

На правах рукописи

АЛЮКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИНЕРЦИОННЫХ БЕССТУПЕНЧАТЫХ
ПЕРЕДАЧ ПОВЫШЕННОЙ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ**

05.02.02 –Машиноведение, системы приводов и детали машин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Челябинск – 2014

Работа выполнена на кафедре
«Автомобильный транспорт и сервис автомобилей»
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

- Научный консультант: **Дубровский Анатолий Федорович**
доктор технических наук, профессор,
(ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ»(НИУ)).
- Официальные оппоненты: **Умняшкин Владимир Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный машиностроитель России
(ФГБОУ ВПО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»);
Баженов Светослав Петрович
доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ
(ФГБОУ ВПО «ЛГТУ»);
Шарков Олег Васильевич
доктор технических наук, доцент
(ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»).
- Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная
технологическая академия им. В.А. Дегтярева»,
г. Ковров.

Защита состоится 26 февраля 2014 года, в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

Тел/факс (351) 267 91 23

E-mail: D 212.298.09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Лазарев Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Создание конкурентоспособной продукции, качественное выполнение технологических процессов в условиях глобализации рыночной экономики невозможно без использования адаптивных технических систем, позволяющих автоматически и бесступенчато изменять режимы работы в зависимости от нагрузочных, скоростных и других выходных факторов. Применение таких систем позволяет максимально использовать мощности приводных двигателей, выполнять заданные функции на оптимальных режимах работы, повысить производительность, исключить необходимость использования людей в областях вредных или опасных для человека, улучшить удобство управления, снизить необходимый расход топлива и электроэнергии и обеспечить другие преимущества. В полной мере эти утверждения относятся к автоматическим бесступенчатым передачам, используемым в приводных системах транспортных средств, технологического и производственного оборудования.

Инерционные бесступенчатые передачи являются автоматическими бесступенчатыми передачами механического типа и позволяют автоматически менять режимы работы привода в зависимости от нагрузки. Эти передачи имеют компактные конструкции, отличаются высоким коэффициентом полезного действия (в пределах 0,9 ... 0,95), широким диапазоном трансформации момента (в пределах 4 ... 15), поэтому не требуют дополнительных коробок передач. Инерционные передачи обладают внутренним автоматизмом, то есть для обеспечения автоматического и бесступенчатого изменения режимов работы им не требуются никакие дополнительные устройства. Общеизвестно, что нет ни одной рабочей машины, в которой бы автоматическое бесступенчатое регулирование крутящего момента не способствовало интенсификации выполняемых процессов.

Несмотря на отмеченные преимущества, инерционные передачи не находят широкого распространения в технике. Основная причина этого заключается в их недостаточной работоспособности, в первую очередь, из-за входящих в конструкцию таких передач механизмов свободного хода (МСХ). Высокая частота включений и выключений МСХ, импульсный характер передаваемого момента, высокие пиковые динамические нагрузки препятствуют созданию надежной конструкции инерционных передач с высокой нагрузочной способностью. Поэтому проблема повышения нагрузочной способности инерционных передач, несомненно, является актуальной, так как её решение будет способствовать повышению надежности инерционных бесступенчатых передач и их широкому применению в технике.

Начиная уже с первых конструкций инерционных передач, их основное применение предполагалось в трансмиссиях транспортных средств. Мы считаем, что такой подход является не верным, по крайней мере, для данного этапа разработки таких передач. Во-первых, об этом свидетельствует многолетний опыт безуспешных попыток создания надежной инерционной бесступенчатой передачи для транспортных средств. Во-вторых, в последнее время большое внимание уделяется

плавности хода транспортных средств, а сам вибрационный принцип действия инерционных передаточных предполагает импульсную подачу момента на выходной вал, что входит в явное противоречие с указанным требованием.

Вместе с тем известно, что вибрации в технике часто играют положительную роль. В современной технике есть целые области, построенные на использовании различных колебательных процессов и вибраций: вибрационное перемещение насыпных грузов, виброреология, вибрационное погружение, вибрационная обработка материалов, вибрационное уплотнение и др. Использование вибрационных процессов позволяет значительно повысить производительность и эффективность выполнения технологических операций, снизить необходимый расход энергии в 2-10 раз. Именно для таких систем инерционные передачи могут быть особенно полезными. Вибрационный характер подачи момента на рабочий орган при этом является положительной особенностью привода. Заметим, что до настоящего времени не создан вибрационный привод, реализующий принцип автоматического бесступенчатого регулирования. Разрабатываемые в данной диссертации научные основы инерционных бесступенчатых передач касаются, в первую очередь, именно этого направления их применения, что также подтверждает актуальность диссертации.

Работа выполнялась в период с 1983 по 2014 гг. в рамках реализации федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития НТК России на 2007–2012 гг.», планов научно-исследовательских работ и приоритетных направлений развития ФГБОУ ВПО ЮУрГУ. Тематика диссертационной работы отвечает разделу 2.3 «Механика, машиноведение и управление» Перечня приоритетных направлений фундаментальных исследований, утвержденного Постановлением Правительственной комиссии РФ от 28.05.1996 года. Проводимые в диссертации исследования соответствуют федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», утвержденного Постановлением № 426 Правительства Российской Федерации от 21.05.2013.

Цель исследования – создание нового семейства механизмов – инерционных автоматических бесступенчатых передач повышенной нагрузочной способности разработка основ теории этих механизмов.

Для достижения цели в работе решались следующие **основные задачи**:

1. Проведение анализа существующих конструкций инерционных передач и поиск возможных путей повышения их нагрузочной способности.

2. Разработка нового семейства механизмов переменной структуры – инерционных бесступенчатых передач повышенной нагрузочной способности, а именно:

2.1. Разработка новых схем и конструкций МСХ релейного типа, характеризующихся повышенной нагрузочной способностью;

2.2. Разработка конструкций передач лишь с одним выходным МСХ;
2.3. Разработка конструкций инерционных передач без МСХ для реверсивного инструмента и на основе шарнирно-рычажных механизмов.

3. Создание основ теории данного семейства механизмов, что предполагает:

3.1. Разработку методов математического моделирования, анализа и исследования механизмов переменной структуры, позволяющих преобразовывать эти системы в динамические системы постоянной структуры;

3.2. Создание новых методов аппроксимации ступенчатых, кусочно-линейных и обобщенных функций;

3.3. Проведение анализа динамических процессов в инерционных передачах: решение систем существенно нелинейных дифференциальных уравнений, построение периодических решений, фазовых траекторий, анализ устойчивости, исследование нелинейных колебаний и резонансных режимов работы динамических систем;

3.4. Разработку методики проектирования и инженерного расчета МСХ и инерционных передач повышенной нагрузочной способности, разработку рекомендаций по выбору параметров инерционных передач.

4. Проведение экспериментальных исследований и проверка достоверности полученных теоретических результатов и предложенных методик расчета.

Объект исследования – инерционные автоматические бесступенчатые передачи механического типа. **Предмет исследования** – нелинейная динамика инерционных бесступенчатых передач, выявление, разработка, изучение и реализация возможности повышения их нагрузочной способности.

Методика исследования включает в себя математическое моделирование на основе уравнений и законов динамики механических систем; построение точных и приближенных аналитических решений систем существенно нелинейных дифференциальных уравнений движения инерционных бесступенчатых передач; численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений с их реализацией на основе компьютерных программ; методы аппроксимации кусочно-линейных и обобщенных функций; исследование динамики нелинейных систем и процессов на основе фазовых пространств; экспериментальные исследования.

Научная новизна:

1. Создано новое семейство инерционных бесступенчатых передач повышенной нагрузочной способности: с одним выходным МСХ, без МСХ для привода рабочих органов, совершающих знакопеременное движение, и для привода реверсивного режущего инструмента, с рычажным механизмом, с МСХ релейного типа, нагрузочная способность которых на порядок выше по сравнению с существующими схемами.

2. Разработаны основы теории данного семейства, базирующиеся на использовании методов моделирования и анализа механизмов переменной структуры путем преобразования динамических систем переменной структуры к динамическим системам постоянной структуры, что включает:

- разработку специальных функций, позволивших представить математические модели инерционных бесступенчатых передач не в виде совокупности систем дифференциальных уравнений по участкам, а в виде лишь одной системы дифференциальных уравнений, описывающей движение звеньев передачи в течение всего рабочего цикла;

- разработку новых методов аппроксимации ступенчатых, кусочно-линейных и обобщенных функций, позволивших описать динамику инерционных передач в виде систем дифференциальных уравнений лишь с аналитическими функциями и применить к анализу этих систем аналитические методы.

3. Получены аналитические и численные решения существенно нелинейных систем дифференциальных уравнений движения инерционных передач повышенной нагрузочной способности и МСХ релейного типа, построены периодические решения этих систем.

4. С помощью методов фазового пространства доказано многообразие возможных фазовых портретов инерционных передач, периодических и квазипериодических фазовых траекторий, решены вопросы устойчивости периодических решений и выявлены условия резонансных режимов работы.

5. Обоснованы параметры МСХ релейного типа и инерционных передач, позволившие на порядок повысить нагрузочную способность предложенных передач по сравнению с существующими конструкциями.

Новизна технических решений подтверждается 9 патентами и свидетельствами РФ на изобретения и полезные модели.

Практическая значимость

Предложены новые конструкции инерционных бесступенчатых передач и МСХ, отличающихся повышенной нагрузочной способностью. Предложены рекомендации, зависимости, алгоритмы и методики проектирования, позволяющие проводить полный расчет конструктивных параметров инерционных передач и МСХ повышенной нагрузочной способности. Использование предложенных рекомендаций и методик позволяет проектировать инерционные передачи с использованием современных компьютерных программ и обеспечивает экономический эффект за счет сокращения сроков разработки инерционных бесступенчатых передач и МСХ, повышения их нагрузочной способности, надежности и долговечности, снижения габаритных размеров и массовых параметров, сокращения производственных и эксплуатационных затрат.

На защиту выносятся:

– разработанные новые схемы и конструкции инерционных бесступенчатых передач и МСХ релейного типа, отличающихся повышенной нагрузочной способностью;

– разработанные автором методы моделирования, анализа и исследования механизмов переменной структуры путем преобразования динамических систем переменной структуры к динамическим системам постоянной структуры, разработанные специальные функции и методы аппроксимаций, позволившие создать

комплекс физических и математических моделей инерционных бесступенчатых передач и механизмов свободного хода в виде лишь одной системы существенно нелинейных дифференциальных уравнений, несмотря на переменность их структуры, с учетом динамической характеристики приводного двигателя;

– созданные алгоритмы и компьютерные программы численного моделирования разработанных конструкций МСХ и инерционных передач повышенной нагрузочной способности, результаты вычислительных экспериментов;

– построенные периодические решения систем дифференциальных уравнений движения инерционных бесступенчатых передач с анализом их устойчивости и графическим представлением в виде фазовых траекторий и портретов, результаты исследований резонансных режимов работы инерционных передач;

– алгоритмы расчета конструктивных параметров МСХ и инерционных передач повышенной нагрузочной способности, построения их внешних характеристик.

Реализация результатов работы

Результаты диссертации использованы: 1) на Ковровском предприятии ОАО «Завод имени В.А. Дегтярева» внедрена методика расчета и проектирования силовой передачи на основе автоматического инерционного бесступенчатого привода; 2) в открытом акционерном обществе «Специальное конструкторское бюро машиностроения» (ОАО «СКБМ», г. Курган); 3) на предприятии ОАО «Курганмашзавод»; 4) при проектировании инерционных передач для привода станков АЖС-5 (Рыбинский завод деревообрабатывающих станков); 5) в приводе мельницы тонкого помола (Челябинское предприятие ООО НТЦ «Пигмент»).

Апробация работы

Основные материалы диссертации докладывались, обсуждались и публиковались: 1) на международных научно-практических конгрессах, конференциях и симпозиумах: SAE Commercial Vehicle Engineering Congress (Rosemont, Illinois, the USA, 2013); «Ключевые аспекты научной деятельности» (Перемышль, Польша, 2013); «Наука и образование» (Прага, Чехия, 2013); «Перспективные вопросы мировой науки» (София, Болгария, 2012); «Strategic issues in the world science» (Przemysl, Poland, 2012); «Новейшие научные достижения» (София, Болгария, 2012); «Актуальные научные разработки» (София, Болгария, 2012); «Научное пространство Европы» (Перемышль, Польша, 2012); «Ключевые проблемы современной науки» (София, Болгария, 2012); «Scientific progress on the edge of Millenniums» (Prague, CzechRepublic, 2012); «Научный прогресс на рубеже тысячелетий» (Прага, Чехия, 2012); «Актуальные достижения европейской науки» (София, Болгария, 2012); «Перспективные разработки науки и техники» (Перемышль, Польша, 2011); 2) на международных конференциях: «Бесступенчатые передачи, приводы машин и промышленное оборудование» (Калининград, Россия, 1997); по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (Владимир, Россия, 1992); 3) на всесоюзных конференциях: по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью

(Одесса, СССР, 1980, 1986); по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (Челябинск, СССР, 1982).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в трех монографиях, 50 публикациях, в том числе 14 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. По результатам работы получено 9 патентов и свидетельств РФ на изобретения и полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 369 страниц, включая 135 рисунков и 11 таблиц, состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка использованных источников (199 наименований) и 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность темы диссертации, ее научная новизна, цель и задачи исследования, дается общая характеристика выполненных исследований.

В первой главе проводится обзор литературы по инерционным передачам, анализируются различные схемы и конструкции существующих передач, их достоинства и недостатки. При анализе существующих конструкций основное внимание уделяется способам повышения нагрузочной способности этих передач, увеличения их надежности и долговечности.

Проблема повышения нагрузочной способности инерционных передач постоянно находилась в центре внимания специалистов. В работах А.С. Антонова, С.П. Баженова, М.Ф. Балжи, В.Г. Белоглазова, А.А. Благонравова, Р.Н. Болдырева, Г.Г. Васина, М.Л. Горина, Н.П. Данилова, В.Б. Держанского, А.Ф. Дубровского, С.Н. Кожевникова, А.Е. Кроппа, С.М. Крупицкого, Н.К. Куликова, А.В. Куницы, А.И. Леонова, В.Ф. Мальцева, Д. Петрова, В.И. Пожбелко, А.Т. Полецкого, А.П. Полякова, В.А. Умняшкина, В.Н. Филимонова, Н.М. Филькина, О.В. Шаркова и других авторов исследована динамика инерционных бесступенчатых передач, созданы основы теории инерционно-импульсных силовых систем, обоснована перспективность применения инерционных передач в приводах различных машин.

Рассмотрен опыт ошибочных конструкций инерционных передач без МСХ. Выделены основные направления перспективных исследований, направленные на повышение нагрузочной способности инерционных передач.

Во второй главе описываются обобщенные физические и математические модели инерционных передач, в том числе разработанных и защищенных патентами новых конструкций. На рис. 1 представлены основные обобщенные физические модели рассматриваемых инерционных передач.

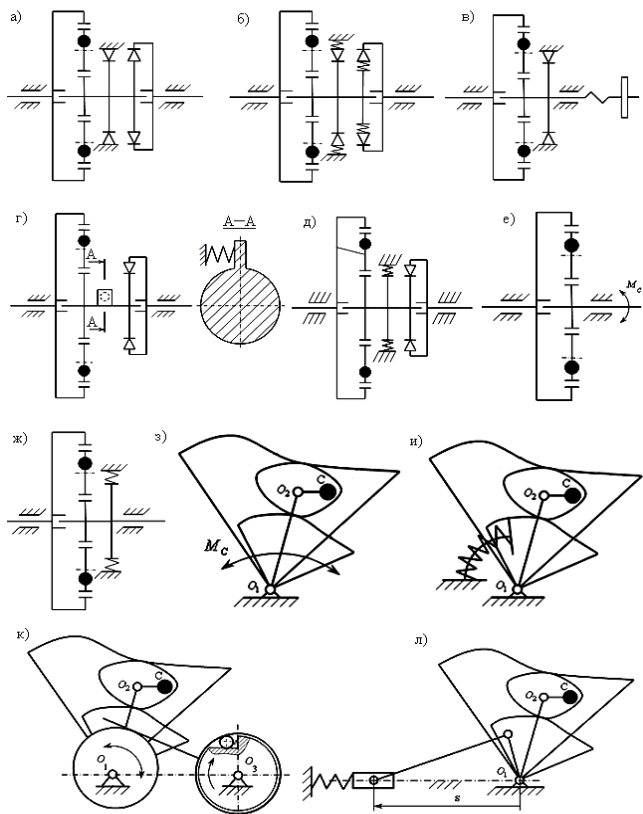


Рис. 1. Физические модели инерционных передач:

- а) общей жесткой схемы; б) общей упругой схемы; в) с одним (корпусным) МСХ; г), д) с одним (выходным) МСХ; е), ж), з), и) без МСХ; к) с эксцентриковым механизмом; л) с рычажным механизмом

Динамика инерционных передач описывается сложными системами существенно нелинейных дифференциальных уравнений. Отличительной особенностью разработанных в диссертации математических моделей является их запись в форме лишь одной системы дифференциальных уравнений, несмотря на переменность структуры инерционных передач. В основе метода лежат разработанные специальные функции (рис. 2), описывающие приведенный момент инерции реактора импульсного механизма $J_{2np} = J_B \Phi(-\beta) + J_4 \Phi(\beta - \gamma)$ и приведенные моменты сопротивлений $M_{c1} = -M_c \Phi(\gamma - \beta) + J_4 \ddot{\beta} \Phi(\beta - \gamma)$ и $M_{cnp} = M_c \Phi(\beta - \gamma)$, где $\Phi(x)$ – функция Хевисайда

да; J_B – момент инерции реактора; J_4 – момент инерции ведомого вала; M_C – момент сопротивления; β, γ – углы поворота реактора и ведомого вала.

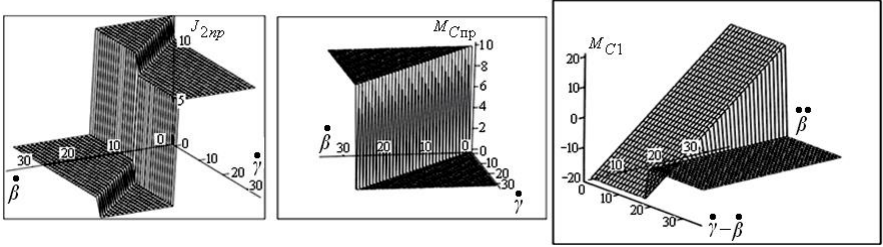


Рис. 2. Графики добавленного приведенного момента инерции реактора и приведенных моментов сопротивлений

Так для общей жесткой схемы инерционных передач системы дифференциальных уравнений по участкам запишутся так:

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_d, & \begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_d, \\ A_2 \ddot{\alpha} + A_3 \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = 0, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C, \end{cases} \\ A_2 \ddot{\alpha} + A_3 \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = 0, & \begin{cases} A_2 \ddot{\alpha} + (A_3 + J_4) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = -M_C, \\ \dot{\gamma} = \dot{\beta}, \end{cases} \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C, & \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_4 \dot{\alpha}^2 = M_d, & \begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_d, \\ \dot{\beta} = 0, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C, \end{cases} \\ \dot{\beta} = 0, & \begin{cases} A_2 \ddot{\alpha} + A_3 \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = 0, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C, \end{cases} \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C, & \end{cases} \quad (1)$$

где $A_1 = J_1 + nma^2 + (a/k + q)^2 nJ_3 + 2nmah(a/k + q) \cos \psi$; $\psi = q(\alpha - \beta)$;

$A_2 = nmab + \left(\frac{a}{k} + q\right) \left(\frac{b}{k} - q\right) nJ_3 + nmh \left(\frac{2ab}{k} + (b-a)q\right) \cos \psi$; $A_3 = J_2 + nmb^2 + \left(\frac{b}{k} + q\right)^2 nJ_3 + 2nmbh \left(\frac{b}{k} - q\right) \cos \psi$; $A_4 = -nmah \left(\frac{a}{k} + q\right) q \sin \psi$; $A_5 = nmbh \left(\frac{b}{k} - q\right) q \sin \psi$; $A_6 = nmkhq \sin \psi$;

J_2 – момент инерции реактора; nJ_3 – суммарный момент инерции неуравновешенных звеньев относительно геометрического центра; nm – их суммарная масса; h – расстояние между геометрическим центром и центром масс неуравновешенного звена; k – расстояние между осями инерционной передачи и неуравновешенного звена; a, b, q – параметры импульсного механизма; α – угол поворота ведущего вала. Крутящий момент $M_d = M_H - T \cdot \dot{M}_d - (\dot{\alpha} - \omega_H) / v^* \cdot \omega_x$ опре-

делялся по динамической характеристике асинхронного электродвигателя, где M_H – номинальный момент ротора двигателя; ω_x, ω_H – угловые скорости идеального холостого хода и номинальная; T – электромагнитная постоянная времени двигателя; ν^* – коэффициент крутизны статической характеристики.

По предложенному методу совокупность этих систем (1) можно заменить лишь одной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_D, J_4 \ddot{\gamma} = M_{C1}, \\ A_2 \ddot{\alpha} + (J_{2np} + A_3) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = -M_{Cnp}. \end{cases} \quad (2)$$

Традиционная упругая модель инерционной передачи представляет собой совокупность систем дифференциальных уравнений, записанных по участкам:

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_D, \\ A_2 \ddot{\alpha} + (A_3 + J_{01}) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - \\ - A_6 \dot{\alpha}^2 = -U_1 \nu, \ddot{\nu} = \ddot{\beta}, \\ J_{02} \ddot{\delta} = -U_2 (\delta - \gamma) - k_C \dot{\delta}, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C + U_2 (\delta - \gamma), \end{cases} \begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_D, \\ A_2 \ddot{\alpha} + A_3 \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = 0, \\ J_{01} \ddot{\nu} = -U_1 \nu - k_C \dot{\nu}, \\ J_{02} \ddot{\delta} = -U_2 (\delta - \gamma) - k_C \dot{\delta}, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C + U_2 (\delta - \gamma), \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_D, \\ A_2 \ddot{\alpha} + (A_3 + J_{02}) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - \\ - A_6 \dot{\alpha}^2 = -U_2 (\delta - \gamma), \\ J_{01} \ddot{\nu} = -U_1 \nu - k_C \dot{\nu}, \ddot{\delta} = \ddot{\beta}, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C + U_2 (\delta - \gamma), \end{cases} \begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_D, \\ A_2 \ddot{\alpha} + (A_3 + J_{01} + J_{02}) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - \\ - A_6 \dot{\alpha}^2 = -U_1 \nu - U_2 (\delta - \gamma), \\ \ddot{\nu} = \ddot{\beta}, \ddot{\delta} = \ddot{\beta}, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C + U_2 (\delta - \gamma), \end{cases}$$

где ν, δ – углы поворота наружных обойм корпусного и выходного МСХ; J_{01}, J_{02} – моменты инерции наружных обойм корпусного и выходного МСХ; U_1, U_2 – жесткости упругих элементов корпусного и выходного МСХ; k_C – коэффициент, определяющий сопротивление движению наружных обойм МСХ.

Применяя предложенный метод и используя аналитическую функцию $H(x) = 0,5(1 + \text{th}(kx))$, где $\text{th}(kx)$ – гиперболический тангенс при достаточно большом значении k , системы (3) можно свести лишь к одной системе уравнений с аналитическими функциями:

$$\begin{cases} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 = M_{\text{л}}, \\ A_2 \ddot{\alpha} + (A_3 + J_{01} H(\dot{v} - \dot{\beta}) + J_{02} H(\dot{\beta} - \dot{\delta})) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 = \\ = -U_1 v H(\dot{v} - \dot{\beta}) - U_2 (\delta - \gamma) H(\dot{\beta} - \dot{\delta}), \\ J_{01} \ddot{v} = J_{01} \ddot{\beta} H(\dot{v} - \dot{\beta}) - (U_1 v + k_C \dot{v}) H(\dot{\beta} - \dot{v}), \\ J_{02} \ddot{\delta} = J_{02} \ddot{\beta} H(\dot{\beta} - \dot{\delta}) - (U_2 (\delta - \gamma) + k_C \dot{\delta}) H(\dot{\delta} - \dot{\beta}), \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_C + U_2 (\delta - \gamma) H(\dot{\beta} - \dot{\delta}). \end{cases} \quad (4)$$

На рис. 3 изображены графики угловых скоростей реактора импульсного механизма (а) и ведомого вала (б) в течение цикла, полученные с помощью предложенной модели (сплошная линия) и традиционным методом (пунктирная линия) для жесткой схемы. Графики решений системы (4) с помощью метода Рунге-Кутты изображены на рис. 4.

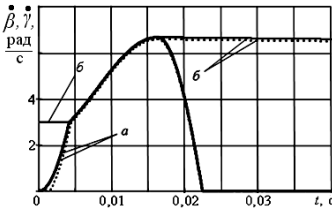


Рис. 3. Графики угловых скоростей реактора и ведомого вала от времени

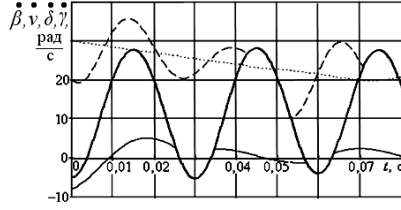


Рис. 4. Зависимости угловых скоростей звеньев передачи от времени

Сплошной утолщенной линией изображена зависимость угловой скорости реактора, сплошной тонкой линией – угловой скорости наружной обоймы корпусного МСХ, штриховой – угловой скорости наружной обоймы выходного МСХ и пунктирной – ведомого вала.

Математические модели были составлены практически для всех схем инерционных бесступенчатых передач, представленных на рис. 1.

При аппроксимации кусочно-линейных функций с помощью рядов Фурье для любой функции $f \in L_2[a, b]$, имеющей ограниченную вариацию на отрезке $[a, b]$, с изолированной точкой разрыва $x_0 \in (a, b)$ проявляется негативный эффект Гиббса:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n(f, x_0 + \pi/m) = f(x_0 + 0) + \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sin t}{t} dt - 1 \right), \quad d = f(x_0 + 0) - f(x_0 - 0).$$

Покажем, что абсолютная $\Delta = \Delta(x)$ и условная $\delta = \delta(x)$ погрешности аппроксимации в окрестности точек разрыва могут быть сколь угодно большими:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta(x_0 + \pi/m) = \lim_{n \rightarrow \infty} |S_n(f, x_0 + \pi/m) - f(x_0 + \pi/m)| = \left| \lim_{n \rightarrow \infty} S_n(x_0 + \pi/m) - \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_0 + \pi/m) \right| =$$

$$= \left| f(x_0 + 0) + \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin t}{t} dt - 1 \right) - f(x_0 + 0) \right| = \left| \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin t}{t} dt - 1 \right) \right| = \Delta(d).$$

Функция $\Delta(d)$ бесконечно большая, т.к. $\forall M > 0 \exists d = d^*(M) > 0 \forall d : |d| > d^* \Rightarrow$

$$\Delta(d^*) = \left| \frac{d^*}{2} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin t}{t} dt - 1 \right) \right| > M. \text{ В качестве } d^* \text{ можно взять, } \left[2M\pi / \left(2 \int_0^{\pi} \frac{\sin t}{t} dt - \pi \right) \right] + 1, \text{ где}$$

$[A]$ - целая часть числа A . ■

Даже при фиксированном значении $d \in R \forall M > 0 \exists f(x) \in L_2[a, b]$, для которой $\delta(x_0 + 0, d) = \Delta(x_0 + 0, d) / |f(x_0 + 0)| > M$, где $L_2[a, b]$ – функциональное гильбертово пространство измеримых функций, определенных на отрезке $[a, b]$ с интегрируемыми по Лебегу квадратами. Например, можно взять функцию, у которой $|f(x_0 + 0)| < \Delta(x_0 + 0, d) / M$, $f(x_0 + 0) \neq 0$.

Для устранения отмеченных недостатков автором предложены новые методы аппроксимации кусочно-линейных функций. Рассмотрим, например, ступенчатую функцию $f_0(x) = \text{sign}(\sin x)$. Аппроксимируем исходную функцию последовательностью рекурсивных периодических функций

$$\left\{ f_n(x) \mid f_n(x) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot f_{n-1}(x)\right), f_1(x) = \sin x, n-1 \in N \right\} \subset C^\infty[-\pi, \pi]. \quad (5)$$

Графики исходной функции (утолщенная линия) и пяти ее последовательных приближений в этом случае имеют вид (рис. 5). Предложенные аппроксимирующие методы лишены недостатков разложения в ряды Фурье. Эффект Гиббса полностью отсутствует.

Пусть $\{f_n(x)\} \subset L_2[0, \pi/2]$ и $f_0(x) \in L_2[0, \pi/2]$. Т.к. $\sup_{n \in N} \sup_{x \in [0, \pi/2]} |f_n(x)| = 1 < \infty$ и

$\sup_{n \in N} \text{Var}_0^{\pi/2} f_n = 1 < \infty$, то на основании теоремы Хелли в $\{f_n(x)\}$ можно извлечь подпоследовательность, сходящуюся в каждой точке $[0, \pi/2]$ к некоторой функции f , причем $\text{Var}_0^{\pi/2} f \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \text{Var}_0^{\pi/2} f_n$. Покажем, что в качестве такой функции f может выступать исходная функция $f_0(x)$.

Теорема 1. В функциональном банаховом пространстве измеримых функций $L_1[0, \pi/2]$ и функциональном гильбертовом пространстве $L_2[0, \pi/2]$ последовательность аппроксимирующих функций $\{f_n(x)\}$ сходится по норме к исходной функции $f_0(x)$.

Доказательство.

Введем последовательность минорантных относительно $\{f_n(x)\}$ функций $\{\eta_n(x) \mid \eta_n(x) = (2/\pi) \cdot \arctg(n\pi); n \in N\} \subset C^\infty[0, \pi/2]$. Можно показать, что $f_n(x) \geq \eta_n(x)$, $\forall n \in N, \forall x \in [0, \pi/2]$. Заметим, что мера множества точек разрыва функции $f_0(x)$ равна нулю. В пространстве $L_1[0, \pi/2]$ получим

$$\|f_0(x) - f_n(x)\| = \int_0^{\pi/2} (1 - f_n(x)) dx \leq \int_0^{\pi/2} (1 - \eta_n(x)) dx = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\pi n}{2} + \frac{1}{\pi n} \cdot \ln(1 + (\pi n)^2 / 4).$$

Т.к. $\lim_{n \rightarrow \infty} (\pi/2 - \arctg(\pi n/2) + \ln(1 + (\pi n)^2 / 4)) / \pi n = 0$, то $\|f_0(x) - f_n(x)\|_{n \rightarrow \infty} \rightarrow 0$. В

пространстве $L_2[0, \pi/2]$ с метрикой $\rho(x, y) = \left(\int_0^{\pi/2} (x(t) - y(t))^2 dt \right)^{1/2}$ имеем

$$\|f_0(x) - f_n(x)\|_{L_2[0, \pi/2]} = \left(\int_0^{\pi/2} (1 - f_n(x))^2 dx \right)^{1/2} \leq \left(\int_0^{\pi/2} (1 - \varphi_n(x))^2 dx \right)^{1/2} = \left(\frac{(2/\pi)^{n-1}}{2} \cdot (1 - \exp(-2(\pi/2)^n)) \right)^{1/2}.$$

Т.к. $\lim_{n \rightarrow \infty} ((2/\pi)^{n-1} \cdot (1 - \exp(-2(\pi/2)^n)) / 2)^{1/2} = 0$, то $\|f_0(x) - f_n(x)\|_{L_2[0, \pi/2]} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$. Последовательность $\{f_n(x)\}$ сходится в среднем к функции $f_0(x)$. ■

Таким образом, последовательность аппроксимирующих функций $f_n(x)$ в пространствах $L_1[-\pi, \pi]$ и $L_2[-\pi, \pi]$ является фундаментальной. В пространстве $C[-\pi, \pi]$ последовательность $f_n(x)$ фундаментальной не является.

Теорема 2. Последовательность функций $f_n(x)$ сходится к исходной функции $f_0(x)$, причем сходимость является поточечной, но не является равномерной.

Доказательство теоремы приводится в диссертации.

Пусть $\Delta = |f_0(x) - f_n(x)| \in [0, 1]$ – абсолютная погрешность аппроксимации,

$\left\{ r_n \mid r_n = \max_{\Delta} \max_{x_1, x_2 \in [0, \pi]: f_n(x_1) = f_n(x_2)} |x_2 - x_1| \right\}$ – последовательность максимальных мет-

рик. Из $f_n(x) = 1 - \Delta$ получим $\left\{ r_n \mid r_n = \pi - 2 \arcsin \lambda_n, \lambda_n = (2/\pi) \cdot \arcsin \lambda_{n-1}, \lambda_1 = 1 - \Delta, n - 1 \in N \right\}$.

Последовательность $r_n(\Delta) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} r^*(\Delta) = \begin{cases} \pi, \Delta \in (0, 1], \\ 0, \Delta = 0, \end{cases}$ причем сходимость является

поточечной, но не является равномерной. Графики нескольких первых функций в последовательности $\{r_n(\Delta)\}$ приведены на рис. 6. Длина промежутка, на котором погрешность аппроксимации не превышает Δ , резко возрастает с увеличением n в области достаточно малых значений погрешности Δ . Этот факт говорит о быстрой сходимости предложенного метода.

Для количественной оценки изменения длины этого промежутка выведем приближенную зависимость для функции $\Delta r(n, \Delta) = r_n - r_{n-1}$. Из условия

$r_n - r_{n-1} = 2(x_{n-1} - x_n)$, где $x_n = \arcsin((2/\pi) \cdot x_{n-1})$, $x_1 = \arcsin(1 - \Delta)$ следует $r_n - r_{n-1} = 2(x_{n-1} - \arcsin((2/\pi) \cdot x_{n-1}))$. Раскладывая $\arcsin((2/\pi) \cdot x_{n-1})$ в ряд Маклорена и учитывая достаточную малость x_{n-1} , приближенно получим $r_n - r_{n-1} \approx (2/\pi) \cdot (\pi - 2) \cdot x_{n-1}$. Тогда $r_n - r_{n-1} \approx (2/\pi)^{n-1} \cdot (\pi - 2) \cdot \arcsin(1 - \Delta)$.

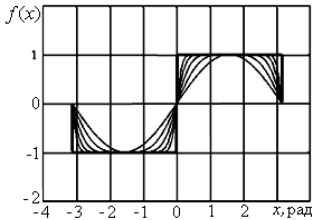


Рис. 5. Графики исходной функции и ее аппроксимаций

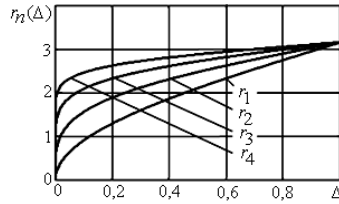


Рис. 6. Длины промежутков с заданной погрешностью

Свойство 1. Максимальная величина разности $r_n - r_{n-1}$ не зависит от n

и находится по соотношению: $\max_{\Delta \in [0, 1]} (r_n - r_{n-1}) = \sqrt{\pi^2 - 4} - 2 \arcsin \sqrt{1 - 4/\pi^2}$, $n - 1 \in N$.

Для справки $\max_{\Delta \in [0, 1]} (r_n - r_{n-1}) \approx 0,661$.

Доказательство приводится в диссертации.

Свойство 2. Максимальная величина разности значений функций

$f_n(x) - f_{n-1}(x)$ не зависит от n и находится по соотношению: $\max_{x \in [0, \pi]} (f_n(x) - f_{n-1}(x)) =$

$= (\sqrt{\pi^2 - 4} - 2 \arccos(2/\pi)) / \pi$, $n - 1 \in N$. Для справки $\max_{x \in [0, \pi]} (f_n(x) - f_{n-1}(x)) \approx 0,211$.

Свойство 2 показывает, что последовательность аппроксимирующих функций $f_n(x)$ не сходится по Коши, т.е. не является фундаментальной, т.к.

$\exists \varepsilon > 0 \forall n^* \in N \exists n, m > n^*$, что $\max_{x \in [0, \pi]} |f_n(x) - f_m(x)| > \varepsilon$. В качестве ε можно взять,

например, число $0,1$, положив $m = n^* + 1$, $n = n^* + 2$.

Компьютерное сравнение предложенных методов аппроксимации и традиционных методов исследования динамики инерционных передач (рис. 7) показало их хорошую сходимость. Сплошная линия – решение, полученное при использовании разрывной функции $y = \text{sign}(x)$, пунктирная линия – при использовании аналитической аппроксимации.

С помощью предложенных методов были разработаны аналогичные аппроксимации произвольных кусочно-линейных и импульсных функций.

Разработаны новые методы аппроксимации обобщенных функций. Предлагается аппроксимировать функцию Хевисайда последовательностью

функций вида $H_n(x) = (1 + f_n(x))/2$, где последовательность рекурсивных функций $f_n(x)$ определяется соотношением (5). Например, производные трех последовательных приближений $H_9(x), H_{10}(x), H_{11}(x)$, дадут приближения для δ -функции (рис. 8) и её производных до четвертого порядка включительно (рис. 9).

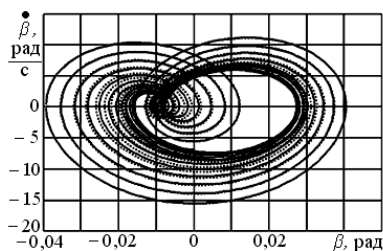


Рис. 7. Фазовые траектории

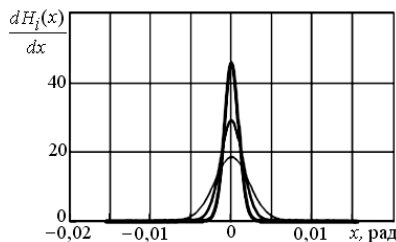


Рис. 8. Графики аппроксимаций δ -функции

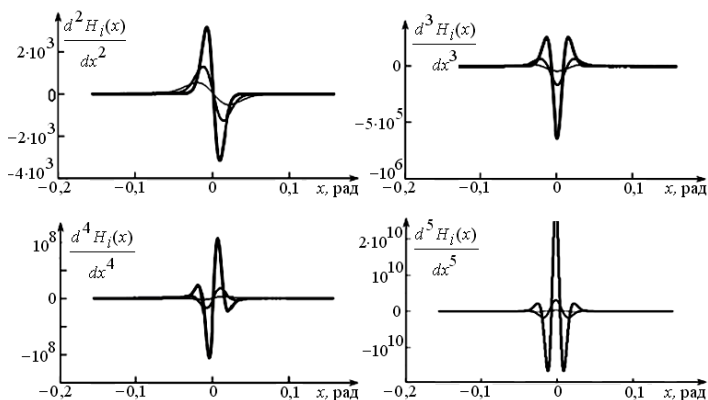


Рис. 9. Графики аппроксимаций производных δ -функции

Предложенные методы являются универсальными. Они могут быть применены для аппроксимации обобщенных функций и их производных в самых разнообразных областях научных исследований.

Третья глава посвящена вопросам нелинейных колебаний инерционных бесступенчатых передач. Проведен сравнительный анализ приближенных методов решения дифференциальных уравнений движения.

Рассмотрим математическую модель инерционно-импульсного привода

$$\begin{cases} B_1 \ddot{\alpha} + B_2 \ddot{\beta} + (b_1 \ddot{\alpha} + b_2 \ddot{\beta}) \cos \psi + a_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 \sin \psi + a_6 \dot{\beta}^2 \cdot \sin \psi = M_{\mathcal{L}}, \\ B_2 \ddot{\alpha} + B_3 \ddot{\beta} + (b_2 \ddot{\alpha} + b_3 \ddot{\beta}) \cos \psi + a_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 \sin \psi - a_6 \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \psi = -M_{\mathcal{C}}, \\ \dot{M}_{\mathcal{L}} = (M_H - M_{\mathcal{L}} - (\dot{\alpha} - \dot{\omega}_H) / v^* \cdot \dot{\omega}_X) / T, \end{cases}$$

где $B_1 = J_1 + nma^2 + (a/k + q)^2 nJ_3$; $b_1 = 2nmah(a/k + q)$; $B_2 = nmab + (a/k + q)(b/k - q)nJ_3$;
 $b_2 = nmh(2ab/k + (b - a)q)$; $B_3 = J_2 + nmb^2 + (b/k + q)^2 nJ_3$; $b_3 = 2nmbh(b/k - q)$;
 $a_4 = -nmah(a/k + q)q$; $a_5 = nmbh(b/k - q)q$; $a_6 = nmkhq$.

С введенным малым параметром μ система примет вид

$$\begin{cases} B_1 \ddot{\alpha} + B_2 \ddot{\beta} + \mu \cdot (b_1 \ddot{\alpha} + b_2 \ddot{\beta}) \cos \psi + \mu \cdot a_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 \sin \psi + \mu \cdot a_6 \dot{\beta}^2 \cdot \sin \psi = \mu \cdot M_{\mathcal{L}}, \\ B_2 \ddot{\alpha} + B_3 \ddot{\beta} + \mu \cdot (b_2 \ddot{\alpha} + b_3 \ddot{\beta}) \cos \psi + \mu \cdot a_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 \sin \psi - \mu \cdot a_6 \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \psi = -\mu \cdot M_{\mathcal{C}}, \\ \dot{M}_{\mathcal{L}} = (M_H - M_{\mathcal{L}} - (\dot{\alpha} - \dot{\omega}_H) / v^* \cdot \dot{\omega}_X) / T. \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы будем искать в виде рядов

$$\alpha = \alpha_0 + \mu \alpha_1 + \mu^2 \alpha_2 + \dots; \beta = \beta_0 + \mu \beta_1 + \mu^2 \beta_2 + \dots; M_{\mathcal{L}} = M_{\mathcal{L}0} + \mu M_{\mathcal{L}1} + \mu^2 M_{\mathcal{L}2} + \dots \quad (7)$$

При подстановке рядов (7) в систему (6) первое уравнение системы примет вид

$$\begin{aligned} & B_1 (\ddot{\alpha}_0 + \mu \ddot{\alpha}_1 + \mu^2 \ddot{\alpha}_2 + \dots) + B_2 (\ddot{\beta}_0 + \mu \ddot{\beta}_1 + \mu^2 \ddot{\beta}_2 + \dots) + \mu (b_1 (\ddot{\alpha}_0 + \mu \ddot{\alpha}_1 + \mu^2 \ddot{\alpha}_2 + \dots) + \\ & + b_2 (\ddot{\beta}_0 + \mu \ddot{\beta}_1 + \mu^2 \ddot{\beta}_2 + \dots)) \cos \psi + \mu (a_4 (\dot{\alpha}_0 + \mu \dot{\alpha}_1 + \mu^2 \dot{\alpha}_2 + \dots - \dot{\beta}_0 - \mu \dot{\beta}_1 - \mu^2 \dot{\beta}_2 - \dots)^2 + \\ & + a_6 (\dot{\beta}_0 + \mu \dot{\beta}_1 + \mu^2 \dot{\beta}_2 + \dots)^2) \sin \psi = \mu (M_{\mathcal{L}0} + \mu M_{\mathcal{L}1} + \mu^2 M_{\mathcal{L}2} + \dots). \end{aligned}$$

Второе уравнение системы (6) запишется так

$$\begin{aligned} & B_2 (\ddot{\alpha}_0 + \mu \ddot{\alpha}_1 + \mu^2 \ddot{\alpha}_2 + \dots) + B_3 (\ddot{\beta}_0 + \mu \ddot{\beta}_1 + \mu^2 \ddot{\beta}_2 + \dots) + \mu (b_2 (\ddot{\alpha}_0 + \mu \ddot{\alpha}_1 + \mu^2 \ddot{\alpha}_2 + \dots) + \\ & + b_3 (\ddot{\beta}_0 + \mu \ddot{\beta}_1 + \mu^2 \ddot{\beta}_2 + \dots)) \cos \psi + \mu (a_5 (\dot{\alpha}_0 + \mu \dot{\alpha}_1 + \mu^2 \dot{\alpha}_2 + \dots - \dot{\beta}_0 - \mu \dot{\beta}_1 - \mu^2 \dot{\beta}_2 - \dots)^2 - \\ & - a_6 (\dot{\alpha}_0 + \mu \dot{\alpha}_1 + \mu^2 \dot{\alpha}_2 + \dots)^2) \sin \psi = -\mu M. \end{aligned}$$

Для третьего уравнения системы (6) получим

$$\begin{aligned} & \dot{M}_{\mathcal{L}0} + \mu \dot{M}_{\mathcal{L}1} + \mu^2 \dot{M}_{\mathcal{L}2} + \dots = (M_H - M_{\mathcal{L}0} - \mu M_{\mathcal{L}1} - \mu^2 M_{\mathcal{L}2} - \dots - \\ & - (\dot{\alpha}_0 + \mu \dot{\alpha}_1 + \mu^2 \dot{\alpha}_2 + \dots - \dot{\omega}_H) / v^* \dot{\omega}_X) / T. \end{aligned}$$

Порождающая система (7) имеет решение (8)

$$\begin{cases} B_1 \ddot{\alpha}_0 + B_2 \ddot{\beta}_0 = 0, \\ B_2 \ddot{\alpha}_0 + B_3 \ddot{\beta}_0 = 0, \\ \dot{M}_{D0} + M_{D0}/T = (M_H - (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\omega}_H)/v^* \omega_X)/T. \end{cases} \quad (7) \quad \begin{cases} \alpha_0 = \dot{\alpha}_{01} t + \alpha_{01}, \\ \beta_0 = \dot{\beta}_{01} t + \beta_{01}, \\ M_{D0} = M_1 \exp(t/T) + M_2, \end{cases} \quad (8)$$

где $M_1 = M_{D0} - M_H + (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\omega}_H)/v^* \omega_X$; $M_2 = M_H - (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\omega}_H)/v^* \omega_X$.

Функции $\sin \psi$ и $\cos \psi$ разложим в окрестности порождающего решения $\alpha_0(t), \beta_0(t)$:

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \sin q(\alpha_0 - \beta_0) + \cos q(\alpha_0 - \beta_0) \cdot (\mu q(\alpha_1 - \beta_1) + \mu^2 q(\alpha_2 - \beta_2) + \dots), \\ \cos \psi &= \cos q(\alpha_0 - \beta_0) + \sin q(\alpha_0 - \beta_0) \cdot (\mu q(\alpha_1 - \beta_1) + \mu^2 q(\alpha_2 - \beta_2) + \dots). \end{aligned}$$

Запишем систему для нахождения функций $\alpha_1(t), \beta_1(t), M_{D1}(t)$

$$\begin{cases} B_1 \ddot{\alpha}_1 + B_2 \ddot{\beta}_1 + (a_4(\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2 + a_6 \dot{\beta}_{01}^2) \sin q(\alpha_0 - \beta_0) = M_{D0}, \\ B_2 \ddot{\alpha}_1 + B_3 \ddot{\beta}_1 + (a_5(\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2 - a_6 \dot{\alpha}_{01}^2) \sin q(\alpha_0 - \beta_0) = -M, \\ \dot{M}_{D1} + M_{D1}/T = -\dot{\alpha}_1/T v^* \omega_X. \end{cases}$$

Решая эту систему, получим решение для функций $\alpha_1(t)$ и $\beta_1(t)$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{\Delta} \left((B_3 M_2 + B_2 M) \frac{t^2}{2} + B_3 T^2 M_1 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) - \frac{D_1}{q^2 (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2} \sin \psi_0 \right) + C_1 t + C_3, \\ \beta_1 = -\frac{1}{\Delta} \left((B_2 M_2 + B_1 M) \frac{t^2}{2} + B_2 T^2 M_1 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \frac{D_2}{q^2 (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2} \sin \psi_0 \right) + C_2 t + C_4, \end{cases}$$

где $\Delta = B_1 B_3 - B_2^2$, $D_1 = (B_2 a_5 - B_3 a_4) \cdot (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2 - (B_2 \dot{\alpha}_{01} + B_3 \dot{\beta}_{01}) a_6$;

$D_2 = (B_3 a_4 - B_1 a_5) \cdot (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2 + (B_1 \dot{\alpha}_{01} - B_3 \dot{\beta}_{01}) a_6$; $\psi_0 = q(\alpha_0 - \beta_0) = q((\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})t + \alpha_{01} - \beta_{01})$;

$C_1 = \left(B_3 T M_1 + D_1 \cos q(\alpha_{01} - \beta_{01}) / q(\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01}) \right) / \Delta$; $C_2 = \left(-B_2 T M_1 + D_2 \cos q(\alpha_{01} - \beta_{01}) / q(\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01}) \right) / \Delta$;

$C_3 = \left(-B_3 T^2 M_1 + D_1 \sin q(\alpha_{01} - \beta_{01}) / q^2 (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2 \right) / \Delta$; $C_4 = \left(B_2 T^2 M_1 + D_2 \sin q(\alpha_{01} - \beta_{01}) / q^2 (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2 \right) / \Delta$.

Решение для $M_{D1}(t)$ запишется так

$$M_{D1} = P_1 + P_2 t + (C_5 + P_3 t) \exp(-t/T) + P_4 \sin \psi_0 + P_5 \cos \psi_0,$$

где

$$P_1 = \left(C_1 + \frac{B_3 M_2 + B_2 M}{v^* \omega_X} \right) T, \quad P_2 = -\frac{B_3 M_2 + B_2 M}{v^* \omega_X}, \quad P_3 = \frac{B_3 M_1}{\Delta v^* \omega_X}, \quad P_4 = \frac{D_1 T}{(1 + T^2 q^2 (\dot{\alpha}_{01} - \dot{\beta}_{01})^2) \Delta v^* \omega_X},$$

$$P_5 = \frac{D_1}{(1 + T^2 \dot{q}^2 (\alpha_{01} - \beta_{01})^2) \Delta v^* \omega_x q (\alpha_{01} - \beta_{01})}, C_5 = -P_1 - P_4 \sin q (\alpha_{01} - \beta_{01}) - P_5 \cos q (\alpha_{01} - \beta_{01}).$$

Окончательно получим $\alpha = \alpha_{01} + \dot{\alpha}_{01} \cdot t + \alpha_1, \beta = \beta_{01} + \dot{\beta}_{01} \cdot t + \beta_1, M_d = M_1 \exp(-t/T) + M_2 + M_{д1}$.

Получены решения методами последовательных приближений и разложения в степенные ряды. Сравнение с численными решениями показали, что метод разложения в степенные ряды является наиболее слабым. Поэтому рассмотрим только графики, соответствующие методам Рунге-Кутты (сплошная линия), малого параметра и последовательных приближений (рис. 10). Наилучшие результаты дает метод малого параметра (пунктирная линия).

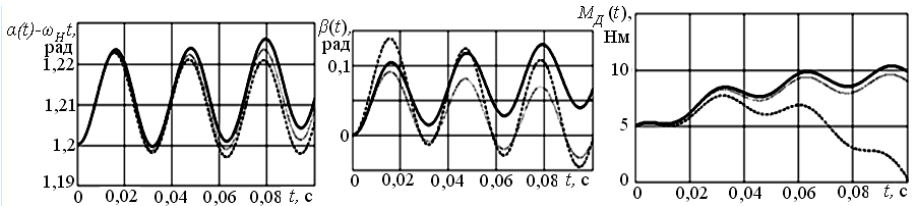


Рис. 10. Графики зависимостей углов поворота ведущего и ведомого вала и момента двигателя от времени

Предложены конструкции МСХ (рис.11), работающие по релейному принципу, а именно: через заклинивающие элементы передается только часть нагрузки. Основная часть крутящего момента передается, минуя заклинивающие элементы. Такое конструктивное решение позволяет разгрузить МСХ в десятки и сотни раз. Здесь 1 – ведущий вал; 2 – внутренняя обойма; 3 – фрикционный диск; 4 – заклинивающие элементы; 5 – наружная обойма. На рис. 12 изображена схема действия сил в винтовой паре. Предложены конструкции МСХ с компенсацией осевой силы.

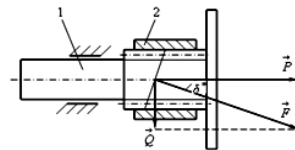
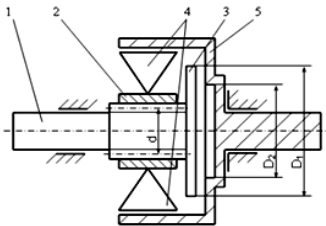


Рис. 11. Схема МСХ релейного типа Рис. 12. Схема действия сил

Момент $M_1 = Q \cdot r$, где $r = d/2$, передается через заклинивающие элементы. Момент $M_2 = 2f \cdot P \cdot (R_1^2 + R_1 \cdot R_2 + R_2^2) / 3 \cdot (R_1 + R_2)$, где f – коэффициент трения, $R_1 = D_1/2, R_2 = D_2/2$, передается через фрикционные поверхности.

Обозначив $k = R_1/R_2$, найдем $M_2/M_1 = 2f \cdot R_1 \cdot (k^2 + k + 1) \cdot \text{ctg} \delta^* / 3r \cdot (k^2 + k)$. После преобразований найдем $M_2/M_1 = 2f \cdot R_1 \cdot \text{ctg} \delta^* \cdot (1+1/p) / 3r$, где $k^2 + k = p$. С учетом оценки $1 < 1+1/p < 1,5$ получим $2A/3 < M_2/M_1 < A$, где $A = f \cdot R_1 \cdot \text{ctg} \delta^* / r$.

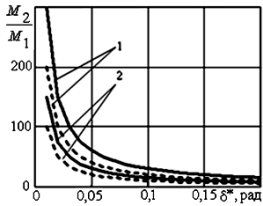


Рис. 13. Зависимости отношения составляющих момента от угла подъема винтовой линии

На рис. 13 представлены зависимости отношения составляющих момента M_2/M_1 от угла подъема винтовой линии. Кривые 1 соответствуют нижней (пунктирная) и верхней (сплошная) границам оценки при значениях $f = 0,3, R_1 = 0,2$ м, $r = 0,02$ м. Для кривых 2 $R_1 = 0,1$ м.

Отношение составляющих крутящего момента неограниченно возрастает при выполнении хотя бы одного из условий: $R_1 \rightarrow \infty, r \rightarrow 0, \delta^* \rightarrow 0$. Следовательно, можно разгрузить заклинивающие элементы МСХ на сколь угодно значительную величину.

Учитывая переменность структуры, математическую модель МСХ можно рассматривать как совокупность систем дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (J_1 + J_2)\ddot{\alpha} = M, \\ J_3\ddot{\gamma} = -M_C, \ddot{\beta} = \ddot{\alpha}, \end{cases} \begin{cases} (J_1 + mh^2/4\pi^2)\ddot{\alpha} = M - hF_1/2\pi, \\ (J_2 + J_3)\ddot{\gamma} = -M_C, \ddot{\beta} = \ddot{\gamma}; \end{cases} \begin{cases} (J_1 + J_2 + J_3)\ddot{\alpha} = M - M_C, \\ \ddot{\beta} = \ddot{\gamma} = \ddot{\alpha}. \end{cases}$$

где α, β, γ — углы поворота ведущего вала, внутренней и наружной обойм механизма свободного хода; J_1, J_2, J_3 — моменты инерции ведущего вала, внутренней и наружной обойм с приведенными к ним моментами инерции заклинивающих элементов; M_C — момент сопротивления; m — масса ведущего вала; h — ход резьбы; F_1 — возвращающая осевая сила.

Применяя предложенный автором метод, уравнения движения механизма свободного хода можно записать в виде одной системы:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = \frac{M - M_C \cdot \Phi(\dot{\alpha} - \dot{\gamma})}{J_1 + J_2 + J_3 \cdot \Phi(\dot{\alpha} - \dot{\gamma})}; \ddot{\gamma} = \frac{(M - M_C \cdot H(\dot{\alpha} - \dot{\gamma})) \cdot H(\dot{\alpha} - \dot{\gamma})}{J_1 + J_2 + J_3 \cdot \Phi(\dot{\alpha} - \dot{\gamma})} - \frac{M_C}{J_3} \cdot \Phi(\dot{\gamma} - \dot{\alpha}). \end{cases} \quad (9)$$

Крутящий момент определялся зависимостью $M = M_{o1} + M_{o2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$, где M_{o1}, M_{o2} — постоянные коэффициенты, ω — циклическая частота.

На рис. 14 изображены графики решений системы (9). Сплошная линия — график зависимости угловой скорости ведущего вала, пунктирная — наружной обоймы от времени t . Циклические траектории в пространстве угловых скоростей ведущего вала и наружной обоймы представлены на рис. 15. Предельный цикл выделен утолщенной линией. Выход на предельный цикл происходит достаточно быстро.

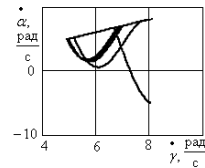
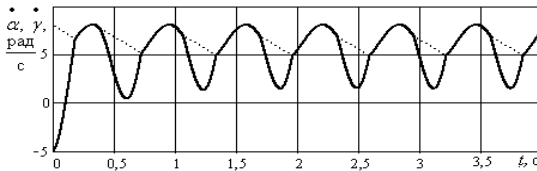


Рис. 14. Графики угловых скоростей $\dot{\alpha}(t), \dot{\gamma}(t)$ Рис. 15. Циклическиетраектории

Рассмотрены нелинейные колебания передач без МСХ. Динамическая картина при этом отличается большим разнообразием. На рис. 16 изображены некоторые из полученных фазовых траекторий и периодических решений.

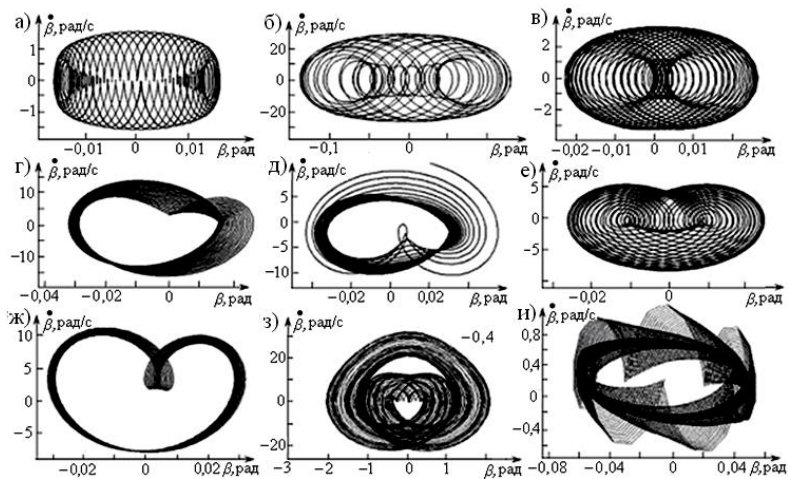


Рис. 16. Примеры фазовых траекторий и периодических решений

Дифференциальное уравнение движения передачи будет иметь вид $A_3 \ddot{\beta} + A_5 (\omega - \dot{\beta})^2 - A_6 \omega^2 + c\beta = -M_C$. (10). Построим периодическое решение уравнения на холостом режиме работы при отсутствии резонанса. Интерес к холостому режиму вызван тем, что на этом режиме можно определить максимальную амплитуду колебаний ведомого вала и, тем самым, установить потенциальную способность передачи выполнять заданный технологический процесс.

Коэффициенты A_3, A_5, A_6 представим в виде $A_3 = B_3 + b_3 \cos \psi$, $A_5 = a_5 \sin \psi$, $A_6 = a_6 \sin \psi$, где $B_3 = J_2 + nmb^2 + (b/k + q)^2 nJ_3$; $b_3 = 2nmbh(b/k - q)$; $a_5 = nmbh(b/k - q)q$; $a_6 = nmkhq$.

Вводя малый параметр μ , уравнение (10) можно записать так

$$B_3 \ddot{\beta} + c\beta = (a_6 - a_5)\omega^2 \sin \psi + \mu(2a_5\omega \dot{\beta} \sin \psi - a_5 \dot{\beta}^2 \sin \psi - b_3 \ddot{\beta} \cos \psi). \quad (11)$$

Функции $\sin \psi$ и $\cos \psi$ разложим в ряды вида

$$\sin \psi = \sin q\omega t - \mu q \beta \cos q\omega t - \frac{\mu^2 q^2 \beta^2}{2} \sin q\omega t + \dots, \quad \cos \psi = \cos q\omega t + \mu q \beta \sin q\omega t - \frac{\mu^2 q^2 \beta^2}{2} \cos q\omega t - \dots$$

Периодическое решение будем искать в виде ряда по степеням малого параметра $\beta = \beta_0 + \mu\beta_1 + \mu^2\beta_2 + \dots$. Порождающее уравнение получим из уравнения (11), положив $\mu = 0$: $B_3 \ddot{\beta}_0 + c\beta_0 = (a_6 - a_5)\omega^2 \sin q\omega t$, которое имеет единственное периодическое решение с циклической частотой $q\omega$: $\beta_0 = D_0 \sin q\omega t$, где $D_0 = (a_6 - a_5)\omega^2 / (c - B_3 q^2 \omega^2)$. Уравнение для β_1 запишется так

$$B_3 \ddot{\beta}_1 + c\beta_1 = \frac{1}{2}(3a_5 - a_6 + qb_3)D_0 q \omega^2 \sin 2q\omega t - \frac{1}{4}a_5 D_0^2 q^2 \omega^2 (\sin q\omega t + \sin 3q\omega t),$$

решая которое, найдем периодическое решение $\beta_1 = D_1 \sin q\omega t + D_2 \sin 2q\omega t + D_3 \sin 3q\omega t$,

$$\text{где } D_1 = \frac{0,25a_5 D_0^2 q^2 \omega^2}{B_3 q^2 \omega^2 - c}; \quad D_2 = \frac{0,5q\omega^2 D_0 (3a_5 - a_6 + qb_3)}{c - 4B_3 q^2 \omega^2}; \quad D_3 = \frac{0,25a_5 D_0^2 q^2 \omega^2}{9B_3 q^2 \omega^2 - c}.$$

Искомое периодическое решение с периодом $2\pi/q\omega$ имеет вид

$$\beta = (D_0 + D_1) \sin q\omega t + D_2 \sin 2q\omega t + D_3 \sin 3q\omega t.$$

Начальные условия, соответствующие периодическому решению с периодом $2\pi/q\omega$, имеют значения $\beta(0) = 0$, $\dot{\beta}(0) = (D_0 + D_1 + 2D_2 + 3D_3)q\omega$.

На рис. 17 изображены предельные циклы, полученные с помощью аналитического решения и численных решений. Графики предельных циклов, полученные с помощью аналитического решения и численного решения с учетом допущения о постоянстве угловой скорости ведущего вала полностью сливаются (сплошная утолщенная линия) (рис. 17а), что свидетельствует о высокой точности аналитического решения. Численному решению при переменной угловой скорости ведущего вала соответствует сплошная тонкая линия. Отклонение сплошной тонкой линии от утолщенной достаточно небольшое, что подтверждает утверждение о возможности отыскания периодических решений при допущении о постоянстве угловой скорости ведущего вала.

Полученное решение имеет три гармоники, поэтому в зависимости от значений коэффициентов при этих гармониках возможны и другие виды фазовых портретов периодических решений (рис. 17б).

Построим периодическое решение дифференциальных уравнений движения на рабочем режиме работы. Рассмотрим уравнение (10) при условии $M_c \neq 0$. Функцию $\text{sign}(\dot{\beta})$ аппроксимируем аналитической функцией $\sin((\pi/2)\sin((\pi/2)\sin(p\dot{\beta})))$ при достаточно малых значениях p : $p\dot{\beta} \in [-\pi/2, \pi/2]$.

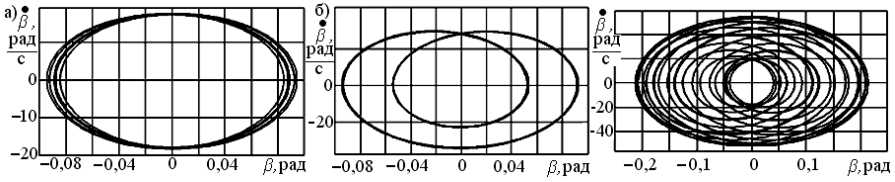


Рис. 17.Графики периодических решений

Раскладывая аппроксимирующую функцию в степенной ряд, отбрасывая высшие гармоники и применяя формулы понижения степени, получим зависимость для момента сопротивления $M_C = M_0 + M_2 \sin q\omega t + M_3 \sin 3q\omega t$, где

$$M_2 = M_1(\pi/2)^2 p D_0(1 - p^2 D_0^2((\pi/2)^4 + (\pi/2)^2 + 1)/8) \sin q\omega t;$$

$$M_3 = M_1(\pi/2)^2 p^3((\pi/2)^4 + (\pi/2)^2 + 1) D_0^3 \sin 3q\omega t / 24.$$

Записав дифференциальное уравнение (10) в виде

$$B_3 \ddot{\beta} + c\dot{\beta} = (a_6 - a_5)\omega^2 \sin \psi + \mu(2a_5\omega \dot{\beta} \sin \psi - a_5 \dot{\beta}^2 \sin \psi - b_3 \ddot{\beta} \cos \psi - M_C),$$

найдем периодическое решение на рабочем режиме работы с точностью до константы, как это было сделано в случае холостого хода

$$\beta = (D_0 + D_1 + D_2) \sin q\omega t + D_2 \sin 2q\omega t + (D_3 + D_5) \sin 3q\omega t, \text{ где } D_4 = M_2 / (B_3 q^2 \omega^2 - c); D_5 = M_3 / (9B_3 q^2 \omega^2 - c).$$

Проверим устойчивость найденных периодических решений на холостом и рабочем режимах работы, для этого в уравнение (10) введем диссипативный момент $M = M_0 + M_1 \cdot \text{sign}(\dot{\beta})$. В случае холостого режима в качестве диссипативного момента может выступать момент трения с характеристикой сухого трения, в случае рабочего режима – момент сопротивления M_C . Функцию $\text{sign}(\dot{\beta})$ аппроксимируем аналитической функцией $(2/\pi) \arctg(N\dot{\beta})$.

Перепишем уравнение (10) в виде

$$\ddot{\beta} + (\sqrt{c/B_3})^2 \dot{\beta} = (a_6 - a_5)\omega^2 \sin q\omega t / B_3 + \mu((2\omega - \dot{\beta})a_5 \dot{\beta} \sin \psi - \mu b_3 \ddot{\beta} \cos \psi + (a_6 - a_5)\omega^2 (\sin \psi - \sin q\omega t) - M) / B_3, \quad (11)$$

Т.к. $\ddot{\beta} = f(t, \beta, \dot{\beta})$, то уравнение (11) можно представить в виде

$$\ddot{\beta} + \lambda^2 \dot{\beta} = \varphi_1(t) + \mu \varphi_2(t, \beta, \dot{\beta}, \mu), \quad (12), \text{ где } \lambda = \sqrt{c/B_3}; \varphi_1(t) = (a_6 - a_5)\omega^2 \sin q\omega t / B_3;$$

$$\varphi_2(t, \beta, \dot{\beta}, \mu) = (2a_5\omega \dot{\beta} \sin \psi - a_5 \dot{\beta}^2 \sin \psi - \mu b_3 f(t, \beta, \dot{\beta}) + (a_6 - a_5)\omega^2 (\sin \psi - \sin q\omega t) - M) / B_3.$$

Для уравнений вида (12) справедлива теорема, по которой периодическое решение $\beta(t, \mu): \beta(t, 0) = \beta_0(t)$ асимптотически устойчиво при достаточно

малых членах с малым параметром μ , если $g = \int_0^{2\pi/q\omega} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \beta}(t, \beta_0(t), \dot{\beta}_0(t), 0) dt < 0$. В

нашем случае $g = -\frac{2M_1 N}{\pi} \int_0^{2\pi/q\omega} \frac{dt}{1+(N\dot{\beta}_0)^2} < 0$ в силу свойства о знаке определенного

интеграла. Поэтому найденные периодические решения при достаточно малых членах с малым параметром μ являются асимптотически устойчивыми.

Главному резонансу соответствует условие $c = B_3 q^2 \omega^2$. График зависимости угла поворота реактора от времени в случае главного резонанса изображен на рис. 19. Наряду с главным резонансом, могут возникать и резонансы, для которых $c = 4B_3 q^2 \omega^2, c = 9B_3 q^2 \omega^2, \dots$

Замена корпусного МСХ на упругую связь не только позволяет сократить число МСХ, но и снизить нагрузки на выходной МСХ за счет накопления потенциальной энергии в упругой связи при действии обратного импульса. Максимальный момент, действующий при этом на ведомый вал, снижается в $\pi/2$ раз по сравнению с жесткой схемой. В случае установки двух импульсных механизмов, действующих в противофазе, снижение максимального момента составит π раз. На ведомый вал передачи будет действовать постоянный момент.

Запишем математическую модель передачи:

$$\begin{cases} A_3 \ddot{\beta} + A_5 (\omega - \dot{\beta})^2 - A_6 \omega^2 + c\beta = 0, \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_c. \end{cases} \quad \begin{cases} (A_3 + J_4) \ddot{\beta} + A_5 (\omega - \dot{\beta})^2 - A_6 \omega^2 + c\beta = -M_c, \\ \ddot{\gamma} = \ddot{\beta}. \end{cases}$$

С помощью разработанных методов можно свести эти системы к одной

$$\begin{cases} (A_3 + J_4 \cdot (1 - \Phi(\dot{\gamma} - \dot{\beta}))) \ddot{\beta} + A_5 (\omega - \dot{\beta})^2 - A_6 \omega^2 + c\beta = -M_c \cdot (1 - \Phi(\dot{\gamma} - \dot{\beta})), \\ J_4 \ddot{\gamma} = -M_c \cdot \Phi(\dot{\gamma} - \dot{\beta}) + J_4 \ddot{\beta} \cdot (1 - \Phi(\dot{\gamma} - \dot{\beta})). \end{cases}$$

На рис. 20 изображена траектория движения реактора импульсного механизма с выходом на периодическое движение в фазовом пространстве.

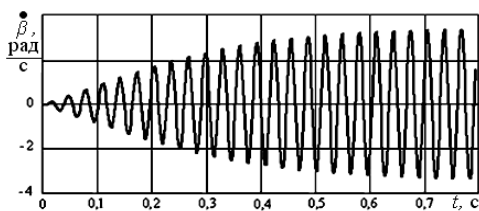


Рис. 19. Главный резонанс

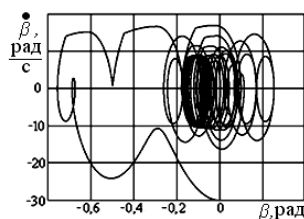


Рис. 20. Фазовые траектории

Предложенная передача также может работать в режиме прямой передачи. Для этого достаточно обеспечить конструктивную связь упругого звена с корпусом через тормоз (или муфту).

В четвертой главе рассматривается динамика передач с рычажным механизмом (рис. 1л), не имеющими в своей схеме МСХ. Такие передачи позволяют значительно расширить области возможного применения инерционных передач без МСХ. Рассматриваются нелинейные колебания в случае односторонней и двусторонней силы полезного сопротивления. Доказывается возможность трансформации момента в конструкциях передач без МСХ при действии на рабочий орган одностороннего полезного сопротивления. Рассматриваются нелинейные колебания инерционного привода на холостом режиме работы. Исследуются действующие нагрузки. Построены периодические решения в случае односторонней (рис. 21а) и двусторонней силы сопротивления (рис. 21б) в цилиндрических фазовых пространствах $(\psi, \dot{\psi})$ и $(\beta, \dot{\beta})$.

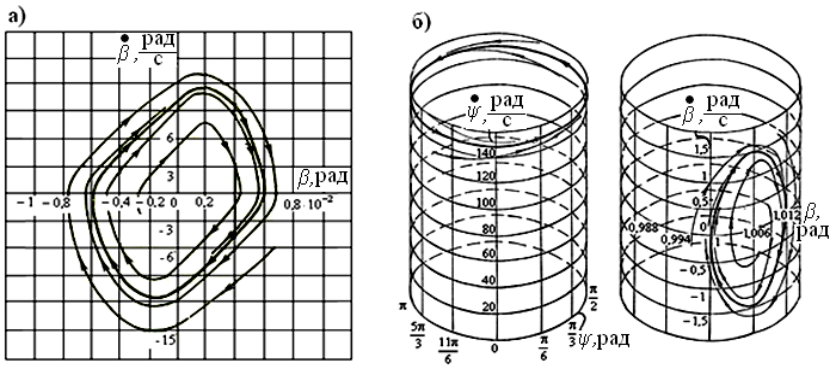


Рис. 21. Проекция траектории изображающей точки

В случае двусторонней силы сопротивления периодическое решение было получено на основе системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_1 \ddot{\psi}/q + (B_1 + B_2) \ddot{\beta} + \mu \left\{ \left[b_1 \ddot{\psi}/q + (b_1 + b_2) \ddot{\beta} \right] \cos \psi + \left(a_4 \dot{\psi}^2/q^2 + a_6 \dot{\beta}^2 \right) \sin \psi \right\} = \mu M \delta; \\ B_2 \ddot{\psi}/q + (B_2 + B_3) \ddot{\beta} + \mu \left\{ \left[b_2 \ddot{\psi}/q + (b_2 + b_3) \ddot{\beta} \right] \cos \psi + \right. \\ \left. + \left[a_5 \dot{\psi}^2/q^2 - a_6 \left(\dot{\psi}/q + \dot{\beta} \right)^2 \right] \sin \psi + A_7 \dot{\beta} + A_8 \dot{\beta}^2 \right\} = -\mu P_c r \delta, \end{array} \right.$$

Построено периодическое решение на холостом режиме работы. Исходное дифференциальное уравнение при этом имело вид

$$\beta'' = \frac{1}{B_3} \left(\frac{a_6 - a_5}{q^2} \sin \psi + \frac{2}{q} a_3 \beta' \sin \psi - a_3 \beta'^2 \sin \psi - A_8 \beta'^2 - \frac{A_9}{q^2 \omega^2} - b_3 \beta'' \cos \psi - A_7 \beta'' - \frac{P_0 r}{q^2 \omega^2} \delta \right),$$

где $\tau = q\omega t$, $\psi = \tau + q(\alpha_{01} - \beta)$; $\beta' = d\beta/d\tau$; $\beta'' = d^2\beta/d\tau^2$; α_{01} — начальное значение угла α , $A_3 = J_2 + m_1 r^2 + nmb^2 + ((b/k) - q)^2 nJ_B + 2nmbh((b/k) - q) \cos \psi$;

$$A_7 = \frac{1}{2}(m_n + m_2)r^2 \left(1 + \frac{1}{4p^2} + \frac{1}{p} \cos \beta - \cos 2\beta - \frac{1}{p} \cos 3\beta - \frac{1}{4p^2} \cos 4\beta \right);$$

$$A_8 = -\frac{1}{4}(m_n + m_2)r^2 \left(\frac{1}{p} \sin \beta - 2 \sin 2\beta - \frac{3}{p} \sin 3\beta - \frac{1}{p^2} \sin 4\beta \right);$$

$$A_9 = \frac{1}{2}c^*r^2 \left(\left(2 + \frac{1}{4p} \right) \sin \beta + \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{4p^2} - 1 \right) \sin 2\beta - \frac{3}{4p} \sin 3\beta - \frac{1}{8p^2} \sin 4\beta \right); \delta = \sin \beta + \frac{1}{2p} \sin 2\beta;$$

m_1 и m_2 — условные массы, сосредоточенные на концах шатуна; r — радиус кривошипа; p — отношение длины шатуна к радиусу кривошипа; m_n — масса ползуна; c^* — жесткость пружины; P_0 — предварительное натяжение пружины.

Получено достаточное условие движения ползуна

$$(|P_1| \vee |P_2|) < P = \frac{nmkhq\alpha^2 [1 - b(b/k - q)/k]}{r \cdot \left(\sin \arccos((\sqrt{p^2 + 8} - p)/4) + \sin \left(2 \arccos((\sqrt{p^2 + 8} - p)/4) \right) / 2p \right)}.$$

В пятой главе выделяются предпочтительные схемы инерционных передач по критерию повышенной нагрузочной способности. Рассматриваются вопросы построения внешних характеристик. Разрабатываются методики расчета и проектирования МСХ релейного типа и инерционной передачи с одним выходным МСХ. Предложенные передачи имеют внешние характеристики близкие к идеальным и, вместе с тем, отличаются повышенной надежностью и безотказностью в работе.

Найдем аналитическое выражение для среднего значения момента, действующего на заторможенный реактор в течение положительной части цикла:

$$M_{cp_n} = \frac{n\alpha^2}{\alpha_2 - \alpha_1} \left(\frac{mh \left((b^2/k - k)(\cos \psi_2 - \cos \psi_1) - b(\psi_2' \cos \psi_2 - \psi_1' \cos \psi_1) \right) + J_3 (\psi_2' - \psi_1') (\psi_2' + \psi_1') / 2 - b/k}{\alpha_2 - \alpha_1} \right),$$

в котором $\alpha_1, \psi_1, \psi_1'; \alpha_2, \psi_2, \psi_2'$ — значения переменных α, ψ, ψ' в начале и конце действия положительного импульса.

Для импульсных механизмов негармонического семейства в общем случае $\psi_2' - \psi_1' \neq 0$; $\psi_2' + \psi_1' \neq 2b/k$. Передачи с такими механизмами и при уравновешенных грузовых звеньях осуществляют трансформацию вращающего момента.

Получена зависимость для неравномерности вращения ведущего маховика $\rho = 2nJ_3(\psi_{\max}^{\prime 2} - \psi_{\min}^{\prime 2}) / (\sqrt{J_1 + nJ_3\psi_{\max}^{\prime 2}} + \sqrt{J_1 + nJ_3\psi_{\min}^{\prime 2}})^2$. Неравномерность является ограниченной величиной $\lim_{J_3 \rightarrow +\infty} \rho = 2n(\psi_{\max}^{\prime 2} - \psi_{\min}^{\prime 2}) / (\sqrt{n\psi_{\max}^{\prime 2}} + \sqrt{n\psi_{\min}^{\prime 2}})^2 = \rho_{прео} \in R^+$.

Одной из наиболее перспективных схем инерционных передач с точки зрения повышенной надежности является схема, содержащая лишь один выходной

МСХ, так как она не содержит тяжело нагруженного корпусного МСХ и является схемой общего назначения. Получена внешняя характеристика этой передачи на основе построения устойчивых периодических режимов. Задача построения таких режимов чрезвычайно сложна, так как передача имеет переменную структуру. Цикл ее работы определяется совокупностью участков. Для преодоления существующих трудностей неоценимую помощь оказывают разработанные автором методы аппроксимации кусочно-линейных и обобщенных функций. Построение внешней характеристики инерционной передачи с помощью предложенных методов аппроксимации наглядно демонстрирует явные преимущества новых методов по сравнению с традиционными методами исследований. Графики некоторых из полученных периодических решений при различных значениях момента сопротивления M_C изображены на рис. 22.

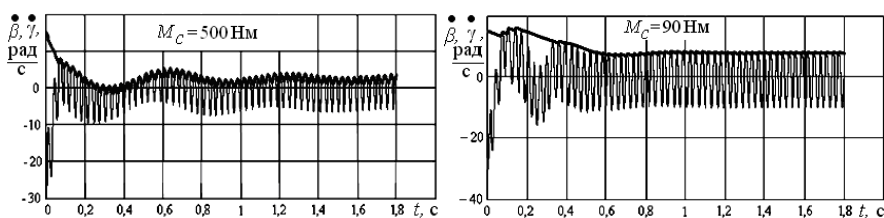


Рис. 22. Зависимости углов поворота реактора и ведомого вала от времени

Утолщенные сплошные линии соответствуют зависимости угловой скорости ведомого вала от времени, пунктирные – реактора. Неравномерность вращения ведомого вала увеличивается с возрастанием нагрузки. Этот факт подтверждает ранее сделанный вывод о целесообразности применения инерционных передач для технологических операций, в которых вибрационная подача момента на рабочий орган способствует интенсификации выполняемых процессов.

По результатам полученных периодических решений построим внешнюю характеристику $M_C = f(\dot{\gamma}_{cp})$, где $\dot{\gamma}_{cp}$ – средняя угловая скорость ведомого вала, соответствующая установившемуся периодическому движению. График внешней характеристики изображен на рис. 23а. Точки на графике соответствуют построенным периодическим решениям. Внешняя характеристика практически отвечает идеальной, что еще раз подчеркивает перспективность применения инерционных передач в машинах и механизмах самого различного назначения.

Для инерционных передач без МСХ трансформация момента происходит на реакторе импульсного механизма. Поэтому за силовое передаточное число естественно принять величину, характеризующую соотношение моментов на ведущем и ведомом (реакторе) валах импульсного механизма. Основная предпосылка заключается в том, что импульсы момента обоих знаков расходятся на совершение полезной работы.

Работа на входе определится из выражений: $dA_{\text{вх}} = M_{\text{д}} d\alpha$; $A_{\text{вх}} = \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} M_{\text{д}} d\alpha$, где $\alpha 1, \alpha 2$ – значения угла поворота α в начале и конце цикла. В силу аналитичности функции $M_{\text{д}}$, используя теорему о среднем значении, получим $A_{\text{вх}} = M_{\text{дср}}(\alpha 2 - \alpha 1) = M_{\text{дср}} \alpha_{\text{ц}}$, где $M_{\text{дср}}, \alpha_{\text{ц}}$ – средние значения момента $M_{\text{д}}$ и угла α за цикл установившегося движения. Функция $M_{\text{с}}$ кусочно-непрерывная на множестве $\{\beta\}$, следовательно, интегрируема на этом множестве. Для i -го участка с $\dot{\beta} > 0$ имеем $dA_i = M_{\text{с}i} d\beta$; $A_i = \int_{\beta i 1}^{\beta i 2} M_{\text{с}i} d\beta = M_{\text{с}i \text{ср}}(\beta_{i 2} - \beta_{i 1})$, где $M_{\text{с}i}, M_{\text{с}i \text{ср}}$ – момент сопротивления на реакторе и его среднее значение; $\beta_{i 1}, \beta_{i 2}$ – значения угла β в начале и конце i -го участка. Для участка с $\dot{\beta} < 0$ получим $A_i = \int_{\beta_{j 1}}^{\beta_{j 2}} M_{\text{с}j} d\beta = M_{\text{с}j \text{ср}}(\beta_{j 2} - \beta_{j 1})$. Импульсы различных знаков используются на совершенные полезной работы. Найдем работу на реакторе

$$|A_{\text{рл}}| = \sum_{i=1}^n |A_i| + \sum_{j=1}^m |A_j| = \sum_{i=1}^n |M_{\text{с}i \text{ср}}| |\beta_{i 2} - \beta_{i 1}| + \sum_{j=1}^m |M_{\text{с}j \text{ср}}| |\beta_{j 2} - \beta_{j 1}|. \quad \text{Обозначив}$$

$$\beta_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n (\beta_{i 2} - \beta_{i 1}) + \sum_{j=1}^m (\beta_{j 1} - \beta_{j 2}); M_{\text{ср}}^1 = \left(\sum_{i=1}^n |M_{\text{с}i \text{ср}}| (\beta_{i 2} - \beta_{i 1}) + \sum_{j=1}^m |M_{\text{с}j \text{ср}}| (\beta_{j 1} - \beta_{j 2}) \right) / \beta_{\text{ц}}, \quad \text{получим} \quad |A_{\text{рл}}| = M_{\text{ср}}^1 \beta_{\text{ц}}.$$

Полагая $A_{\text{вх}} = |A_{\text{рл}}|$, найдем силовое передаточное число $i = M_{\text{дср}} / M_{\text{ср}}^1 = \beta_{\text{ц}} / \alpha_{\text{ц}}$.

В случае односторонней силы сопротивления P_1 внешнюю характеристику инерционной передачи (рис. 23б) рациональнее всего представлять зависимостью $\ln P_1 = f(\Delta s)$, где Δs – амплитуда движения ползуна.

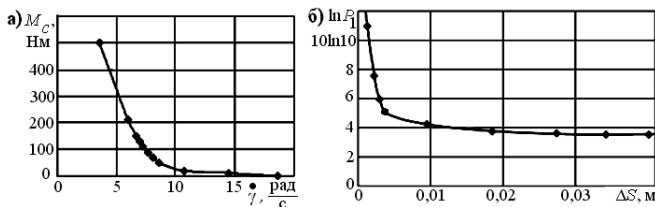


Рис. 23. Внешние характеристики инерционных передач

Разработана методика и приведен пример расчета МСХ релейного типа. В примере показано, что нагрузки на заклинивающие элементы снижены на порядок по сравнению с исходным роликowym МСХ при практически одинаковых габаритах. Разработана методика расчета передачи с одним выходным МСХ.

В шестой главе ставятся основные задачи экспериментальных исследований, описывается стенд (рис. 24, 25) и методика проведения экспериментов.

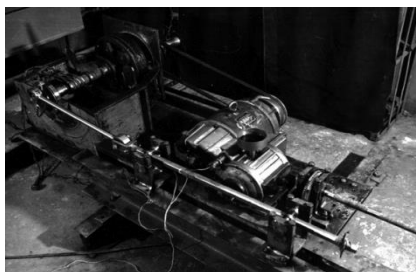


Рис. 24. Фотография экспериментального
стенда



Рис. 25. Фотография импульсного
механизма Левина

Принципиальная схема стенда изображена на рис. 26. Здесь 1 – входной вал импульсного механизма; 2 – эпицикл; 3 – неуравновешенные сателлиты; 4 – солнечная шестерня; 5 – промежуточный вал; 6 – кривошип; 7 – шатун; 8 – зубчатая рейка; 9 – шестерня; 10 – роликовые опоры; 11 – диск; 12 – лампочка; 13 – фотодиод; 14 – триггер; 15 – осциллограф; 16 – тензодатчики; 17 – поводки; 18 – токосъемник; 19 – тензоусилитель; Д – двигатель; Т – порошковый тормоз.

Экспериментальные исследования проводились на различных режимах работы передачи.

Проведенный сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований подтвердил их хорошую сходимость. Так расхождение расчетов среднего значения момента M_c на реакторе импульсного механизма по теоретическим и экспериментальным исследованиям лежит в пределах 15%. На рис. 27 представлены наложенные графики момента M_c на реакторе импульсного механизма, полученные теоретически (утолщенная линия) и экспериментально (тонкая линия). Некоторые из полученных осциллограмм представлены на рис. 28.

На рис. 29 показаны графики перемещения ползуна, полученные экспериментально (слева) и теоретически (справа). Как видим, теоретические и экспериментальные расчеты имеют хорошую сходимость.

В целом, расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превысило 20 %, что свидетельствует о правильности сделанных теоретических положений и полученных результатов.

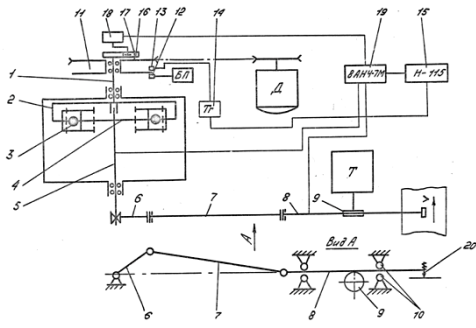


Рис. 26. Принципиальная схема стенда импульсного механизма

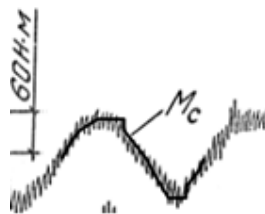


Рис. 27. Графики момента на реакторе

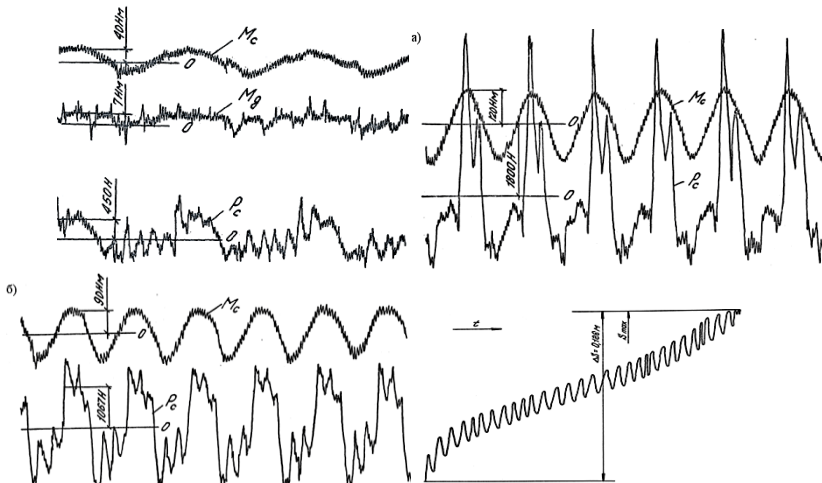


Рис. 28. Осциллограммы экспериментальных исследований

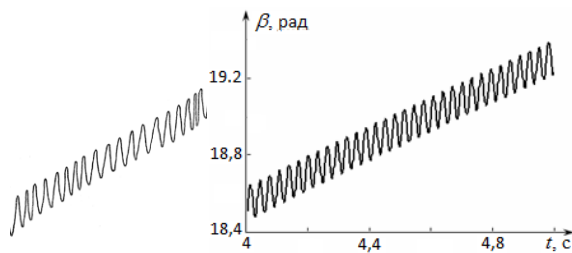


Рис. 29. Графики перемещения ползуна

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведен анализ существующих конструкций инерционных передач с выявлением их слабых и сильных сторон и возможностей повышения нагрузочной способности. Проведена оценка перспективных областей применения инерционных передач с учетом вибрационного характера подачи крутящего момента на выходной вал и рабочий орган. Изучен опыт создания ошибочных конструкций передач без слабых узлов – МСХ. На основе проведенного анализа и опыта эксплуатации инерционных передач намечены пути возможного повышения их нагрузочной способности: 1) создание конструкций МСХ повышенной нагрузочной способности; 2) разработка конструкций инерционных передач с одним выходным МСХ; 3) разработка конструкций инерционных передач без МСХ; 4) совершенствование математических моделей и методов исследований инерционных передач. Все эти направления реализованы в данной диссертации. Выявлены перспективные схемы инерционных передач, а именно: передачи с одним выходным МСХ и без МСХ.

2. Разработано новое семейство механизмов переменной структуры – инерционных бесступенчатых передач повышенной нагрузочной способности, которая включает инерционные передачи с одним выходным МСХ, обеспечивающие режим прямой передачи, инерционные передачи без МСХ с упругой и без упругой связи, инерционные передачи без МСХ с шарнирно-рычажными механизмами, инерционные передачи на основе МСХ релейного типа. Снижение числа слабых узлов (МСХ) в конструкции инерционных передач и использование энергии обратного импульса приводит к снижению напряжений (в $\pi/2$ раз) в звеньях и повышению нагрузочной способности передач. Показано, что в некоторых случаях можно обеспечить постоянную величину крутящего момента на ведомом валу, при этом резко (в π раз) снизить максимальные нагрузки в передаче при фиксированной величине среднего момента. Показаны возможности осуществления режима работы при одностороннем вращении ведомого вала с наложенными высокочастотными знакопеременными колебаниями и при одностороннем сопротивлении на рабочем органе. Выявлены перспективы применения инерционных передач без МСХ с реверсивным режущим инструментом. Предложены схемы МСХ релейного типа. Доказано, что в таких механизмах нагрузки на наиболее слабые звенья (заклинивающие элементы) могут быть снижены на порядок и более.

3. Созданы основы теории разработанного семейства механизмов, включающей: разработанные методы математического моделирования, анализа и исследования механизмов переменной структуры путем преобразования динамических систем переменной структуры к динамическим системам постоянной структуры; разработанные специальные функции и новые методы аппроксимации ступенчатых, кусочно-линейных и обобщенных функций. Основываясь на доказанных автором теоремах, рассмотрены вопросы погрешности и сходимости разработанных методов, выявлена их быстрая сходимость. Предложенные методы позволили совершенствовать математические модели инерционных передач и записать эти модели не в виде совокупности систем дифференциальных уравнений по участкам,

как это делалось ранее, а в виде только одной системы за весь цикл движения, что значительно упростило исследование режимов движения инерционных передач, построение периодических решений и исследование их устойчивости. Разработанные методы являются универсальными и их возможные области применения выходят далеко за рамки инерционных передач, вплоть до вопросов квантовой механики и атомной науки и техники. Проведен анализ динамических процессов в инерционных передачах, найдены аналитические и численные решения систем существенно нелинейных дифференциальных уравнений движения инерционных передач. Аналитические решения получены различными методами: малого параметра, последовательных приближений и разложения в степенные ряды. Сравнительный анализ показал преимущество метода малого параметра. Изучены нелинейные колебания инерционных передач. Построены периодические решения дифференциальных уравнений на холостом и рабочем режимах работы с анализом их устойчивости. Выявлено большое многообразие возможных видов периодических и квазипериодических решений. Исследованы резонансные режимы работы инерционных передач. Разработаны методики инженерного расчета МСХ релейного типа и инерционных передач повышенной нагрузочной способности, построены их внешние характеристики. Показано, что внешние характеристики близки к идеальной. Даны рекомендации по выбору параметров инерционных передач повышенной нагрузочной способности.

4. Проведены экспериментальные исследования инерционных передач, подтвердившие правильность результатов теоретических исследований. Рассматривались основные режимы: 1) динамической муфты; 2) трансформации момента, при котором ползун совершает возвратно-поступательное движение от одной мертвой точки до другой с наложенными высокочастотными колебаниями; 3) трансформации момента, определяемый одним оборотом грузовых неуравновешенных звеньев; 4) заторможенного ползуна; 5) периодические режимы, определяемые несколькими оборотами неуравновешенных грузовых звеньев. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических положений и выводов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ:

Монографии

1. **Алюков, С.В.** Динамика инерционных бесступенчатых автоматических передач / С.В. Алюков. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 251 с.

2. **Алюков, С.В.** Физические и математические модели инерционных бесступенчатых передач / С.В. Алюков. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG., ISBN: 978-3-659-34124-3, 2013. – 236 с.

3. **Алюков С.В.** Аппроксимации кусочно-линейных и обобщенных функций / С.В. Алюков. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG., ISBN: 978-3-8484-9048-6, 2012. – 120 с.

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

4. **Алюков, С.В.** Инерционная автоматическая бесступенчатая передача повышенной надежности / С.В. Алюков // Автомобильная промышленность. – 2013. – №1. – С.5 – 9.

5. **Алюков, С.В.** Аппроксимация обобщенных функций и их производных / С.В. Алюков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – Саров: Российский федеральный ядерный центр - ВНИИЭФ, 2013. – Вып. 12. – С. 57 – 62.

6. **Алюков, С.В.** Нелинейные колебания инерционных бесступенчатых передач без механизмов свободного хода / С.В. Алюков // Известия вузов. Серия: Машиностроение, 2012. – №3. – С. 35 – 42.

7. **Алюков, С.В.** Динамика инерционно-импульсных передач без механизмов свободного хода в приводе строительных и дорожных машин / С.В. Алюков // Строительные и дорожные машины. – 2012. – № 2. – С. 37 – 41.

8. **Алюков, С.В.** Моделирование динамических процессов с кусочно-линейными характеристиками / С.В. Алюков // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2011. – Том 19. – № 5. – С. 27 – 34.

9. **Alyukov, S.V.** Approximation of step functions in problems of mathematical modeling / S.V. Alyukov // Mathematical models and computer simulations. – USA: Springer, 2011. – Vol. 3. – № 5. – P. 661 – 669.

10. **Алюков, С.В.** Аппроксимация ступенчатых функций в задачах математического моделирования / С.В. Алюков // Математическое моделирование, журнал РАН, 2011. – Т. 23. – № 3. – С.75–88.

11. **Алюков, С.В.** Механизмы свободного хода релейного типа / С.В. Алюков // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 12. – С. 34 – 37.

12. **Алюков, С.В.** Совершенствование математических моделей инерционных трансформаторов вращающего момента / С.В. Алюков // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 3-10.

13. **Alyukov, S.V.** Improved Models of Inertial Torque Transformers / S.V. Alyukov // Russian Engineering Research. – NY: Allerton Press, Inc., 2010. – Vol. 30. – №. 6. – P. 535 – 542.

14. Об аналитическом представлении упруго-диссипативных характеристик подвески автомобиля / А.Ф. Дубровский, О.А. Дубровская, С.А. Дубровский, **С.В. Алюков** // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2010. – № 16. – С. 23 – 26.

15. **Алюков, С.В.** Сравнительный анализ приближенных методов решения дифференциальных уравнений движения инерционно-импульсных передач / С.В. Алюков // Вестник машиностроения. – 2010. – № 7. – С.3 – 10.

16. **Alyukov, S.V.** Approximate Solution of the Differential Equations of Motion of Inertia-Pulsed Transmissions / S.V. Alyukov // Russian Engineering Research. – NY: Allerton Press Inc., 2010. – Vol. 30. – № 7. – P. 655 – 661.

17. **Алюков, С.В.** Внешняя характеристика инерционной бесступенчатой передачи повышенной нагрузочной способности / С.В. Алюков // Вестник машиностроения. – 2014. – Статья принята в печать.

18. **Алюков С.В.** Методика расчета механизма свободного хода релейного типа / С.В. Алюков // Вестник машиностроения. – 2014. – Статья принята в печать.

19. **Алюков С.В.** Механизм свободного хода релейного типа / С.В. Алюков // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 40 – 46.

Патенты и свидетельства РФ на изобретения и полезные модели

20. Патент № 118710 РФ, МПК F 16 Н 33/14. Бесступенчатая механическая импульсная передача / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Патенты и полезные модели». – М., 2012. – № 21.

21. Патент № 117395 РФ, МПК В 62 М 9/08, F 16 Н 55/30, F 16 Н 55/54. Цепная передача (варианты) / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Патенты и полезные модели». – М., 2012. – № 18.

22. Патент № 57440 РФ, МПК F 41 А 3/00, F 16 D 41/00. Механизм свободного хода рейлейного типа / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Патенты и полезные модели». – М., 2006. – № 28.

23. А.с. 1527423 СССР, МКИ F 16 D 13/02, 11/04. Выключаемая муфта / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Изобретения». – М., 1989. – № 45.

24. А.с. 1506176 СССР, МПК F 04 D 27/00. Лопастная машина / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Изобретения». – М., 1989. – № 33.

25. А.с. 1754965 СССР, МПК F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Изобретения». – М., 1992. – № 30.

26. А.с. 1629609 СССР, МПК F 04 С 2/04. Регулируемый шестеренный насос / **С.В. Алюков**, В.А. Яковлев. – опубл. в бюл. «Изобретения». – М., 1991. – № 7.

27. А.с. 1809171 СССР, МПК F 04 D 27/00. Лопастная машина / **С.В. Алюков**, А.Г. Харченко, В.А. Яковлев. – опубл. в бюл. «Изобретения». – М., 1993. – № 14.

28. А.с. 887846 СССР, МПК F 16 Н 33/14. Инерционный трансформатор вращающего момента / **С.В. Алюков**. – опубл. в бюл. «Изобретения». – М., 1981. – № 45.

В материалах конференций, симпозиумов, других научных журналах изданиях

29. **Alyukov, S.V.** Dynamics of an Inertial Continuously Variable Transmission with High Load Ability / **S.V. Alyukov, S.P. Gladyshev** // 2013 SAE International Commercial Vehicle Engineering Congress. – Rosemont, USA, 2013.

30. **Алюков, С.В.** Исследование вращающего момента на заторможенном валу импульсного механизма инерционной передачи / **С.В. Алюков** // IX Международная науч.-практич. конфер. «Ключевые аспекты научной деятельности». – Przemysł, Poland: Nauka i studia, 2013. – Том 16. – С. 12 – 18.

31. **Алюков, С.В.** Построение периодического решения для инерционной передачи в случае двусторонней силы сопротивления / **С.В. Алюков** // IX Международная науч.-практич. конфер. «Актуальные научные разработки». – София, Болгария: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – Том 28. – С. 63 – 71.

32. **Алюков, С.В.** Экспериментальные исследования динамики инерционных бесступенчатых передач / **С.В. Алюков** // IX Международная науч.-практич. конфер. «Наука и образование». – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., – 2013. – Том 35. – С. 13 – 23.

33. **Alyukov, S.V.** New methods of approximation of piecewise linear functions / **S.V. Alyukov** // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Стратегические вопросы мировой науки». – Przemysl, Poland, 2012. – Vol. 29. – С. 42 – 47.

34. **Alyukov, S.V.** Comparative analysis of approximate methods of solving of differential equations for continuously variable transmissions / **S.V. Alyukov** // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Научный прогресс на рубеже тысячелетий». – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., – 2012. – Том 28. – С. 30 – 38.

35. **Алюков, С.В.** Динамика инерционной бесступенчатой передачи с одним выходным механизмом свободного хода / **С.В. Алюков** // VIII Международной науч.-практич. конфер. «Научный прогресс на рубеже тысячелетий». – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., – 2012. – Том 28. – С. 47 – 54.

36. **Алюков, С.В.** Перспективные направления создания инерционных бесступенчатых передач повышенной надежности / **С.В. Алюков** // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Ключевые проблемы современной науки». – Болгария, София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – Том 31. – С. 71 – 75.

37. **Алюков, С.В.** Динамика механизма свободного хода релейного типа / С.В. Алюков // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Научное пространство Европы». – Przemysł, Poland: Nauka i studia, 2012. – Том 37. – С. 65 – 69.

38. **Алюков, С.В.** Методы аппроксимации обобщенных функций и их производных / С.В. Алюков // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Новейшие научные достижения». – София, Болгария: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – Том 31. – С. 54 – 60.

39. **Алюков, С.В.** Кинематические схемы инерционных бесступенчатых передач / С.В. Алюков // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Актуальные научные разработки». – София, Болгария: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – Том 20. – С. 12 – 16.

40. **Алюков, С.В.** Физические модели инерционных бесступенчатых передач повышенной нагрузочной способности / С.В.Алюков // VIII Международная науч.-практич. конфер. «Актуальные достижения европейской науки». – София, Болгария: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – Том 19. – С. 29 – 40.

41. **Алюков, С.В.** Построение периодического решения для инерционной передачи с рычажным механизмом / С.В. Алюков // VIII Международной науч.-практич. конфер. «Перспективные вопросы мировой науки». – София, Болгария: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. – Том 39. – С. 47 – 57.

42. **Алюков, С.В.** Нелинейные колебания инерционно-импульсных передач без механизмов свободного хода / С.В. Алюков // VII Международная науч.-практич. конфер. «Перспективные разработки науки и техники». Технические науки. – Przemysł, Poland: Nauka i studia, 2011. – Том 54. – С. 58 – 63.

43. **Алюков, С.В.** Фрикционные бесступенчатые передачи на основе принципа регулируемого скольжения / С.В. Алюков // Бесступенчатые передачи, приводы машин и промышленное оборудование: сб. тез. докл. I Международной науч.- техн. конфер. –Калининград, КГТУ, 1997. – С. 9.

44. **Алюков, С.В.** Семейство механизмов и машин с фрикционным бесступенчатым приводом на основе принципа регулируемого скольжения / С.В. Алюков // IV Международная научно-техническая конференция по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам: сб. тез. докл. – Владимир, ВПИ, 1992. – С. 13 - 14.

45. **Алюков, С.В.** Нелинейные колебания инерционной передачи с кривошипно-ползунным преобразующим механизмом / С.В. Алюков // VII Всесоюзная науч.-техн. конфер. по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью: сб. тез. докл. – Одесса, 1986. – С. 73 – 74.

46. **Алюков, С.В.** О периодических решениях дифференциальных уравнений движения инерционной передачи с кривошипно-ползунным преобразующим механизмом / С.В. Алюков // VII Всесоюзная науч.-техн. конфер. по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью: сб. тез. докл. – Одесса, 1986. – С. 79 – 80.

47. **Алюков, С.В.** Периодические движения инерционного трансформатора без механизмов свободного хода / С.В. Алюков // III Всесоюзная науч. конфер. по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам: сб. тез. докл. – Челябинск, 1982. – С. 81 – 82.

48. **Алюков, С.В.** Исследование динамики инерционного трансформатора с плоским рычажным механизмом / С.В. Алюков // III Всесоюзная науч. конфер. по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам: сб. тез. докл. – Челябинск, 1982. – С. 80 – 81.

49. **Алюков, С.В.** К динамике одной схемы инерционного трансформатора без механизмов свободного хода / С.В. Алюков, В.П. Виноградов, А.Я. Есипов // Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств. – Челябинск: ЧПИ им. Ленинского комсомола, 1981. – № 261. – С. 75 – 82.

50. **Алюков, С.В.** Исследование среднего момента на заторможенном реакторе импульсного механизма / С.В. Алюков // Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств. – Челябинск: ЧПИ им. Ленинского комсомола, 1981. – № 261. – С. 115 – 117.

51. **Алюков, С.В.** Нелинейные колебания инерционного трансформатора с кривошипно-ползунным механизмом на выходе / С.В. Алюков // Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств. – Челябинск: ЧПИ им. Ленинского комсомола, 1981. – № 261. – С. 67 – 75.

52. **Алюков, С.В.** Формирование инерционного момента на заторможенном реакторе импульсного механизма / С.В. Алюков // VI Всесоюзная науч.-техн. конфер. по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью: сб. тез. докл. – Одесса, 1980. – С. 75.

53. **Алюков, С.В.** К динамике инерционного трансформатора без механизмов свободного хода / С.В. Алюков // VI Всесоюзная науч.-техн. конфер. по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью: сб. тез. докл. – Одесса, 1980. – С. 127 – 128.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 01.09.2013. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл.-печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 56/249.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ

454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76