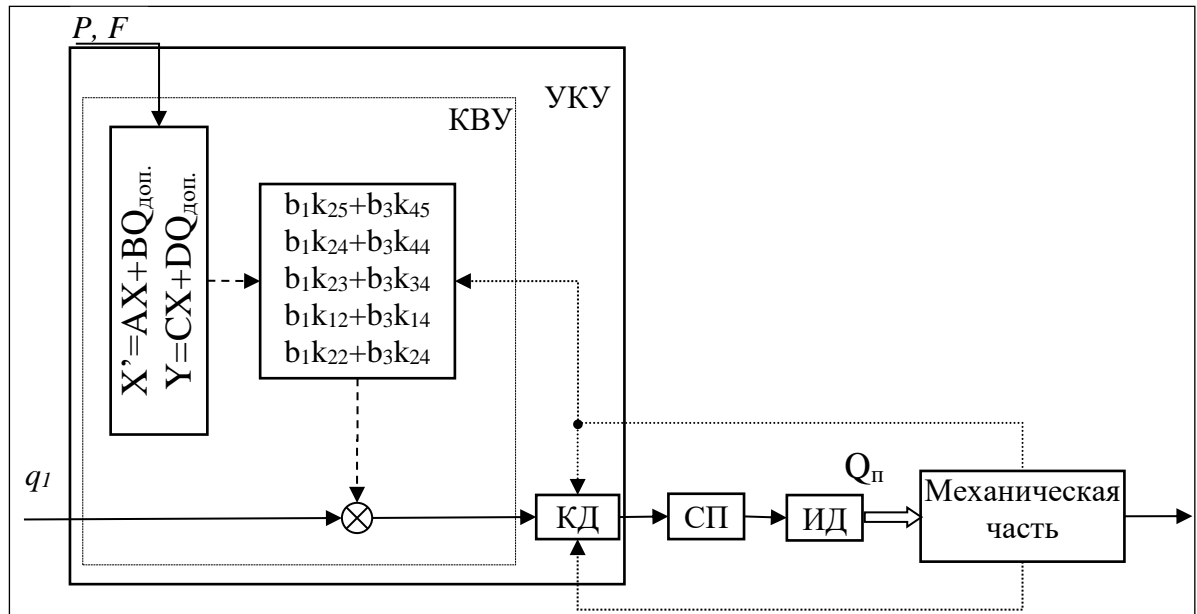


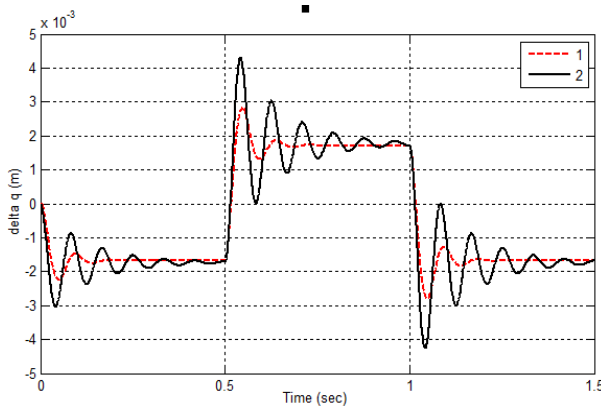
Рис. 3.15. Структурная схема системы на основе использования квадратичного функционала колебательных движений

Как следует из этой структурной схемы, при осуществлении управления по принципу обратной связи необходимо иметь информацию об упругой деформации и ее производных до четвертого порядка. Вычисление коэффициентов усиления обратных связей осуществляется в КВУ по заданным параметрам колебательного движения и весовым коэффициентам p_{ij} и f_{11} . Полученные сигналы управления через КД и СП подаются на привод ИД.

С целью проверки эффективности компенсирующего воздействия (3.43) было проведено моделирование движения мехатронной системы с помощью программы *Matlab m-files* для различных параметров исходной системы. При этом внешние воздействия задавались в виде $Q_0 = I(t)$ с нулевыми начальными условиями.

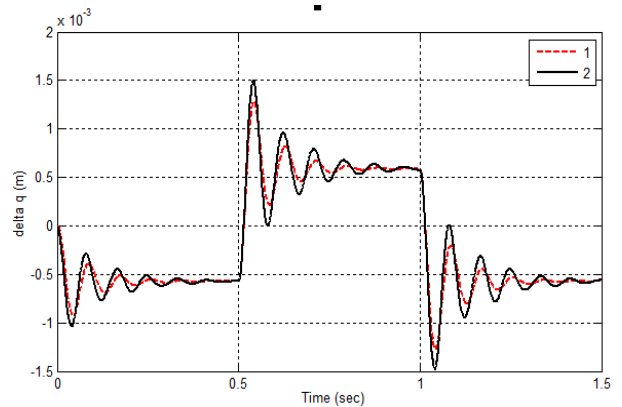
Исследования показали, что дополнительные воздействия (3.43) обеспечивают высокую эффективность, повышает точность, сокращают длительность переходных процессов. При равенстве парциальных частот ω_2 и ω_3 эффективность управления не сильно изменяется при повышении коэффициентов γ и η , а снижение μ приводит к повышению эффективности предложенного алгоритма. Кроме этого, при равных значениях коэффициентов γ , η и μ , эффективность достигается максимально при соотношении $\omega_2 < \omega_3$, а минимально при соотношении $\omega_2 > \omega_3$.

В качестве иллюстрации, на рис. 3.16 – рис. 3.18 показаны графики упругих колебаний исполнительного механизма. Кривые 1 представляют собой графики колебаний исходной системы, а кривые 2 – графики процессов, полученные при учете компенсирующих воздействий (3.43).



$$\omega_2 = 12; \omega_3 = 12; \eta = 0,5; \gamma = 1; \mu = 0,1$$

а)

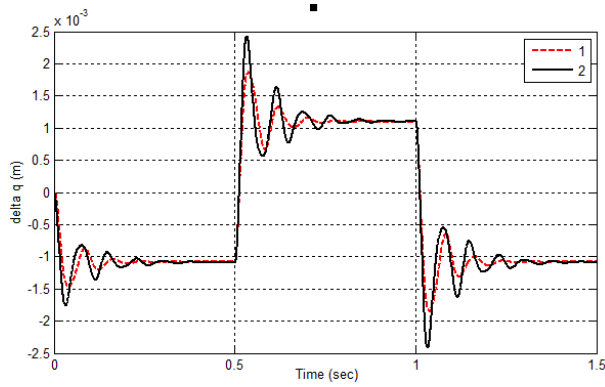


$$\omega_2 = 12; \omega_3 = 12; \eta = 0,75; \gamma = 1; \mu = 0,1$$

б)

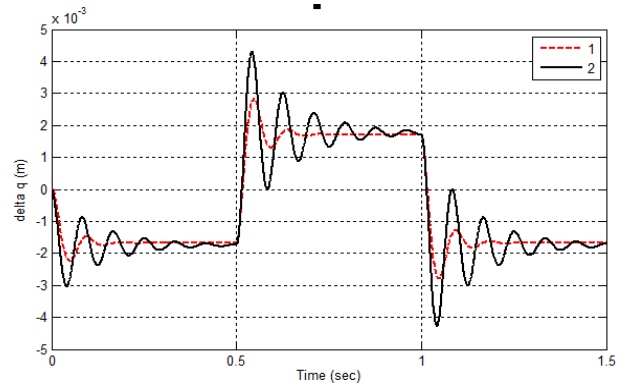
Рис. 3.16. График упругих колебаний

На рис. 3.16 а) декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,67$ для исходной системы до $\delta_I = 0,86$ при использовании дополнительных управляющих воздействий. При снижении массы привода по сравнению с массой исполнительного механизма, определяемого коэффициентом η приводит к повышению эффективности управления упругими колебаниями, декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,93$ до $\delta_I = 1,16$ (см. рис. 3.16 б)).



$$\omega_2 = 12; \omega_3 = 12; \eta = 0,5; \gamma = 0,5; \mu = 0,1$$

а)

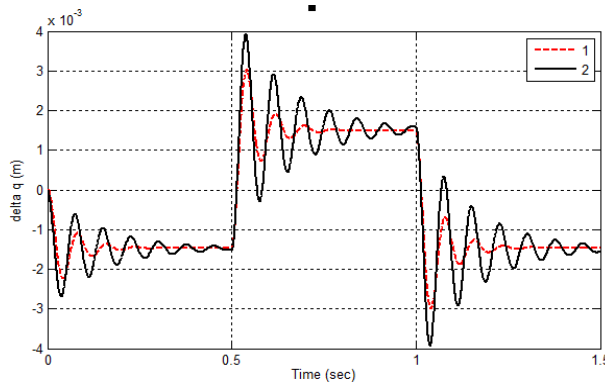


$$\omega_2 = 12; \omega_3 = 12; \eta = 0,5; \gamma = 1; \mu = 0,05$$

б)

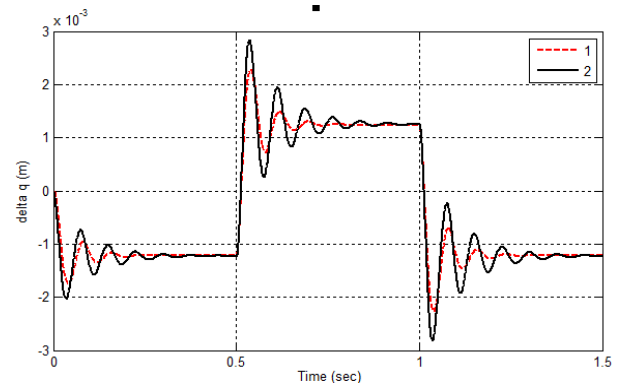
Рис. 3.17. График упругих колебаний

Уменьшение массы привода по сравнению с массой передаточного механизма, определяемого коэффициентом γ приводит к снижению эффективности компенсирующих воздействий. Как показано на рис. 3.17 а) декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,92$ до $\delta_1 = 1,18$. При снижении μ (рис. 3.17 б)), декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,69$ до $\delta_1 = 2,3$.



$$\omega_2 = 12; \omega_3 = 16; \eta = 0,5; \gamma = 1; \mu = 0,1$$

а)



$$\omega_2 = 16; \omega_3 = 12; \eta = 0,5; \gamma = 1; \mu = 0,1$$

б)

Рис. 3.18. График упругих колебаний

На рис 3.18 а) показаны графики упругих колебаний при соотношении $\omega_2 < \omega_3$, а на рис 3.18 б) минимально при соотношении $\omega_2 > \omega_3$. Декременты колебаний увеличиваются с $\delta_0 = 0,7$ до $\delta_1 = 1,32$ и с $\delta_0 = 0,79$ до $\delta_1 = 1,33$ соответственно.

Рассмотренный алгоритм управления колебательными движениями исполнительных механизмов мехатронных систем оказываются удобными при необходимости учета различных ограничений, а также в случае, когда эти механизмы описываются дифференциальными уравнениями высокого порядка.

3.4. Исследование влияния динамических характеристик приводов и замкнутости системы управления на эффективность управления движением

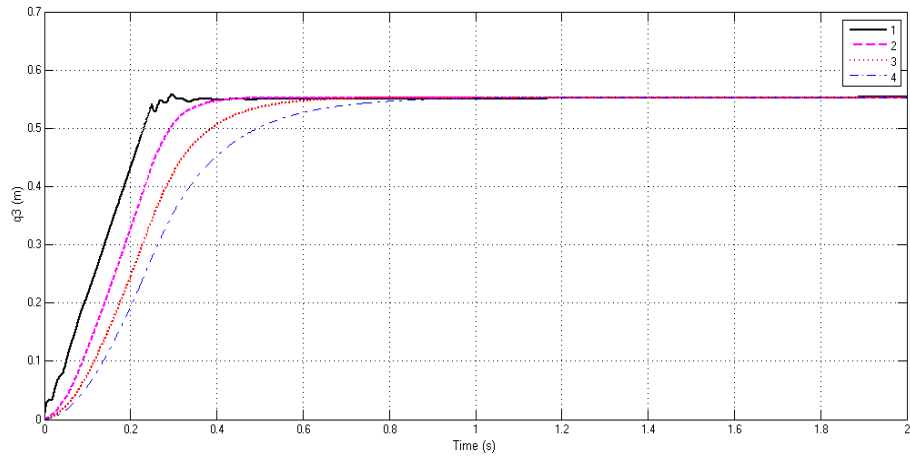
При реализации рассмотренных алгоритмов необходимо учесть динамическую характеристику привода в расчетной модели. Исследуем влияние этих свойств на эффективность управления упругими колебаниями предложенных алгоритмов с учетом выражением (2.30).

Для этого было проведено численное моделирование движения трехмассовой мехатронной системы на основе компенсирующих воздействий (3.2) с учетом (3.44) в программной среде *Matlab-m.file*. Входное воздействие $Q_n=I(t)$.

Результаты моделирования показали, что повышение постоянной времени τ несколько снижает эффективность управления упругим движением.

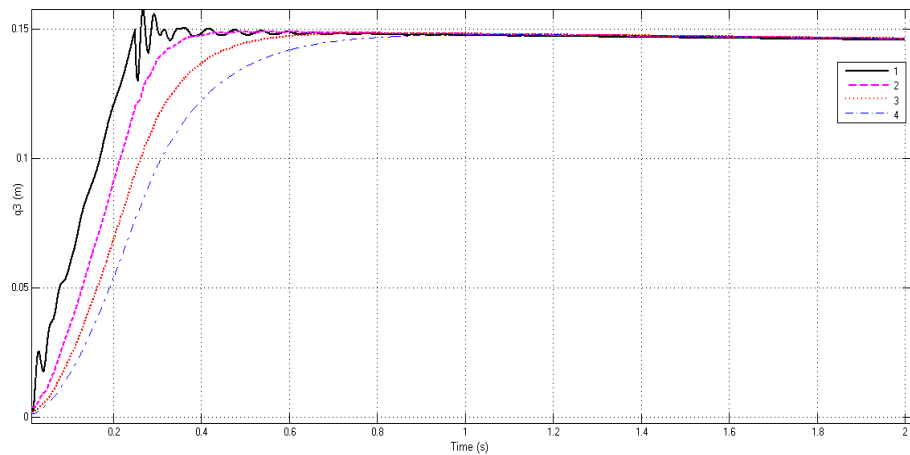
В качестве иллюстрации на рис. 3.19 а) и 3.19 б) приведены графики программного движения при различных значениях постоянной времени (кривая 1 – исходная система, кривая 2 ($\tau = 0,05$), кривая 3 ($\tau = 0,1$), кривая 4 ($\tau = 0,15$)).

Как следует из графиков, при повышении постоянной времени τ до $0,05c$ эффективность управления упругими колебаниями почти сохраняется (кривые 2), при повышении постоянной времени τ до $0,1c$ и $0,15c$ приводит к увеличению продолжительности переходного процесса.



$$\omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0,08, \eta = 0,24, \gamma = 0,3$$

а)



$$\omega_2 = 14, \omega_3 = 18, \mu = 0,08, \eta = 0,5, \gamma = 0,3$$

б)

Рис. 3.19. Графики программного движения в зависимости от постоянной времени

Также было проведено исследование влияния замкнутости системы программного управления основными датчиками обратных связей на эффективность управления. При этом движущие силы приводов формируются согласно выражения

$$Q_n = k_y (q_{зад} - k_{oc} q^*), \quad (3.44)$$

где k_y, k_{oc} – коэффициенты пропорциональности и усиления дополнительной обратной связи соответственно; $q_{зад}$ – заданная управляемая координата.

Подставив эти значения в (2.1) можно получить компенсирующие воздействия на основе задания конечных законов изменения колебательных движений, которые реализуются по принципу обратной связи по упругим деформациям

$$Q_{дон.}^* = \sum_{i=1}^l k_{oci}^* \Delta q^{(i-1)} \quad (3.45)$$

$$k_{oci}^* = \sum_{j=0}^5 a_j \lambda_i^{5-j} / (\sum_i^3 b_i p_i^{3-i}), \quad i = \overline{1, l}; \quad p = d/dt; \quad k_0 = k_y k_{oc} / m_1;$$

где

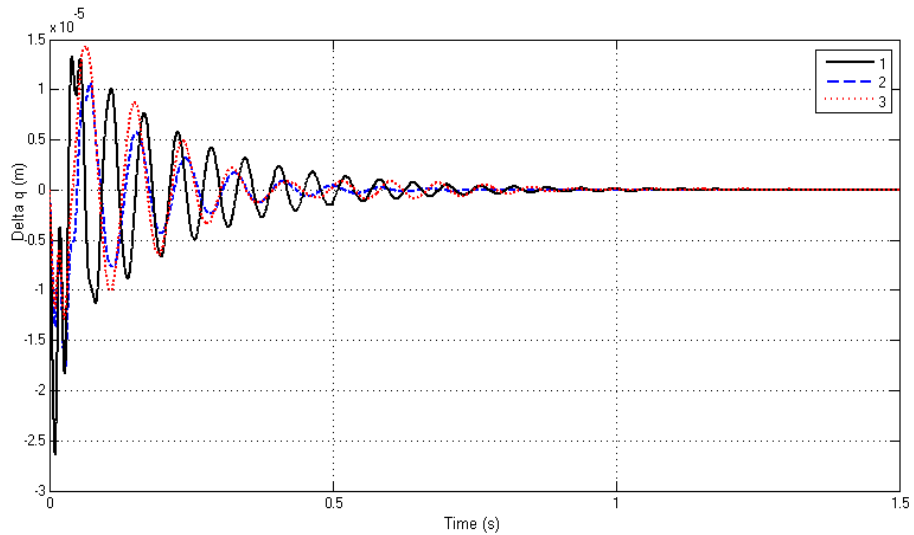
$$\begin{aligned} b_1 &= 1; \quad b_2 = 0; \quad b_3 = \omega_2^2 + \omega_3^2 [1 + \gamma(\eta^{-1} - 1)]; \quad a_0 = 1; \quad a_1 = \mu; \\ a_2 &= \omega_2^2 (1 + \gamma^{-1}) + \omega_3^2 [1 + \gamma(\eta^{-1} - 1)] - k_0; \quad a_3 = \mu \{ \omega_2^2 + \omega_3^2 [1 + \gamma(\eta^{-1} - 1)] \}; \\ a_4 &= \omega_2^2 \omega_3^2 (\gamma^{-1} + \eta^{-1}) - k_0 \{ \omega_2^2 + \omega_3^2 [1 + \gamma(\eta^{-1} - 1)] \}; \quad a_5 = \omega_2^2 \omega_3^2 \mu. \end{aligned}$$

При сравнении компенсирующих воздействий без учета (3.2) и с учетом замкнутости системы программного управления (3.45) можно сделать вывод, что они отличаются друг от друга только наличием члена k_0 в коэффициентах a_2 и a_4 .

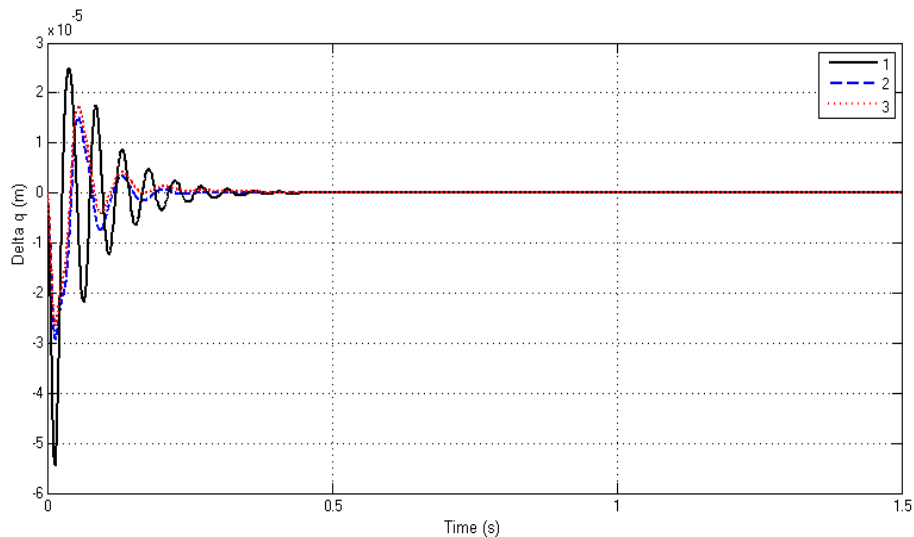
Для проверки этого влияния были проведены исследования движения мехатронной системы с помощью *Matlab-m.file*. При этом внешние воздействия задавались в виде единичного ступенчатого сигнала $Q=I(t)$ с нулевыми начальными условиями.

Исследования показали, что с учетом замкнутости системы управления программным движением эффективность предложенных алгоритмов уменьшается.

С целью иллюстрации на рис. 3.20 а) и 3.20 б) показаны графики упругих колебаний трехмассовой системы при различных значениях параметров. При этом кривая 1 представляют собой графики колебаний исходной системы, кривые 2 и 3 – графики процессов, полученные с использованием компенсирующих воздействий без учета и с учетом замкнутости системы программного управления соответственно.



а) $\omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0,08, \eta = 0,24, \gamma = 0,3$



б) $\omega_2 = 14, \omega_3 = 14, \mu = 0,08, \eta = 0,5, \gamma = 0,3$

Рис. 3.20. Графики упругих колебаний

Как следует из приведенных графиков, на рис. 3.21 а) декременты колебаний исходной системы повышаются со значения $\delta_1 = 0,28$ (кривая 1) до $\delta_2 = 0,68$ (кривая 2) и $\delta_3 = 0,47$ (кривая 3), а на рис. 3.21 б) эти значения соответственно равны: $\delta_1 = 0,33$, $\delta_2 = 1,6$ и $\delta_3 = 1,50$.

Таким образом, замкнутость системы управления программным движением снижает эффективность пользования предлагаемых алгоритмов управления на основе решения ОЗД для компенсации упругих колебаний мехатронных систем.

3.5. Разработка алгоритма и программы структурно-параметрического синтеза систем управления

На основе приведенных исследований был разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза систем управления колебаниями мехатронных машин с упругими звеньями, блок-схема которого показана на рис. 3.21 [82]. Основой для работы алгоритма являются система уравнений (2.1) с учетом заданных уравнений (2.3) – (2.6), (3.1), (3.2), (3.15), (3.43).

Предварительно определяются параметры, входящие в системе уравнений (2.1). Для этого необходима адекватная математическая модель объекта управления. Получение этой модели и идентификации ее параметров можно проводиться с помощью экспериментов исследований упругих характеристик и свободных колебаний звеньев исполнительного механизма. Затем производится либо расчет управляющего воздействия в виде временных функций по выражениям (3.1), либо расчет коэффициентов дополнительных обратных связей согласно формулам (3.2), (3.15), (3.43) с обязательной проверкой условий устойчивости.

Алгоритм программы работает следующим образом:

1. Вводятся исходные данные для расчета: приведенные массы звеньев исполнительного механизма мехатронных систем; коэффициенты жесткости; коэффициенты вязкого трения; параметры приводов.

2. Выполняются вычисления, связанные с определением коэффициентов, входящих в выражениях (3.1), (3.2), (3.15) и (3.43): собственные частоты колебаний ω_2, ω_3 ; γ, η – соответственно соотношение массы привода по сравнению с массами передаточного и исполнительного механизмов; относительного коэффициента вязкого трения μ .

3. Выбор метода синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями исполнительного механизма мехатронных систем.

На этом этапе проводится выбор методов синтеза алгоритмов управления колебаниями, рассмотренных в третьей главе.

А. Задание конечного уравнения колебательного движения.

1. Ввод начальных условий – значения упругих колебаний и их производных в моменте $t = 0$.

2. Для случая разомкнутого управления, закон управления определяется по формуле (3.1).

3. Для случая управления по принципу обратной связи, надо пересчитать путем исключения времени из закона управления в функции координат для управления по формуле (3.2). При этом необходимо определить коэффициенты обратной связи k_{oci} , $i = \overline{1, l}$.

4. Производится проверка условий устойчивости системы. Найденные коэффициенты усиления дополнительной обратной связи проверяются на устойчивость с помощью критерия Гурвица.

Б. Задание дифференциального уравнения колебательного движения.

1. Вычисление коэффициентов эталонной модели.

Как было показано в третьей главе, коэффициенты требуемого дифференциального уравнения колебательного движения вычисляются на основе системы уравнения (3.16) с помощью уравнений (3.23) – (3.27).

2. Вычисление компенсирующего воздействия.

Компенсирующее воздействие определяются по старшей производной с эталонным дифференциальным уравнением и реализуется по принципу обратной связи согласно структурной схеме на рис. 3.7.

В. С помощью квадратичного функционала качества.

1. Вычисление сопротивления S_{sys} с помощью алгоритма, приведенного на рис. 3.13.

2. Определение отношения между токами через массы $m_n(i_n)$ и $m_l(i_l)$ путем использования выражения (3.30).

3. На основе полученных результатов, перепишем (3.32) в матричной форме.

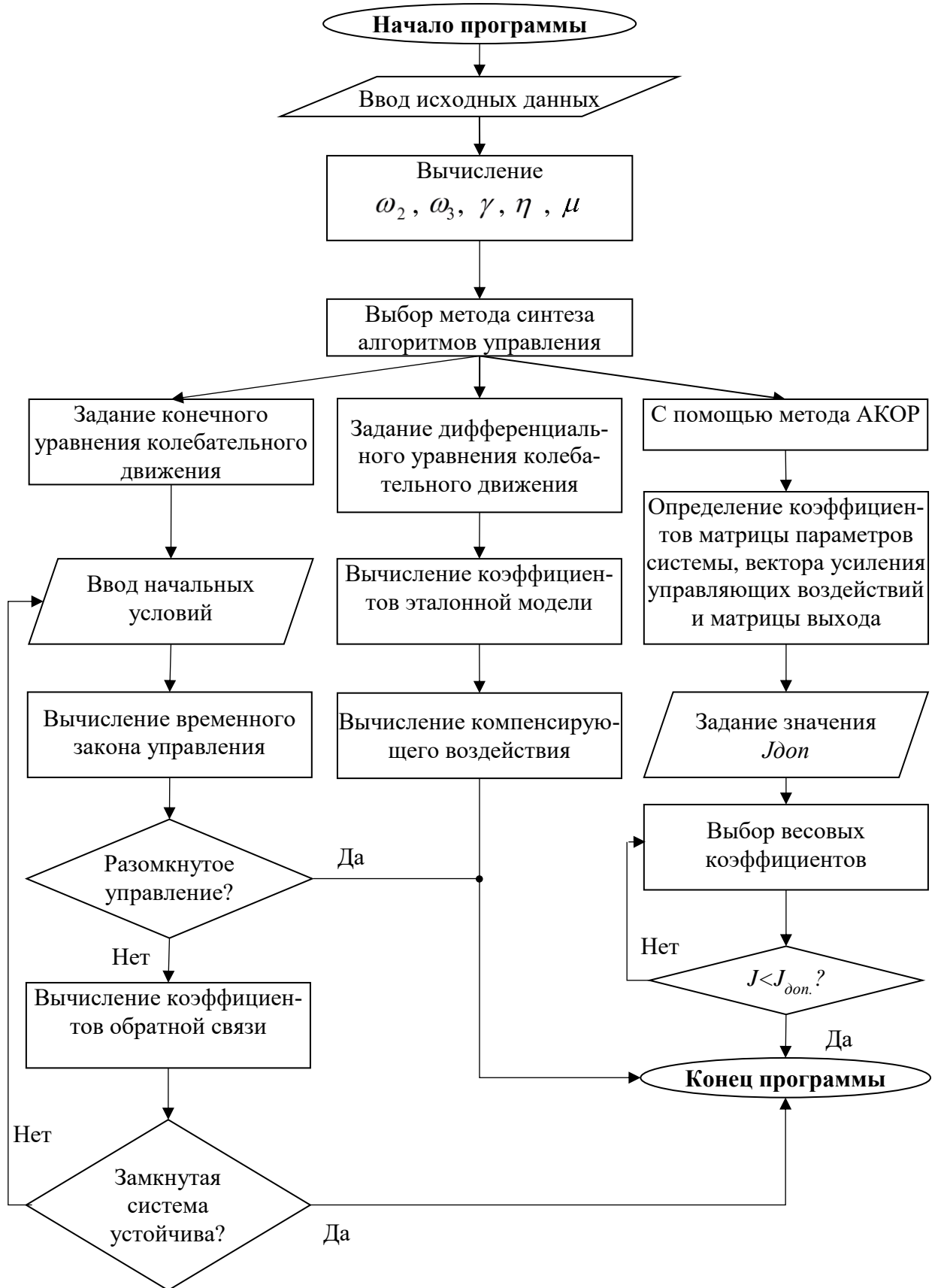


Рис. 3.21. Алгоритм структурно-параметрического синтеза систем управления

4. Назначить требуемый квадратичный функционал J_{don} .
5. Вычисление компенсирующего воздействия.
6. Проверка на условие $J < J_{don}$.

5. Конец программы.

Данный алгоритм реализован в виде программы с использованием алгоритмического языка *Matlab* версии 7.11.0.584 (R2010b). При этом необходимы: CPU Intel-Pentium IV и выше, объем оперативной памяти RAM – не меньше 256 MB, объем свободной памяти HDD – не меньше 1GB, программное обеспечение – WindowsXP 2000 и выше.

В качестве иллюстрации, на рис. 3.22 приведен интерфейс программы, при котором был выбран алгоритм управления упругими колебаниями на основе задания дифференциального уравнения колебательных движений.

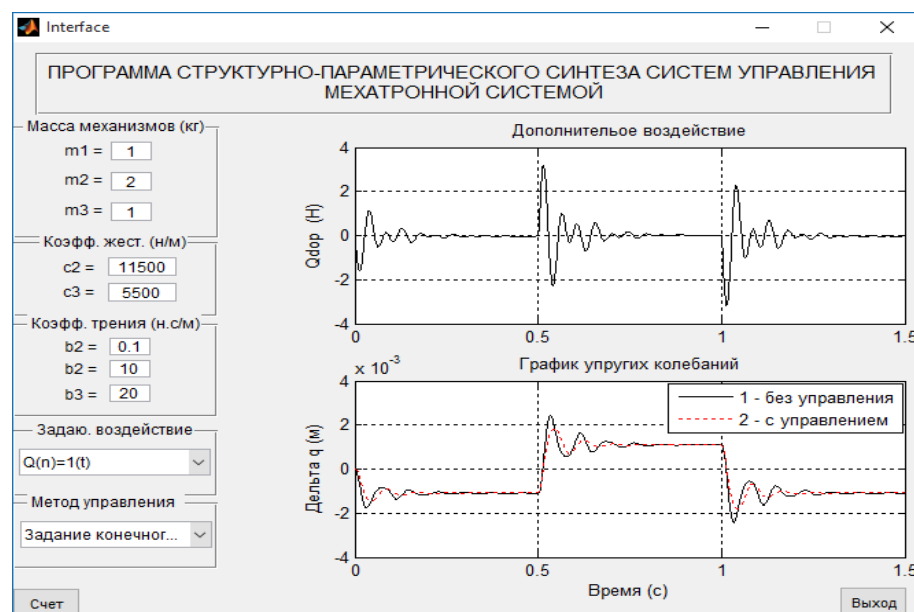


Рис. 3.22. Интерфейс программы

Такой алгоритм может быть использован при синтезе управления упругими колебаниями в процессе реализации управляемого движения. Особенно эффективно его применение в мехатронных системах, обладающих развитыми системами управления, например, в манипуляционных роботах. В этом случае

предлагаемый алгоритм в сочетании с выше описанным программным комплексом, позволит определять наиболее эффективную структуру необходимых управляющих воздействий в режиме реального времени.

3.6. Выводы

1. Разработаны алгоритмы управления упругими колебаниями мехатронных систем на основе задания конечных и дифференциальных управлений колебательных движений и проведено исследование их эффективности.

2. Исследовано влияние динамических характеристик приводов на эффективность применения предложенных алгоритмов управления упругими колебаниями мехатронных систем.

3. Исследовано возможность реализации предложенных алгоритмов управления упругими колебаниями в замкнутых системах управления движением.

4. Разработаны алгоритмы и программа структурно-параметрического синтеза управления колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями.

Глава 4. Численное исследование эффективности алгоритмов управления упругими колебаниями электромеханического робота

4.1. Особенности реализации законов управления колебательными движениями исполнительных механизмов промышленных роботов

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 приводы 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 основной главной связи.

Рассмотрим возможные пути технической реализации предлагаемых алгоритмов управления колебаниями мехатронных систем с упругими звеньями. На этих схемах приняты следующие обозначения: СУ – система управления; УУ – устройство управления; ПК – персональный компьютер; ОС – обратная связь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; Δq – упругая деформация; ОУ – объект управления; ДУК – датчик упругих координат; q^* – выходный сигнал системы; $g(t)$ – заданная траектория движения; W – передаточная функция согласователя уровней.

Первый случай – это использование разомкнутой СУ с вариантом прямой связи в режиме позиционирования. При этом программное движение реализуется путем заранее заданным значением перемещения (см. рис. 4.1). Управление рабочим органом роботов позволяет совершать строго дозированные пере-

мещения с фиксацией своего положения в конце движения. Дискретный электропривод с шаговым двигателем естественным образом сочетается с цифровыми управляющими устройствами, что позволяет успешно использовать его в станках с числовым программным управлением, в промышленных роботах и манипуляторах, в часовых механизмах. В этих системах используется один поток информации. Для реализации основных операций управления на ЭВМ необходимо аналоговое заданное движение $g(t)$ преобразовать в цифровые коды с помощью АЦП, то есть представить его в виде последовательности кодов, поступающих с определенным тактовым интервалом. Такое преобразование включает в себя два этапа: амплитудное квантование и временное квантование. Для формирования сигналов управления, поступающих на объект в аналоговой форме, дополнительно применяется ЦАП. Поскольку в системе управления нет обратной связи, то соответствие действительного перемещения заданному не проверяется. При этом компенсирующие воздействия определены в функции времени в ПК. В режиме позиционирования, начинается формирование сигнала для компенсирующих воздействия. Так как компенсирующие воздействия имеют регулируемый параметр цифровой формы, то здесь не требуется использование АЦП. Время этого процесса заранее задано в зависимости от требования точности системы управления.

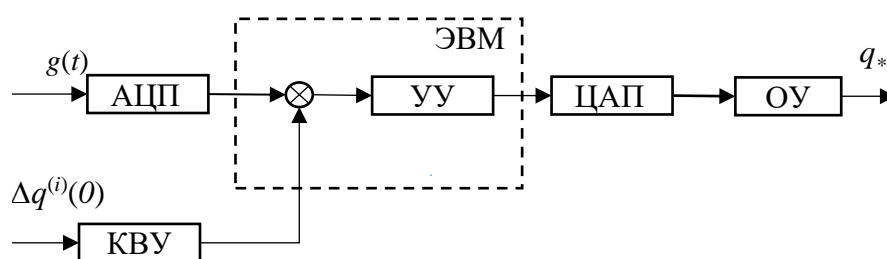


Рис. 4.1. Разомкнутое управление

Второй случай – это использование замкнутой СУ с отключением основной ОС в режиме позиционирования с двумя вариантами прямой (без пересчета

управления – рис. 4.2) и обратной корректирующих связей (с пересчетом управления и использованием ДУК – рис. 4.3). Для варианта прямой связи имеются два потока информации (прямая и обратная связи). Первый поток проходит как в разомкнутых системах управления на рисунке 4.1. Второй поток информации – обратная связь, которая передает состояние объекта на ЭВМ. Это состояние в данный момент времени оценивается на основе информации, получаемой с помощью датчиков, и если объект управления имеет регулируемый параметр аналоговой формы, то возникает потребность в АЦП. Функции сравнивающего устройства, как правило, возлагается на ЭВМ или вне ее (на рис. 4.2 представлена система, в которой ЭВМ выполняет функцию сравнения (определения отклонения) и управляющего устройства (регулятора) и включена в основной контур управления). Этим осуществляется перемещение исполнительного механизма до тех пор, пока действительная величина перемещения не будет соответствовать заданной, после чего сигналы на выходе сравнивающего устройства исчезнут. Компенсирующие воздействия определены в функции времени в ПК и после отключения программного воздействия в режиме позиционирования будут воздействовать для компенсации упругих колебаний. Время этого процесса также заранее задано в зависимости от требования точности системы управления, как и в случае разомкнутого управления. Для второго варианта принцип работы СУ такой же как для первого. Отличие заключается в том, что компенсирующие воздействия являются функциями координат.

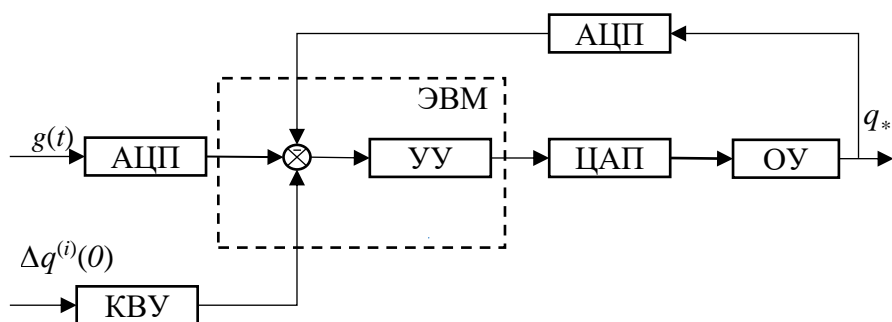


Рис. 4.2. Замкнутое управление с компенсирующим воздействием в виде функции времени

Третий случай – это использование замкнутой СУ без отключения основной ОС. В таком случае нужно пересчитывать управление в функции координат, использовать ДУК и корректирующую ОС (рис. 4.3). При этом, состояния объекта в каждый момент времени измеряются установленным датчиком. В процессе управления одновременно действуют и программные, и дополнительные воздействия для компенсации упругих колебаний. Этот принцип применяется в контурных системах управления при учете упругости звеньев объекта.

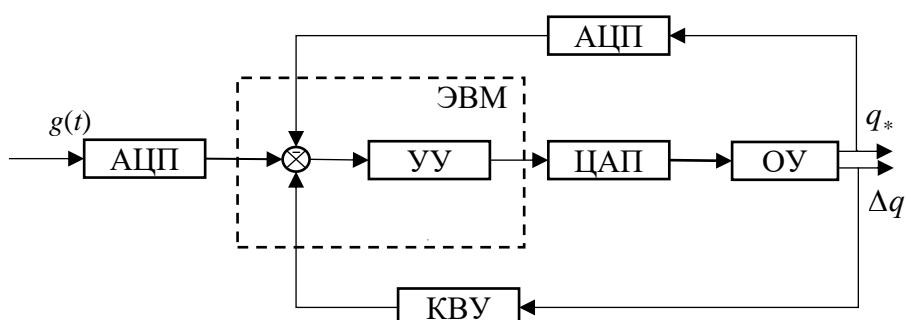


Рис. 4.3. Замкнутое управление программным движением компенсирующим воздействием в виде функции координат

Для реализации предлагаемых алгоритмов управления колебательными движениями электромеханического промышленного робота «Электроника НЦТМ–01», который оснащен позиционной системой управления на основе микро-ЭВМ «Электроника 60М» и датчиков импульсного типа (ИД) необходимо доработать систему управления движения путем организации дополнительной части блока интерфейса (БИ), которая предназначена для повышения уровня входных дискретных сигналов до величины 24 В и дополнительного канала датчика упругих координат (ДУК), расположен на рабочем органе [28].

Таким образом, модернизированный БИ системы управления представляет собой комплекс из двух частей. Штатное устройство «прежней» системы управления является главной частью и работает с входными сигналами 5В, а дополнительная часть используется для повышения величины входных дискретных сигналов до 24 В.

На рис. 4.4 представлена структурная схема системы управления «Электроника НЦТМ–01».

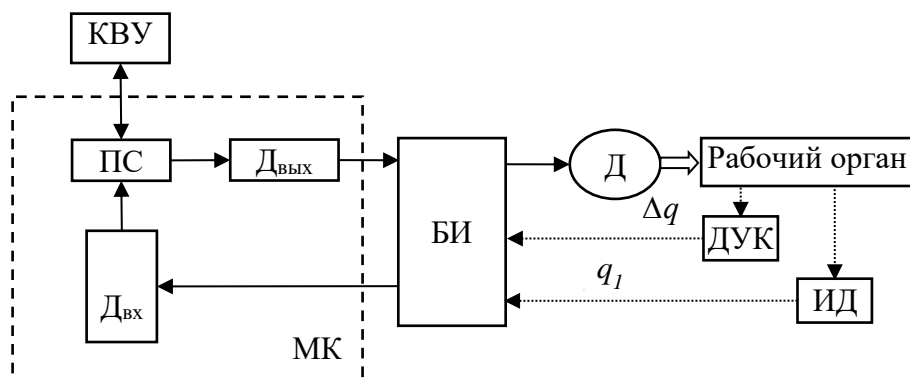


Рис. 4.4. Структурная схема системы управления «Электроника НЦТМ–01»

Базовая конфигурация микроконтроллера (МК) состоит из процессорного сегмента (ПС) системы управления ПР, узла дискретных входов ($Д_{ВХ}$) узла дискретных выходов ($Д_{ВЫХ}$). Персональный компьютер (ПК) выполняет роль программатора, в котором формируются программные (ПД) и желаемые колебательные (КД) движения, сохраняющиеся в памяти МК перед их выполнением. Выходные дискретные сигналы, вырабатываемые процессорным сегментом при выполнении ПД, поступают и реализуются в дискретном выходе в виде срабатывания физических выходов и подают на приводы движения.

4.2. Математическая модель и идентификация параметров электромеханического робота с учетом упругих звеньев

При использовании предложенных алгоритмов управления упругими колебаниями исполнительного механизма мехатронной системы необходима адекватная математическая модель объекта управления. Для получения этой модели и идентификации ее параметров были проведены эксперименты исследований упругих характеристик и свободных колебаний исполнительного механизма робота. На рис. 4.5 приведена конструкция робота «Электроника НЦТМ–01».

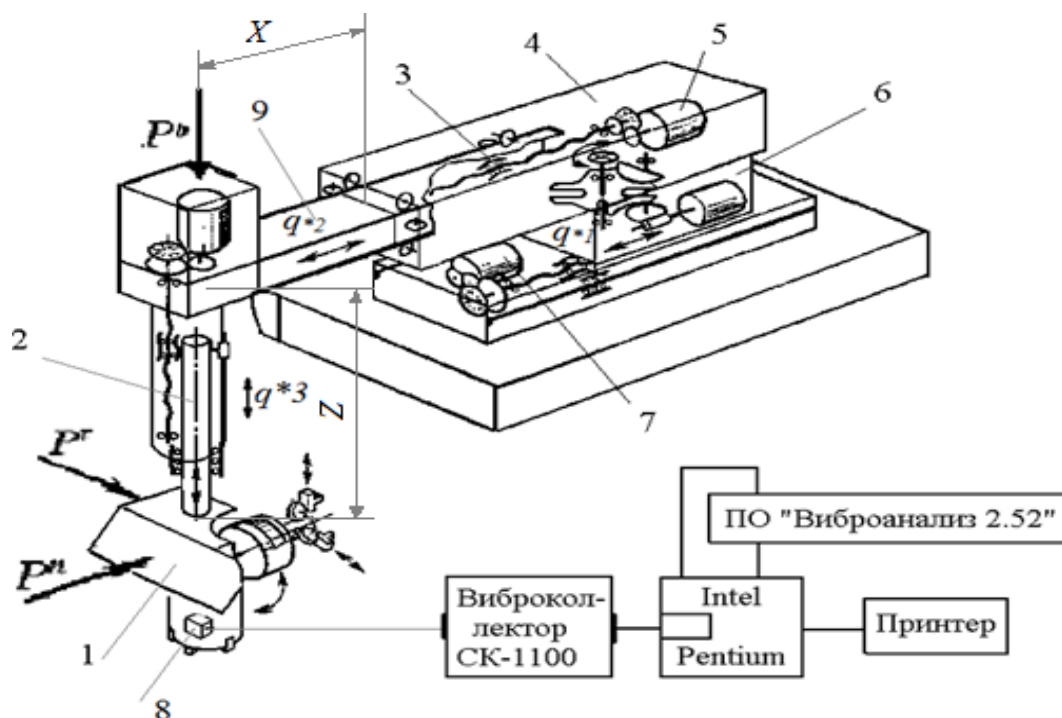


Рис. 4.5. Конструкция электромеханического робота «Электроника НЦТМ-01»:

1 – рабочий орган; 2 – шток механизма вертикального перемещения; 3 – шариковая передача винт-гайка; 4 – механизм горизонтального перемещения; 5 – привод механизма горизонтального перемещения; 6 – каретка с механизмом поворота; 7 – привод перемещения каретки; 8 – пьезоэлектрический датчик ускорений; 9 – рука

Манипулятор робота «Электроника НЦТМ-01» представляет собой пяти-степенной механизм, оборудованный электродвигателями постоянного тока типа ДПМ-35-Н2-02, которые оснащены тормозными муфтами. В качестве передаточных устройств использованы шариковые винтовые пары. Каретка 6 манипулятора имеет возможность перемещения в направлении q_{*3} с помощью механизма поворота в виде мальтийского креста, приводимого во вращение электродвигателем. Горизонтальное перемещение руки 9 в направлении q_{*2} осуществляется приводом 5 через передачу винт-гайка 3. Вертикальное перемещение q_{*3} рабочего органа 1 обеспечивается штоком 2.

Общий вид экспериментальной установки для исследований жесткостных характеристик и свободных колебаний исполнительных механизмов робота показан на рис. 4.6.

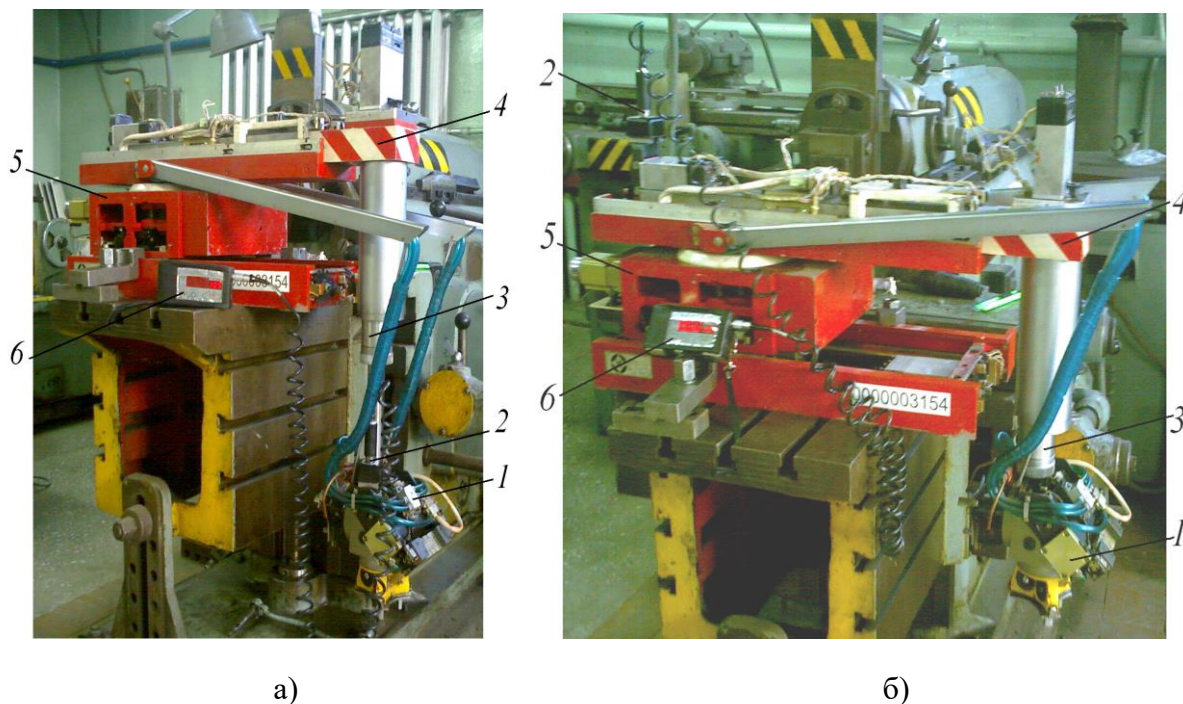


Рис. 4.6. Общий вид экспериментальной установки:

1 – рабочий орган; 2 – пьезоэлектрический датчик ускорений 3 – шток механизма вертикального перемещения; 4 – механизм горизонтального перемещения; 5 – каретка с механизмом поворота; 6 – виброколлектор

Изучение жесткостных свойств исполнительного механизма робота производилось путем его нагружения горизонтальными (P^a и P^r) и вертикальной (P^b) силами и замеров с помощью индикаторов соответствующих деформаций.

Исследования показали, что наиболее упругим звеном манипулятора в направлениях поворота q_1 и выдвижения q_2 является шток 3 механизма вертикального перемещения (см. рис. 4.5). При этом значение коэффициента его жесткости существенным образом зависело от координаты q_3 вылета (см. рис. 4.7 а)).

Коэффициенты жесткости шарико-винтовых передач механизмов горизонтального перемещения руки 9 (рис. 4.5) и горизонтального перемещения каретки

5 по этой координате достаточно высоки и практически не зависят от величины вылета руки по координате x (рис. 4.7, б). Величины коэффициентов жесткости изменялись в пределах $c_6^{nn} \approx c_{11}^{nn} = (6,4 - 7,1) \cdot 10^5 \text{ Н/м}$.

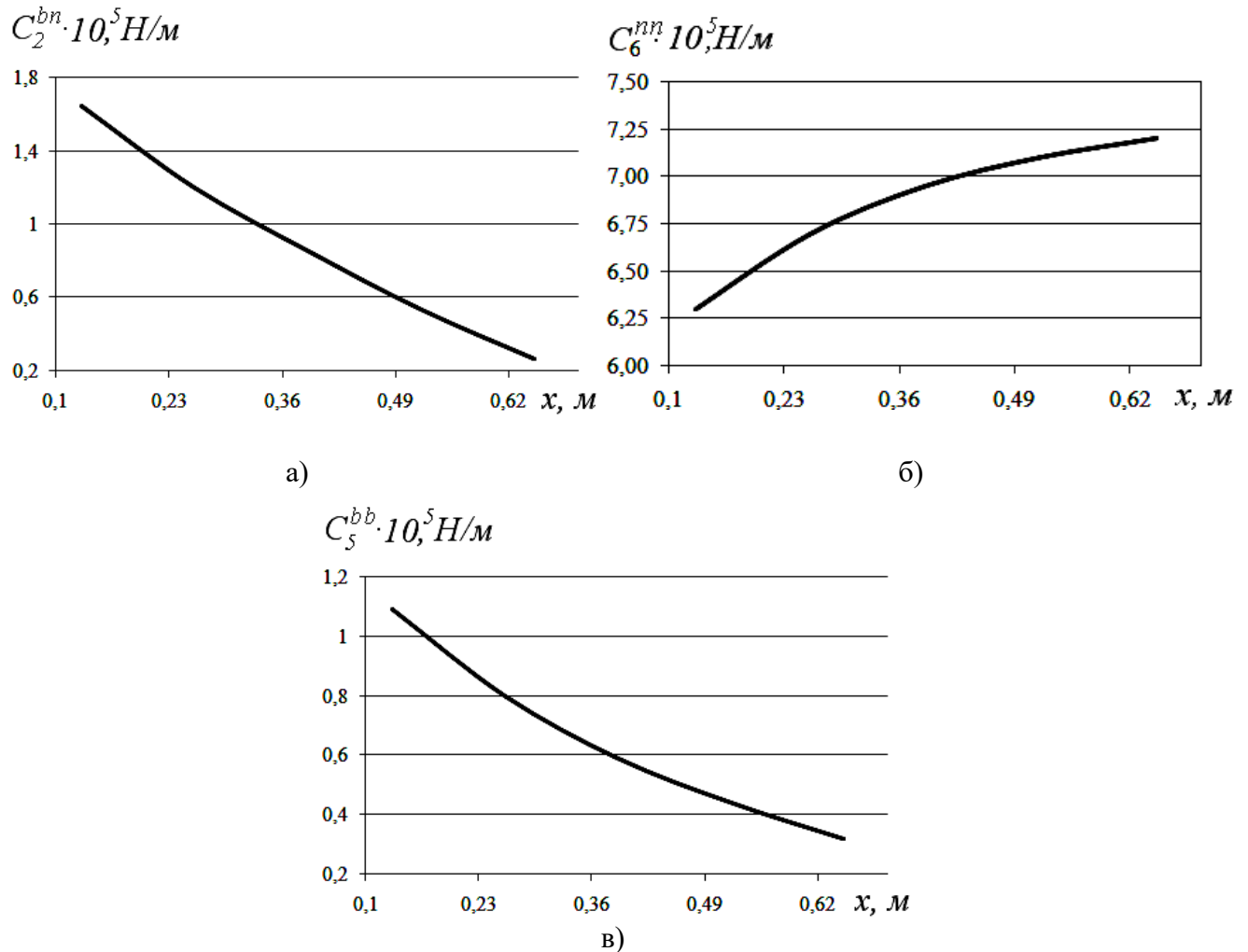
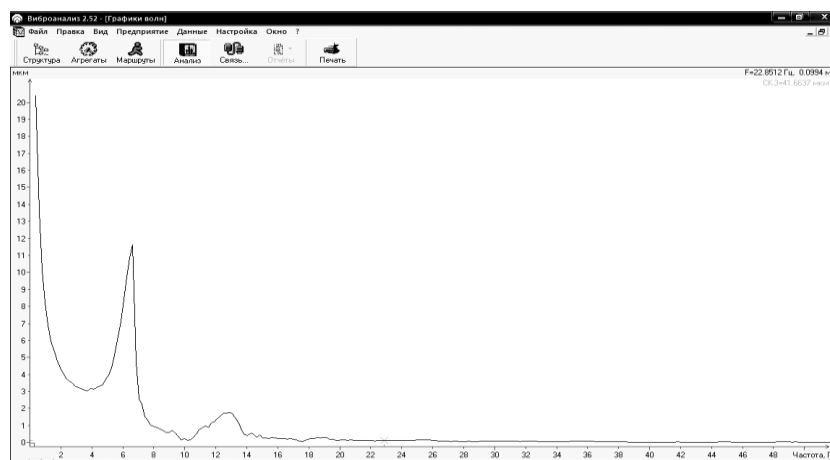


Рис. 4.7. Изменение коэффициентов жесткости

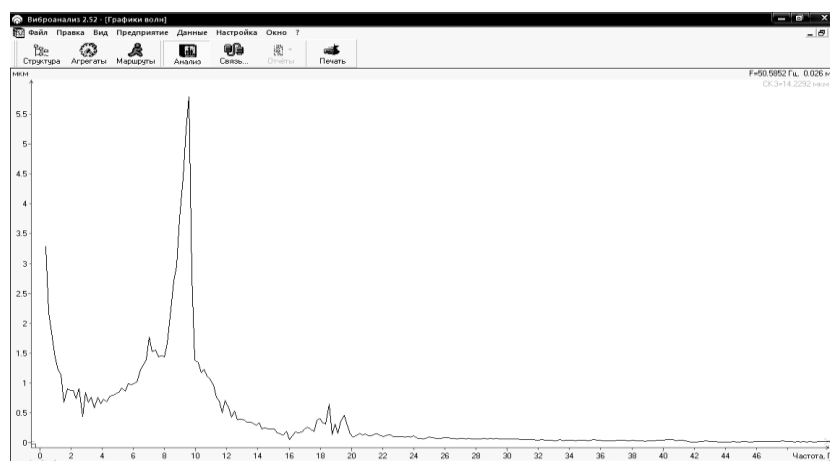
Жесткость самой руки в вертикальном направлении оказалась соизмеримой с жесткостью в горизонтальном направлении и зависимой от величины вылета x (см. рис. 4.7 в)).

Исследование свободных колебаний исполнительного механизма робота осуществлялось с помощью виброколлектора СК-1100 и пьезоэлектрического датчика ускорений, закрепленного на рабочем органе 1 (см. рис. 4.5). С помощью этой

аппаратуры были получены амплитудно-частотные характеристики исполнительного механизма, показанные на рис. 4.8.



а)

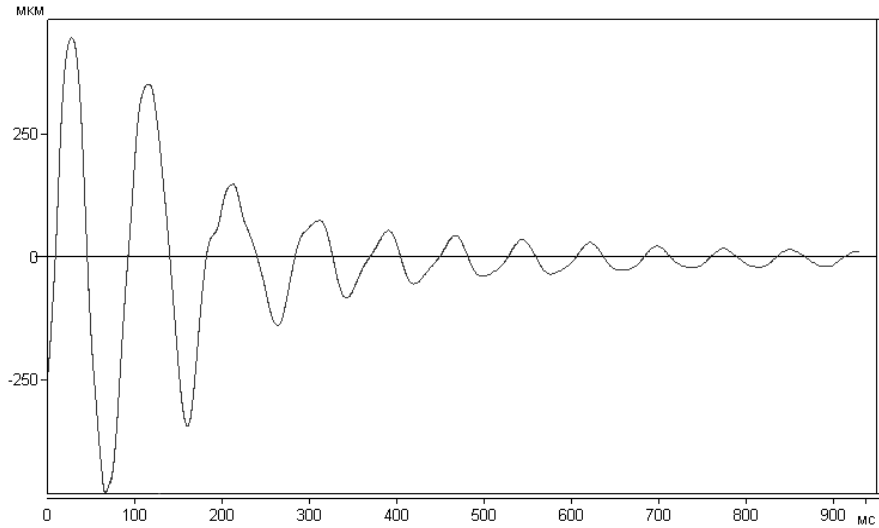


б)

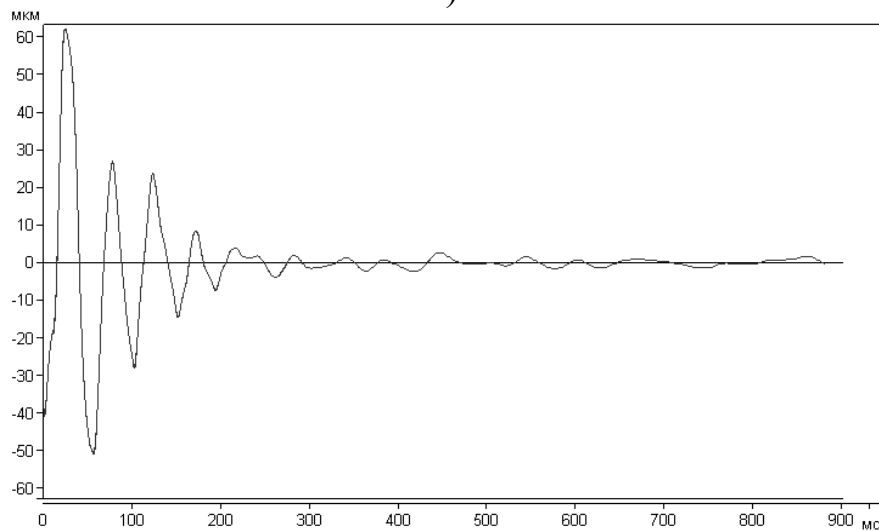
Рис. 4.8. Спектры частот свободных колебаний исполнительного механизма робота

Из полученных графиков видно, что как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях наблюдается не более двух резонансных всплесков на частотах 6,41 и 13,0 Гц (см. рис. 4.8 а) и 9,65 и 18,5 Гц (см. рис. 4.8 б) соответственно. Таким образом, для моделирования колебательных процессов можно воспользоваться трехмассовой расчетной схемой исполнительного механизма с переменными упруго-инерционными параметрами.

С помощью виброизмерительной аппаратуры также были получены осциллограммы упругих колебаний для различных конфигураций исполнительного механизма робота, некоторые из которых показаны на рис. 4.9.



а)



б)

Рис. 4.9. Осциллограммы свободных колебаний

Полученные осциллограммы используются для определения значений приведенных масс и коэффициентов вязкого трения. Коэффициенты вязкого трения находились по выражению

$$b = \ln \left| \frac{A_i}{A_{i+1}} \right| / T, \quad (4.1)$$

где T – период колебаний, A_i и A_{i+1} – значения средних арифметических амплитуд i -го и $(i + 1)$ -го колебаний.

Для нахождения приведенных масс использовались выражения для парциальных частот колебаний, приведенные в таблице 4.1 с помощью значений коэффициентов жесткости.

Таблица 4.1

Положение штока 3	Выражение определения приведенных масс
– выдвинутое	$\omega_3 = \sqrt{c_3 / m_3}$ (4.2)
– втянутое	$\omega'_2 = \sqrt{c_2 / (m_2 + m_3)}$ (4.3)

Здесь принятые c_2, c_3 – коэффициенты жесткости передачи механизма горизонтального перемещения и штока соответственно; m_2, m_3 – приведенные масса рабочего органа и масса механизма горизонтального перемещения 4 с кареткой механизма поворота 5.

4.3. Исследование эффективности систем управления колебаниями электромеханического робота

Для исследования эффективности предложенных алгоритмов управления колебаниями проведем численное моделирование движения рабочего органа робота по координате его выдвижения с помощью привода 7 (см. рис. 4.5) на основе использования полученных параметров колебательных систем.

Расчетная схема исполнительного механизма робота по этой координате показана на рис. 4.10. На этом рисунке приняты следующие обозначения: m_{Π} – масса привода программного движения; m_M – масса механизма горизонтального перемещения и каретки; m_P – масса рабочего органа; c_M, c_P – приведенные коэффициенты жесткости; d_{Π}, d_M, d_P – коэффициенты вязкого трения, Q_n – движущая сила привода.

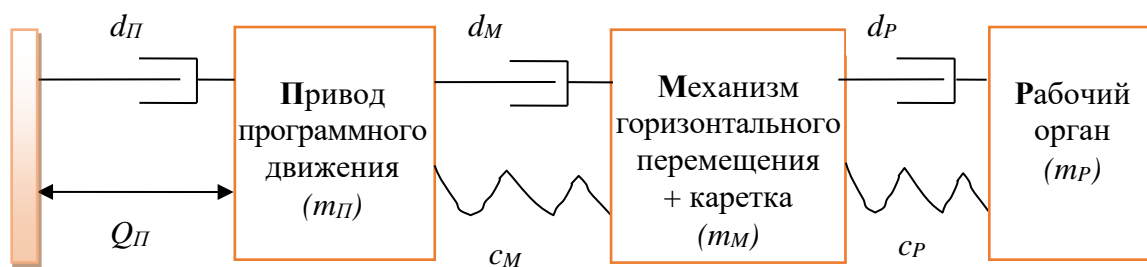


Рис. 4.10. Расчетная схема исполнительного механизма робота

Дифференциальные уравнения движения промышленного робота в режиме позиционирования, с учетом динамики электромеханических приводов, будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m_{\Pi}(q_1)\ddot{q}_{\Pi} + b_{\Pi}\dot{q}_{\Pi} + b_{\Pi}(\dot{q}_{\Pi} - \dot{q}_{\text{М}}) + c_{\text{М}}(q_2)(q_{\Pi} - q_{\text{М}}) = C\Phi i_a \\ m_{\text{М}}(q_2)\ddot{q}_{\text{М}} + b_{\text{М}}(\dot{q}_{\text{М}} - \dot{q}_{\Pi}) + c_{\text{М}}(q_2)(q_{\text{М}} - q_{\Pi}) + b_{\text{Р}}(\dot{q}_{\text{М}} - \dot{q}_{\text{Р}}) + c_{\text{Р}}(q_3)(q_{\text{М}} - q_{\text{Р}}) = 0 \\ m_{\text{Р}}(q_3)\ddot{q}_{\text{Р}} + b_{\text{Р}}(\dot{q}_{\text{Р}} - \dot{q}_{\text{М}}) + c_{\text{Р}}(q_3)(q_{\text{Р}} - q_{\text{М}}) = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

По паспортным данным двигателя ДПМ–35–Н2–О2 (мощность двигателя $P_{\text{Н}} = 0,45 \text{ кВт}$; напряжение питания якоря $U = 110 \text{ В}$; ток якоря $i_a = 6,6 \text{ А}$; скорость вращения якоря $n_{\text{Н}} = 3000 \text{ об/мин}$; сопротивление обмотки якоря $r = 0,585 \text{ Ом}$) определим номинальный момент двигателя, конструктивные постоянные и индуктивность якоря с помощью уравнений:

$$M = \frac{30P_{\text{Н}}l}{\pi n_{\text{Н}}}; \quad \Phi = \frac{30l(U - ri_a)}{\pi n_{\text{Н}}}; \quad C = \frac{Q_n}{\Phi i_a}; \quad (4.5)$$

где l – передаточное число; $c_x = 0,3-0,4$ – некоторый эмпирический коэффициент.

Для формирования алгоритмов управления упругими колебаниями исполнительного механизма робота воспользуемся заданием конечных уравнений колебательного движения. Исследования проведем с на основе использования системы визуального моделирования *Simulink*. Как известно, в задаче моделирования систем управления наиболее часто применяется этот пакет, который представляет собой интерактивный инструмент визуального моделирования и предназначен для моделирования, имитации и анализа динамических систем. Прин-

цип визуального программирования состоит в том, что модель системы составляется из библиотеки стандартных блоков, что позволяет упростить процесс создания модели. Кроме того, в данном пакете имеется возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать новые и составлять новые библиотеки блоков. Большинство команд и функций системы реализованы в виде текстовых M-файлов (файлов с расширением .m), причем все файлы доступны для модификации. Это позволяет создавать не только отдельные файлы, но и целые библиотеки файлов, формируя, таким образом, собственную предметно-ориентированную среду моделирования.

Численное моделирование движения исполнительного механизма осуществлялось с помощью *Simulink*-модели, показанной на рис. 4.11. Эта модель была получена на основе систем уравнений (4.4) и (2.2) с учетом (4.4).

Исследования проводились для режима позиционирования при различных положениях самой руки 9 и штока 2 (см. рис. 4.5). При этом исследовались как амплитудные спектры, так и продолжительность колебательных движений при позиционировании рабочего органа. Проведено также исследование влияния запаздывания сигнала управления, вносящегося в систему техническими или программными средствами (например, структурой системы управления, способом сбора данных или вычислительной схемой реализации алгоритмов управления) на эффективность управления упругими колебаниями.

Проведенные исследования в целом подтвердили результаты, соответствующее изменение структуры и параметров системы управления с целью обеспечения стабильности функционирования рабочего органа.

Исследования показали, что предлагаемые алгоритмы позволяют эффективно компенсировать упругие колебания рабочего органа и снижать их интенсивность. При этом изменение параметров исполнительного механизма в различных конфигурациях промышленного робота не приводило к существенному снижению эффективности управления упругими колебаниями.

Это объясняется тем, что в результате изменения конфигурации промышленного робота происходит соответствующее изменение параметров управляющих воздействий (блок «*Transport Delay*» на рис. 4.11).

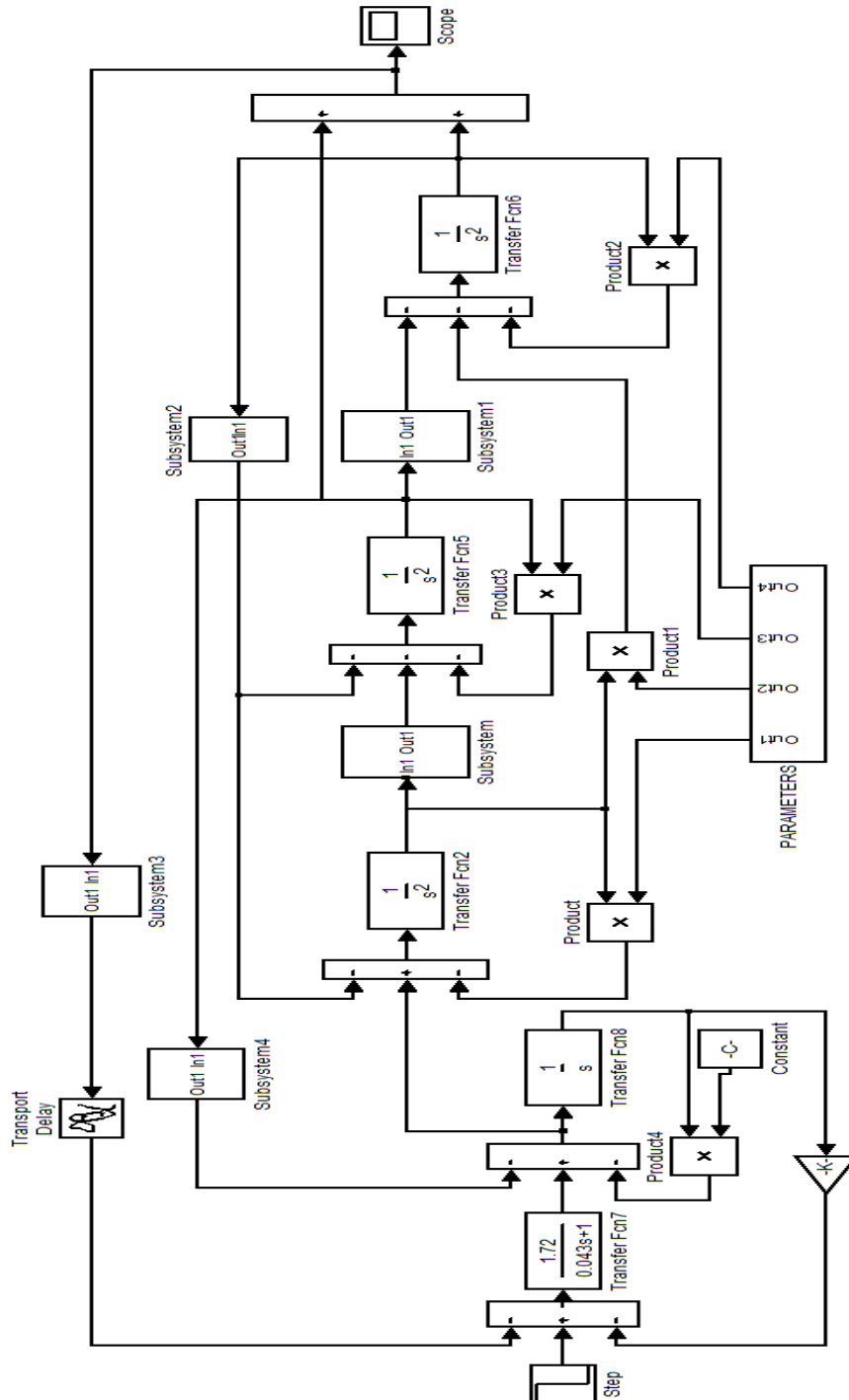


Рис. 4.11. Компьютерная модель системы управления движением робота

В качестве иллюстрации, на рис. 4.12 и 4.13 показаны графики упругих колебаний, движения рабочего органа и приведенной массы передаточного механизма соответственно для двух случаев: втянутое положение штока $q_3 = 20\text{мм}$

($\omega_2 = 14,5 \text{ Гц}$; $\omega_3 = 16,4 \text{ Гц}$) и выдвинутое $q_3 = 160 \text{ мм}$ ($\omega_2 = 18,5 \text{ Гц}$; $\omega_3 = 10,8 \text{ Гц}$). При этом задавалось единичное ступенчатое воздействие $Q_0=1(t)$ при времени разгона, равном $t_p = 0,2 \text{ с}$.

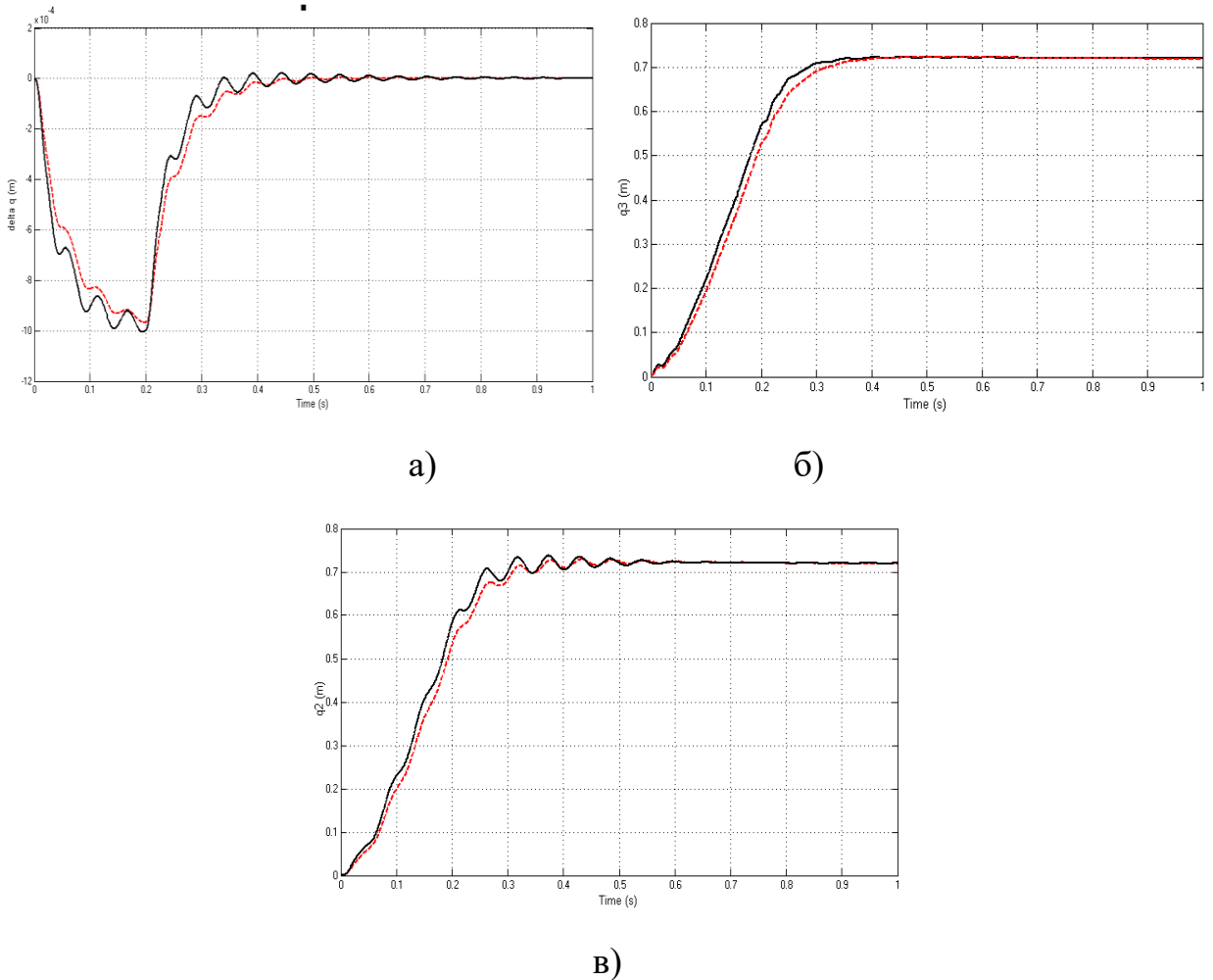


Рис. 4.12. Графики движения робота при втянутом положении штока:

- а) – графики упругих колебаний; б) – графики движения рабочего органа;
- в) – графики движения приведенной массы передаточного механизма

Сплошные линии на этих графиках обозначают движения исходной системы, а штриховые – с учетом дополнительных воздействий. Как следует из этих графиков, при втянутом положении штока декременты упругих колебаний увеличиваются со значения $\delta_0 = 0,45$ до $\delta_1 = 0,89$ (см. рис. 4.12 а), а время программ-

ного движения уменьшалось с 0,5 до 0,2 (см. рис. 4.12 б). При этом также уменьшалось время движения промежуточной массы до установившегося положения (см. рис. 4.12, в).

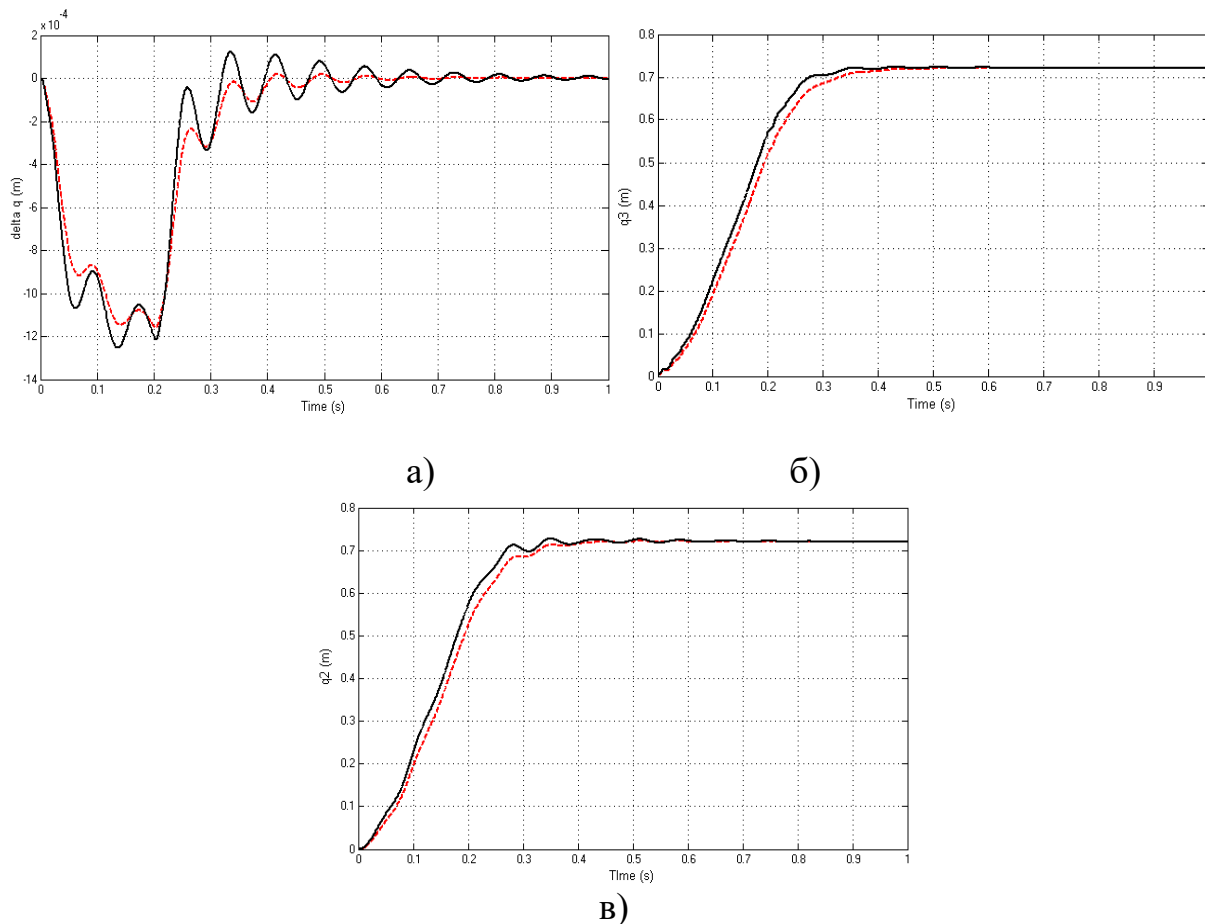


Рис. 4.13. Графики движения робота при выдвинутом положении штока

- а) – графики упругих колебаний; б) – графики движения рабочего органа;
- в) – графики движения приведенной массы передаточного механизма

При выдвинутом положении штока декременты упругих колебаний увеличиваются со значения $\delta_0 = 0,55$ до $\delta_1 = 1,13$ (см. рис. 4.13 а), а программное движение (см. рис. 4.13 б) и движение приведенной массы передаточного механизма (см. рис. 4.13 в) получились более плавные.

Исследования влияния запаздывания сигнала управления на эффективность предлагаемых алгоритмов управления упругими колебаниями

показали, что повышение значения временной задержки сигнала до значений $t_{zan}=0,01$ с (см. рис. 4.14) незначительно сказывается на эффективности управления (кривая 2). Дальнейшее увеличение этого времени до $t_{zan}=0,02$ с (см. рис.4.14) и $t_{zan}=0,04$ с (см. рис. 4.15) делает систему менее эффективной (кривая 3 и кривая 4 соответственно).

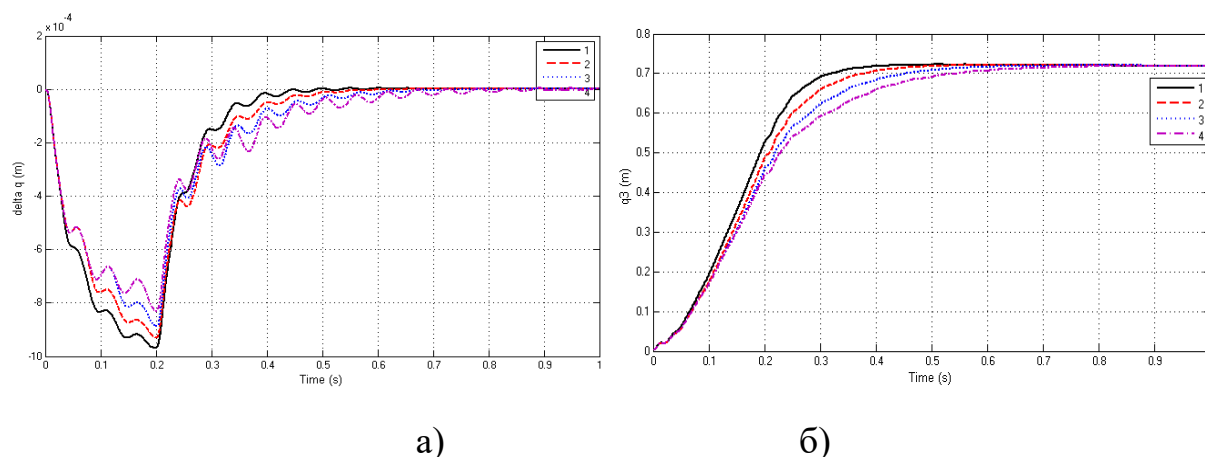


Рис. 4.14. Графики движения робота в зависимости от запаздывания сигнала управления

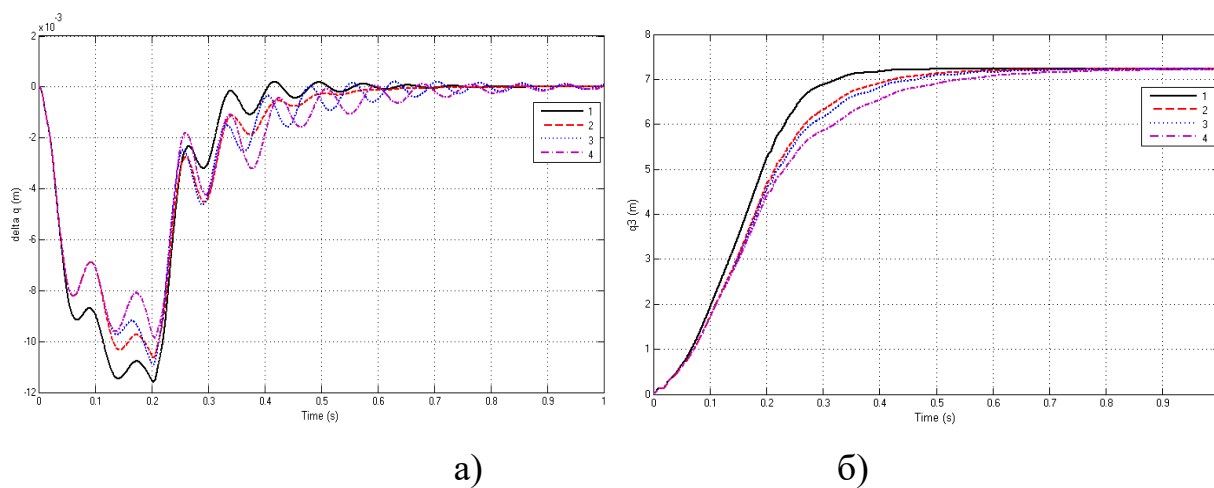


Рис. 4.15. Графики движения робота в зависимости от запаздывания сигнала управления

Как следует из этих графиков, при увеличении времени задержки сигнала управления интенсивность упругих колебаний и время регулирования повышались. При этом декременты упругих колебаний при втянутом положении штока уменьшались со значения $\delta_1 = 0,89$ (кривая 1) до $\delta_4 = 0,51$ (кривая 4) (см. рис.

4.14), а при выдвинутом положении штока – со значения $\delta_1 = 1,13$ до $\delta_4 = 0,63$ (см. рис. 4.15), соответственно. Кроме этого, время регулирования повышалось в 1,95 раза для первого и 2,15 раза для второго случаев.

4.4. Выводы

1. Показаны возможности технической реализации алгоритмов управления колебательными движениями исполнительных механизмов в системах управления промышленных роботов.

2. На основе экспериментальных исследований жесткостных характеристик и свободных колебаний исполнительного механизма электромеханического робота произведена идентификация параметров математической модели объекта управления.

3. На основе компьютерной модели системы управления движением проведено численное исследование эффективности предложенных алгоритмов управления колебаниями исполнительного механизма электромеханического робота.

4. Численное исследование показало, 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.

Заключение

По основным результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработан комплексный 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, не накладывающие ограничений на характер программного движения.

2. Предложены непосредственные критерии эффективности систем управления движением мехатронных машин с упругими звеньями в виде заданных интегральных кривых или эталонных моделей 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 требуемых управляющих воздействий путем решения обратных задач динамики по заданному виду колебательного движения, позволяющие реализовать процедуру структурно-параметрического синтеза систем управления движением этих машин, обладающих 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. Предложенный алгоритм управления движением мехатронных систем с упругими звеньями позволяют до 1,5 раза снизить интенсивность и продолжительность колебательных движений исполнительных механизмов в переходных режимах работы.

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 алгоритм и программа 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 «Сопротивление материалов и строительной механики» и «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы».

Библиографический список

1. Акимов Л.В. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния: Монография / Л.В. Акимов, В.И. Колотило, В.С. Марков. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 93 с.
2. Акимов Л.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Л.В. Акимов, В.Т. Долбня, В.Б. Клепиков, А.В. Пирожок // Под общ. ред. В.Б. Клепикова. – Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с.
3. Акимов Л.В. Улучшение динамики астатической системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с постоянной нагрузкой / Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко, А.А. Вакуленко // Электротехн. та компьют. системи. - 2011. - Вип. 3. - С. 92-97.
4. Акуленко Л.Д. Моделирование динамики манипулятора с упругими звеньями / Л.Д. Акуленко, С.А. Михайлов, Ф.Л. Черноусько // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1981. – № 3. – С. 118-124.
5. Акуленко Л.Д. Об управлении поворотом упругого звена манипулятора / Л.Д. Акуленко, Н.Н. Болотник // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – № 1. – С. 167-173.
6. Алексеев А.С. Самонастройка регуляторов исполнительных подсистем мехатронных устройств: Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст]. – Томск, 2010. – 21 с.
7. Бабицкий В. И. Теория виброударных систем / В.И. Бабицкий. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
8. Батырканов Ж.И. Синтез многомерных систем управления с позиции обратных задач динамики: Автореф. дис. ... доктора техн. наук [Текст]. – Бишкек, 1997. – 39 с.
9. Башарин А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ: учеб. пособие / А. В. Башарин. - 3-е изд., перераб. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 512 с.

10. Башарин А.В. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов / А.В Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. Л.: Энергоиздат, 1982. – 391 с.
11. Белов И.Р, Ткачев С.Б. Управление пространственным движением схвата робота-манипулятора / И.Р Белов, С.Б Ткачев // Инженерный вестник. – 2015. №7. С 552-565.
12. Бербюк В.Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем / В.Е. Бердюк. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
13. Божко А.Е. Синтез оптимального управления колебательными системами / А.Е. Божко; Отв. ред. В.Л Рвачев: Ин-т пробл. Машиностроения. – Киев: Наук. думка, 1990. – 164.
14. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления / Л.М. Бойчук. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.
15. Болотник Н.Н. Оптимизация управления манипуляционными роботами / Н.Н. Болотник, Ф.Л. Черноусько // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1990. – № 1. – С. 189-238.
16. Болотник Н.Н. Управление движением манипулятора с учетом упругих колебаний стрелы / Н.Н. Болотник, А.А. Гукасян // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1984. – № 4. – С. 38-46.
17. Борцов Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г Соколовский – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.
18. Борцов Ю.А. Тиристорные системы электропривода с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г Соколовский. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 160 с., ил.
19. Бургин Б.Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем / Б.Ш. Бургин. Новосибирск, 1992. – 199 с.

20. Бургин Б.Ш. Варианты двухмассовой электромеханической системы стабилизации скорости с комбинированным регулятором. – Электричество, 2006, №8.
21. Бургин Б.Ш. Выбор коэффициентов формы для двухмассовой электромеханической системы стабилизации скорости с комбинированным регулятором. – Электричество, 2008, №10.
22. Бургин Б.Ш. Исследование необходимости учёта упругих связей в системах подчинённого регулирования / Б.Ш. Бургин, Ф.К. Фотглер // Электрическая промышленность. Сер. Электропривод. 1972. Вып. 2. С. 12-14.
23. Бургин Б.Ш. О возможных способах синтеза регулятора скорости для двухмассовой электромеханической системы / Б.Ш. Бургин // Автоматизация производственных процессов. Новосибирск: НЭТИ, 1977. С. 3-9.
24. Бургин Б.Ш. Синтез структуры управления электроприводом постоянного тока с учетом упругого звена в механической передаче / Б.Ш. Бургин, Ф.К. Фоллнер // Изв.вузов. Сер. Электромеханика. – 1975. – № 5. – с.519-625.
25. Бурдаков С.Ф. Динамический расчет электромеханических следящих приводов промышленных роботов: учеб. пособие / С.Ф. Бурдаков, А.А. Первозванский; Ленингр. политехн. ин-т. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. – 72 с.
26. Бурдаков С.Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: учеб. пособие / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев. – М.: Высш. шк. 1986. – 264 с.
27. Бурдаков С.Ф. Синтез управлений для роботов с упругими элементами / С.Ф. Бурдаков // Роботы и робототехнические системы: сб. науч. тр. / Иркут. политехн. ин-т. – Иркутск, 1981. – С. 41-52.
28. Вакуленко А.С. Алгоритмы и программы микроконтроллерного управления промышленным роботом / А.С. Вакуленко, В.Д. Сартаков // Вестник ИрГТУ. –2015. №5. – С. 12–16.

29. Вейц В. Л. Динамика управляемых машинных агрегатов / В.Л. Вейц, М. З. Коловский, А. Е. Кочура. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
30. Вейц В.Л. Структурированные модели и методы расчета сложных управляемых систем в технике и экономике / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура, П.А. Лонцих; Рост. госуд. ун-т. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 2002. – 200 с.
31. Галиуллин А.С. Построение систем программного движения / А.С. Галиуллин, И.А. Мухаметзянов, Р.Г. Мухарлямов, В.Д. Фурасов // М. Наука, 1971.
32. Галиуллин А.С. Построение уравнений движения. Дифференциальные уравнения, т. Ш1, 1977, стр. 195-237.
33. Галиуллин А.С. О задачах динамического программирования. // Труды УДН, 1964. Т.5, вып.2, с.3–9.
34. Галиуллин А.С. Обратные задачи динамики / А.С. Галиуллин. – М.: Наука, 1981. – 114 с
35. Галиуллин А.С. Обратные задачи динамики и задачи управления движениями материальных систем. // Дифференциальные уравнения, 1972. Т.8, №9, с.1535–1541.
36. Галиуллин А.С. Построение уравнений программных движений управляемых систем / А.С. Галиуллин, И.А. Мухаметзянов, Р.Г. Мухарлямов, В.Д. Фурасов // М.: Изд-во УДН, 1969.
37. Голубенцев А.Н. Интегральные методы в динамике. – Киев:1. Техника, 1967, 350 с.
38. Горбачев Н.В. Синтез и оптимизация алгоритмов управления на основе концепции обратных задач / Н.В. Горбачев, А.В. Сафонов, А.Г. Шухов // Изв. РАИ. Техническая кибернетика. 1990. №2. С.3-14.

39. Горипевекий Д.Н. О приближенном решении обратной задачи управления линейным объектом // Иэв.РАН.Техническая кибернетика. 1992. №1 .С. 57-75.
40. Горшков Б.М. Разработка и исследование динамической модели вертикального координатно-расточного станка / Б.М. Горшков, Д.Г. Токарев, О.В. Маршанская // Вестник СамТГУ. – 2008. № 2. –С. 127-137.
41. Григорьев В.В. Синтез систем автоматического управления методом модального управления / В.В. Григорьев, Н.В. Журавлёва, Г.В. Лукьянова, К.А. Сергеев // – С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
42. Гудкова Н.В. Адаптивное управление упругомассовым объектом с неизвестной математической моделью / Н.В. Гудкова, К.В. Бесклубова // Известия ЮФУ – 2013. Выпуск № 2. – С. 8–13.
43. Даденков Д.А. Синтез электромеханических систем управления с нелинейной адаптивной эталонной моделью / Д.А. Даденков, В.П. Казанцев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (часть 7) – С. 1466-1471.
44. Диль В.Ф. Методика синтеза законов управления летательным аппаратом на основе траекторного прогнозирования и метода обратных задач динамики / В.Ф. Диль, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС. – 2015. – № 4. – С. 134–138.
45. Динамика машин и управление машинами: справочник / В.К. Асташев, В.И. Бабицкий, И.И. Вульфсон [и др.]; под ред. Г. В. Крейнина. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
46. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
47. Дружинский И.А. Механические цепи. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1977. – 240 с.
48. Егоров О.Д. Конструирование мехатронных модулей / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев: учебник. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.

49. Еругин Н.П. Построение всего множества систем дифференциальных уравнений, имеющих заданную интегральную кривую. // ПММ, вып.6, С. 659–670, 1952.
50. Еругин Н.П. Приводимые системы // Тр. Матем. ин-та им. В. А. Стеклова, 13, Изд-во АН СССР, М.–Л., 1946, 3–96.
51. Задорожний Н.А. Исследование динамических свойств двухмассовой электромеханической системы по амплитудно-частотным характеристикам / Н.А. Задорожний, Д.С. Пономарёв // Электротехн. та компьют. системи. – 2011. – Вип. 3. – с. 105–109.
52. Зарак Т.В. Синтез алгоритмов управления вращательным движением воздушной транспортной системы на основе концепции обратных задач динамики / Т.В. Зарак, В.Н. Сизых // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – Иркутск: 2011. № 5 (52) – С.33-41.
53. Зенкевич С.Л. Управление роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2000. – 400 с.
54. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко // Изд. 2-е, испр. и доп. (Серия: Робототехника). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005. 480 с.
55. Злобин А.Г. Структурно-параметрический синтез электроприводов оборудования с ЧПУ: Дис. канд. наук. Л.: 1990, 268с.
56. Исполов Ю.Г. Упругие колебания электромеханического робота / Ю.Г. Исполов, А.Д. Саблин, В.М. Сорин // Робототехника: межвуз. сб. научн. тр. / Ленингр. политехн. ин-т. – Л. 1977. – Вып. 2. – С. 81-87.
57. Квартальнов Б.В. Динамика автоматизированных электроприводов с упругими механическими связями. М. – Л. издательство «Энергия», 1965 г., 88 с.
58. Кобринский А.А. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. – М.: Наука, 1985. – 344 с.

59. Колесников А.А. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов и обратные задачи динамики управляемых систем [Текст] / А.А. Колесников, А.Г. Чирченков, М.В. Бессарабов // Синтез алгоритмов сложных систем. – 1986. – Вып. 6. – С. 3–6.
60. Коловский М. З. Об уменьшении динамических ошибок приводных механизмов / М. З. Коловский // Машиноведение. – 1978. – № 6. – С. 18-24.
61. Коловский М.З. Динамика машин / М.З. Коловский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 263 с.
62. Коловский М.З. Основы динамики промышленных роботов / М.З. Коловский, А.В. Слоущ. – М.: Наука, 1988. – 240 с.
63. Красовский А.А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами / А. А. Красовский. - М.: Машиностроение, 1969. - 240 с.
64. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. - М.: Наука, 1973. - 560 с.
65. Красовский, Н. Н. Теория управления движением / Н. Н. Красовский. – М.: Наука, 1970. – 420 с.
66. Крищенко А.П. Метод обратной задачи динамики в теории управления // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 Москва 16-19 июня 2014 г.
67. Круглов С.П. Адаптивное управление в задаче гашения упругих колебаний трехмассовых исполнительных механизмов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – №1. – С. 54–61.
68. Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbuckten, Deutschland, 2012. 125 с.
69. Крутько П.Д. Адаптивные алгоритмы управления исполнительными системами / П.Д. Крутько // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – №2 – С. 86-92.

70. Крутько П.Д. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем / П.Д. Крутько, А.И.Максимов, Л.М. Скворцов // д ред. П.Д. Крутько. – М.: Радио и связь, 1988. – 306с.
71. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П.Д. Крутько. – М.: Машиностроение, 2004.
72. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 303с.
73. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1988. – 328с.
74. Крутько П.Д. Параметрические адаптивные алгоритмы управления упругими электромеханическими системами / П.Д. Крутько, М.А. Голованов И.К. Большакова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 3. – С. 80-89.
75. Крутько П.Д. Управление движением упругих многомассовых систем / П.Д. Крутько // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – №4 – С. 90-96.
76. Крутько П.Д. Управление цепными механическими системами / П.Д. Крутько // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 4. – С. 87-97.
77. Крутько П.Д., Кузьмин Д.В. Управление движением манипулятора при выполнении погрузочных операций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 3. С. 91-97.
78. Кузнецов Н.К. Гашение колебаний в трехмассовых мехатронных системах / Н.К. Кузнецов, А.Ю. Перельгина, В.Н. Перельгин. – Монография. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – 160 с.
79. Кузнецов Н.К. Динамика и управление движением мехатронных систем на основе дополнительных связей / Н.К. Кузнецов // Математика, ее приложения и математическое образование: матер. Всерос. конф., Улан-Удэ, 25-30 июня 2005. – Улан-Удэ, 2005. – С. 136-142.

80. Кузнецов Н.К. Динамика управляемых машин с дополнительными связями: монография. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. – 288 с.
81. Кузнецов Н.К. Применение метода электромеханических аналогий для синтеза алгоритмов управления упругими колебаниями многомассовых мехатронных систем / Н.К. Кузнецов, Ле Ба Хань // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС. – 2014. – № 2. – С. 31–37.
82. Кузнецов Н.К. 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.
83. Кузнецов Н.К. 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.
84. Кузнецов Н.К. 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.
85. Кузнецов Н.К. 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. Новосибирс. – 2-6 декабря. – 2014 г. – С. 90-93.
86. Кузнецов Н.К. 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.
87. Кузнецов Н.К. Управление колебаниями упругих мехатронных систем // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2005. – № 7. – С. 7–13.

88. Кузнецов Н.К. Управление колебательными движениями мехатронных систем на основе задания дифференциальных уравнений движения исполнительных механизмов / Н.К. Кузнецов, Ле Ба Хань // Вестник ИрГТУ. – 2013. №5. – С. 21- 25.
89. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.
90. Лавров Н.Г. Применение концепции обратных задач динамики к проблеме управления угловым движением спускаемого аппарата / Н.Г. Лавров, Е.Э. Страшинин, Л.Н. Шалимов // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – № 26. – С. 4–9.
91. Летов А.М. Динамика полёта и управление. – М.: Наука, 1969. – 359 с.
92. Летов А.М. Некоторые нерешенные задачи теории автоматического управления. // Дифференциальные уравнения, 1970. Т.6, №4, с.592–615.
93. Лисенко О.В. Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням багатомасовості [Электронный ресурс] / О.В. Лисенко. – Электрон. дан. – Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Вип. 6 (53). – 2008. Частина 1. – С. 74–76. – Режим доступа: http://www.nbuuv.gov.ua/portal/Natural/Vkdpu/2008_6/6_2008_1_PDF/74.pdf.
94. Лихоманов А.М. Синтез взаимосвязанных систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики / А.М. Лихоманов, Б.Ф. Дмитриев, С.Ю. Панин, А.Ю. Писарев // Электричество 1998. №11. С 44-52.
95. Лихоманов А.М. Синтез программных управлений для взаимосвязанных систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики / А.М. Лихоманов, С.Ю. Панин, А.Ю. Писарев, В.В. Мякишев // Материалы XI научно-технической конференции “Экстремальная робототехника”. С-11б.: Издательство СПТГТУ. 2001. С 184-191.

96. Лихоманов А.М. Синтез программных управлений для систем электропривода на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики / А.М. Лихоманов, С.Ю. Панин, А.Ю. Писарев, О.В. Сусллова // Электротехника. 1997. №7. С.1-5.
97. Лихоманов А.М. Синтез систем с нелинейным законом управления на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики / А.М. Лихоманов, В.В. Мякишев, С.Ю. Панин, А.Ю. Писарев // Изв. вузов. Электромеханика. 2001. №2. С. 38-41.
98. Лихоманов А.М. Синтез систем стабилизации скорости на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики / А.М. Лихоманов, С.Ю. Панин, А.Ю. Писарев, В.В. Мякишев // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. №7. С.24-27.
99. Лурье, З.Я. Динамика оптимальной электромеханической системы с упругой связью в режиме позиционирования / З.Я. Лурье // Машиноведение. – 1977. – № 2. – С. 11-17.
100. Малов А.В. Разработка и применение методики модального синтеза цифровых систем управления динамическими объектами с электроприводами постоянного тока: Автореф. дис. ... канд техн. наук [Текст]. – Бишкек, 2005. – 20 с.
101. Манипуляционные системы роботов / А.И. Корендясев [и др.]; под общ. ред. А.И. Корендясева. – М.: Машиностроение, 1989. – 472 с.
102. Механика машин: учеб. пособие для вузов / И.И. Вульфсон [и др.]; под ред. Г.А. Смирнова. – М.: Высшая школа, 1996. – 511 с.
103. Механика машин: учеб. пособие для вузов / И. И. Вульфсон [и др.]; под ред. Г. А. Смирнова. – М.: Высшая школа, 1996. – 511 с.
104. Мишаков В. В. Управление двухмассовыми электромеханическими системами в условиях параметрической неопределенности: Автореф. дис. ...канд. техн. наук [Текст]. – Тула, 2010. – 22 с.

105. Нелинейные задачи динамики и прочности машин / под ред. В.Л. Вейца; Ленингр. гос. ун-т. – Л.: Изд-во Ленингр. у-та, 1983. – 336 с.
106. Нефедов В.В. Численно-аналитические методы исследования состояний и управление колебаниями робота – манипулятора: Автореф. дис. ...канд. техн. наук [Текст]. – Москва, 2005. – 18 с.
107. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. – Монография / Т.Б. Никитина. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с.
108. Никитина Т.Б. Синтез робастного управления двухмассовой электромеханической системой с учетом неопределенностей объекта управления / Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко // Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Автоматика та приладобудування. – 2014. – № 15. – С. 114–125.
109. Орликов М.Л. Динамика станков. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 272 с.
110. Панин С.Ю. Синтез законов управления для многомерных автоматических систем на основе частотного подхода к решению обратных задач динамики: диссер. канд. техн. наук [Текст]. – Санкт-Петербург, 2003. – 197.
111. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко // М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
112. Перельгина А.Ю. Методы компенсации упругих колебаний в трехмассовых мехатронных системах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст]. – Иркутск, 2009. – 24 с.
113. Петраков Ю.В. Моделювання динамічних характеристик процесу токарного точіння / Ю.В. Петраков, О.В. Лисенко // Зб. наук. пр. КДТУ. Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, 2002. – Вип. 11.– С. 257–263.

114. Петров Б.Н. Построение алгоритмов управления как обратная задача динамики / Б.Н. Петров, П.Д. Крутько, Е.П. Попов // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 5. – С. 1078-1081.
115. Писарев А.Ю. Частотный синтез автоматизированных электроприводов машинных агрегатов на основе концепции обратных задач динамики: диссер. канд. техн. наук [Текст]. – Санкт-Петербург, 2000. – 208с.
116. Плохотников В.В. Модальный синтез систем управления с интервальными параметрами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст]. – Новосибирск, 2002. – 22 с.
117. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. - 2-е изд., стер. - М.: Машиностроение, 2007. - 256 с.
118. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: Учебное пособие. – М.: МГТУ "СТАНКИН", 2000 – 80 с.
119. Путов В.В. Адаптивное и модальное управление механическими объектами с упругими деформациями: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.
120. Путов В.В. Адаптивное управление динамическими объектами: беспоисковые системы с эталонными моделями: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.
121. Романова И.К. Об одном подходе к определению весовых коэффициентов метода пространства состояний // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 04. С. 105–129.
122. Сабинин Ю.А. Демпфирование механических колебаний звена манипулятора / Ю.А. Сабинин, М.И. Яковлева // Электромеханическое обеспечение автоматических комплексов: сб. научн. тр. / Новосиб. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1978. – С. 81-89.
123. Сабинин Ю.А. Демпфирование механических колебаний звена манипулятора / Ю.А. Сабинин, М.И. Яковлева // Электромеханическое обеспечение

- автоматических комплексов: сб. научн. тр. / Новосиб. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1978. – С. 81-89.
124. Саушев А.В. Моделирование многомассовых механических систем электроприводов методом электрической аналогии / А.В. Саушев, В.А. Шошмин // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – №4. – С. 57–64.
 125. Сизых В.Н. Синтез нелинейных двухуровневых систем автоматического управления воздушного судна / В.Н. Сизых, В.Ф Диль // МНИЖ. 2015. №11-2 (42).
 126. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. В.В. Григорьев, Н.В. Журавлёва, Г.В. Лукьянова и др. – С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
 127. Следящие приводы: В 3 т. 2-е изд., доп. и перераб. / Под ред. Б.К. Чемоданова. Т.1: Теория и проектирование следящих приводов / Е.С. Блейз, А.В. Зимин, Е.С. Иванов и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 904 с.
 128. Соколов Н.И. Аналитический метод синтеза линеаризованных систем автоматического регулирования / Н.И. Соколов. - М.: Машиностроение, 1966. - 328 с.
 129. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: учебное пособие / Ф.П. Тарасенко. – М.: КНОРУС. 2010. – 224 с.
 130. Тин Пхон Чжо. Система управления приоритетным обслуживанием воздушных судов при заходе на посадку и пассажиров в аэропорту после прилета: диссер. доктора техн. наук [Текст]. – Москва, 2015. – 300 с.
 131. Тихий И.И. Методологические основы определения состояния сложных объектов и их применение в авиационной технике: Автореф. дис. ... доктора техн. наук [Текст]. – Иркутск, 2011. – 43 с.

132. Тычинин А.В. Структурно-параметрический синтез системы граничного управления объектом с распределенными параметрами методами обратной динамики: Автореф. дис. ...канд. техн. наук [Текст]. – Самара, 2008. – 22 с.
133. Учебник / А.Г. Схиртладзе, В.И. Выходец, Н.И. Никифоров, Я.Н. Отений / ВолгГТУ, Волгоград, 2005. – 128 с.
134. Хайманн Б., Герт В., Попп К., Репецкий О. Мехатроника: Компоненты, методы, примеры / под ред. О.В. Репецкого / Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – 602 с.
135. Черноусько Ф.Л. Манипуляционные роботы: динамика, управление, автоматизация / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
136. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько Л.Д. Акуленко Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. –384 с.
137. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. – 384 с.
138. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
139. Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления движением упругих механических систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1991. №1. С. 209-212.
140. Юдин А.Ю. Совершенствование систем управления взаимосвязанными электроприводами входного участка агрегата непрерывного горячего цинкования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст]. – Магнитогорск, 2006. – 20 с.

141. Biswas, S. Dynamic Modeling and Optimal Control of Flexible Robotic Manipulators / S. Biswas, R. Klafter // Proc. IEEE. Int. Conf. Rob. and Autom. , Vol. 1. – Philadelphia, PA, 1988. – P. 152-158.
142. Chen K.P., Fu L.C. Nonlinear adaptive motion control for a manipulator with flexible joints // IEEE Int. Conf. Rob. and Autom. 1989: Proc. Vol.2. Washington etc., 1989, 1201-1206.
143. Dey G.K., Dey P.K., Ul Islam M.H. Humanoid Robotic Arm for Tactual Interaction with Industrial Environment by using Mobile // International Journal of Engineering and Technology. 2014. Vol. 4. Is. 11. P. 643-647.
144. Diamond P. Anisotropy - based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Int. J. Control. - 2001. - V. 74. - Pp. 28 - 42.
145. Feliu V. A New Approach to Control Single – Link Flexible Arms. Part II : Control of the Tip Position in the Presence of Joint Friction : Technical Report : CMU – RI – TR – 89 – 14 / Robotics Institute Carnegie Mellon University ; V. Feliu, K. Rattan H. Brown. – 1989. – 69 p.
146. Feliu V. Design and Control of a Two – Degree – of – Freedom Lightweight Flexible Arm: Technical Report: CMU – RI – TR – 89 – 21 / Robotics Institute Carnegie Mellon University; V. Feliu, H. Brown. – 1989. – 37 p.
147. Hoyle D. An H_{∞} approach to two-degree-of-freedom design / D. Hoyle, R. Hyde, D.J.N. Limebeer // In Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control. - 1991. - Pp. 1581-1585.
148. Limebeer D.J.N. On the design of robust two degree of freedom controllers / D.J.N. Limebeer, E.M. Kasenally, J.D. Perkins // Automatica - 1993. - №29. - Pp. 157 - 163.
149. Lu Y.S., Chen J.S. Design of a Global Sliding Mode Controller for a Motor Drive with Bounded Control. // Int. J. Control. 1995. - Vol.62, №5. - P. 1001-1019.

150. Semyonov A.V. Stochastic approach to H_∞ -optimization / A. V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. - Florida (USA). - 1994. - Pp. 2249 - 2250.
151. Surdilovich D. Deflection Compensation for Large Flexible Manipulators / D. Surdilovich, M. Vukobratovich // Mech. Mach. Theory. – 1996. – Vol. 31, No. 3. – P. 317-329.
152. Vladimirov I.G. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_2 - optimization problem / I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Proc. 13th IFAC World Congress. - San-Francisco (USA). - 1996. - Pp. 427 - 432.
153. Zhang D. Two-stage open-loop velocity compensating method applied to multi-mass elastic transmission system / D. Zhang, H. Yang, L. An // Chinese Journal of Aeronautics, no 27, 2014. p. 129-188.

Приложение

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
ФГБОУ ВО ИрНТУ

Н. П. Коновалов

“ ” 2015



АКТ

*об использовании программы, разработанной аспирантом
Иркутского Национального исследовательского технического университета
Ле Ба Хань*

Настоящим подтверждается, что «Программа синтеза алгоритмов управления движением многомассовых мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611189), разработанная аспирантом Ле Ба Хань, используется при изучении дисциплин «Сопротивление материалов» и «Динамика и прочность» для подготовки бакалавров по специальностям технического профиля на кафедре «Сопротивление материалов и строительной механики».

Программа позволяет учитывать при расчетах на прочность и устойчивость строительных объектов и сооружений упругие свойства конструкций.

Зав. кафедрой «Сопротивление
материалов и строительной механики»,
д.т.н., профессор

В. Л. Лапшин

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВПО «Братский

государственный университет»



К. Т. Н

И. С. Ситов

2015

АКТ

об использовании программы, разработанной аспирантом Иркутского

Национального исследовательского технического университета

Ле Ба Хань

Настоящим подтверждается, что «Программа синтеза алгоритмов управления движением многомассовых мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611189), разработанная аспирантом Ле Ба Хань, используется в учебном процессе нашего университета.

Программа позволяет осуществлять синтез алгоритмов управления движением мехатронных систем с учетом упругих свойств исполнительных механизмов путем решения обратных задач динамики на основе задания требуемого характерного вида колебательных движений.

Программа аспиранта Ле Ба Хань нашла свое применение в учебном процессе при подготовке инженеров по специальностям технического профиля на кафедре «Управления в технических системах».

Зав. кафедрой «Кафедра управления

в технических системах (УТС)»,

к.т.н., профессор

И. В. Игнатьев



УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор
ФГБОУ ВО ИрНИТУ
Н. П. Коновалов
“ ___ ” _____ 2015

АКТ

*об использовании программы, разработанной аспирантом
Иркутского Национального исследовательского технического университета
Ле Ба Хань*

Настоящим подтверждается, что «Программа синтеза алгоритмов управления движением многомассовых мехатронных систем с учетом упругости исполнительных механизмов» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611189), разработанная аспирантом Ле Ба Хань, используется в учебном процессе университета для подготовки инженеров и бакалавров по направлению «Наземные транспортно-технологические средства» на кафедре «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы».

Программа обеспечивает автоматизированный выбор и расчет систем управления движением исполнительных механизмов строительных и дорожных машин с учетом упругих свойств путем решения обратных задач динамики.

Зав. кафедрой «Строительных,
дорожных машин и гидравлических»,
д.т.н., профессор

А. И. Нижегородов

Свидетельство

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014613718

**«Программа синтеза алгоритмов управления движением
многомассовых мехатронных систем с учетом упругости
исполнительных механизмов»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Иркутский государственный технический
университет» (RU)*

Авторы: *Кузнецов Николай Константинович (RU),
Ле Ба Хань (RU)*

Заявка № 2014611189

Дата поступления 18 февраля 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 апреля 2014 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов