

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ
им. М.Т. УРАЗБАЕВА**

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
им. М. Улугбека**

*На правах рукописи
УДК 531.31+62-50*

ТЕШАЕВ МУХСИН ХУДОЙБЕРДИЕВИЧ

**ДИНАМИКИ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С СЕРВОСВЯЗЯМИ**

01.02.01- Теоретическая механика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Ташкент – 2011

Работа выполнена в Бухарском технологическом институте пищевой и легкой промышленности и в Национальном университете Узбекистана им. М. Улугбека

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук,
профессор
- доктор физико-математических наук,
профессор
- доктор физико-математических наук,
профессор

Ведущая организация: Московский авиационный институт

Защита диссертации состоится «____» _____ 2011 года в _____ часов на заседании специализированного ученого совета К.025.01.02 по присуждению ученой степени доктора физико-математических наук при Институте механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз и Национальном университете Узбекистана по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 31. Тел: (99871) 262-71-32, 262-71-42, e-mail: instmech@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз.

Автореферат разослан «____» _____ 2011 г.

Отзыв просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря Специализированного совета.

**Ученый секретарь объединенного
специализированного совета
кандидат технических наук**

доц. Х.С. Сагдиев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена разработке метода реализации сервосвязей электромеханическими силами и приложениям полученных результатов к исследованию машинного агрегата намоточных машин, однороторного корректируемого гироскопа, а также виброзащитным системам.

Одним из важных объектов динамики управляемого движения является система твердых тел. Во многих таких системах управление движением осуществляется путем наложения сервосвязей. К таким системам относятся, например, управляемые гироскопические системы, рассмотревшим ещё А. Бегеном, и отмечавшим, что применение общих теорем механики, в частности теоремы об изменении момента количества движения, в более точных исследованиях приводит к трудностям «...практического порядка, не возникающим при применении уравнений Лагранжа или уравнений Аппеля».

Несмотря на проведённые исследования, в динамике систем с сервосвязями в настоящее время имеется ряд мало изученных вопросов, представляющих как теоретический, так и практический интерес. К ним можно отнести вопрос о разработке метода реализации сервосвязей электромеханическими силами.

Требования стабилизации движения системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями, выдвигает необходимость определения явного вида сил реакций сервосвязей. А при исследовании вопросов реализации сервосвязей возникает необходимость составления полной системы уравнений следящей системы, позволяющая определить законы формирования управляющих воздействий. Кроме того, представляет интерес приложение этого метода реализации к некоторым системам.

Степень изученности проблемы. Условия, при которых уравнения Лагранжа и Аппеля применимы, в системах с сервосвязями, вообще говоря, не выполняются. Это приводит к необходимости разработки специальных методов аналитической механики, позволяющих сохранить применимость уравнений Лагранжа и Аппеля. Такие методы были разработаны А. Бегеном и получили развитие в работах П.Аппеля, А.Пщеворского, М.Ф.Шульгина, В.В.Румянцева, Г.К.Пожарицкого, В.И.Киргетова, До Шаня, А.Г.Азизова и других. В этих исследованиях было уделено внимание на особенности составления уравнений движения исходя из общих принципов механики, причем, длительное время для сервосвязей принималась модель неосвобождающих неидеальных связей

В последние годы теория систем с сервосвязями стала разрабатываться с учетом освобождаемости и необходимости устойчивой реализации соотношений сервосвязей. Эти вопросы нашли отражение в ряде работ А.Г.Азизова, основанных на теории параметрического освобождения Н.Г.Четаева. Был предложен важный для приложений конструктивный метод отыскания структуры сил реакций сервосвязей, обеспечивающий

стабилизацию движения системы относительно многообразия, определяемого сервосвязями. Эти исследования примыкают к исследованиям А.С.Галиуллина и его последователей по построению систем программного движения.

Еще А.Беген отмечал, что сервосвязи осуществляются не при помощи простого контакта, не пассивно, их реализация связана с использованием разных сил (электромагнитных, давления сжатого воздуха и т.д.). Вопросы реализации сервосвязей рассматривались в работах Я.Н.Ройтенберга, Я.Л.Лунца, В.В.Козлова, А.Г.Азизова, А.Акмухаммедова, Р.М.Зиятдинова и других. Однако, несмотря на проведенные исследования, в динамике систем с сервосвязями в настоящее время имеется ряд мало изученных вопросов, представляющих как теоретический, так и практический интерес. К ним можно отнести вопрос о разработке метода реализации сервосвязей электромеханическими силами.

Требования стабилизации движения системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями, выдвигает необходимость определения явного вида сил реакций сервосвязей. А при исследовании вопросов реализации сервосвязей возникает необходимость составления полной системы уравнений следящей системы, позволяющая определить законы формирования управляющих воздействий. Кроме того, представляет интерес приложение этого метода реализации к некоторым системам.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Тема диссертационной работы связана с планом НИР кафедры теоретической и прикладной механики Национального Университета Узбекистана «Вопросы управления, оптимизации и интегрирования уравнений в механике».

Цель исследования. Исследовании связанных механических систем с сервосвязями, разработка метода реализации сервосвязей электромеханическими силами, приложение полученных результатов к исследованию некоторых управляемых систем.

Задачи исследования:

- исследование стабилизации движения систем, стесненных геометрическими связями первого и второго родов, по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями;

- исследование стабилизации движения систем, стесненных геометрическими и кинематическими связями первого и второго родов по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями;

- исследование вопросов реализации сервосвязей в случае, часть координат механической системы недоступна непосредственному измерению;

- исследование вопросов реализации сервосвязей электромеханическими силами путем построения электромеханической следящей системы;

- исследование вопросов стабилизации движений корректируемого гироскопа в её прецессионном и нутационном движениях;

- разработка теории принципиально нового корректируемого гироскопа;

- приложение полученных результатов к машинным агрегатам, предназначенным для перематывания ленты;
- приложение полученных результатов к виброзащитным системам для защиты объектов в резонансной зоне.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются голономные и неголономные механические системы, стесненные геометрическими и кинематическими связями первого и второго рода, в том числе однороторный корректируемый гироскоп и машинный агрегат для перематывания ленты, стесненные сервосвязями, а также виброзащитные системы.

Предметом исследования являются: составление и проведение анализа дифференциальных уравнений движения систем, стесненных связями первого и второго рода; нахождение явного вида сил реакций сервосвязей; исследование устойчивости систем, стесненных связями первого и второго родов, по отношению к многообразиям, определяемым сервосвязями.

Методы исследований. Исследования основываются на методах аналитической механики, в частности это метод (А)- перемещений; теория параметрического освобождения; теория вынужденных движений; конструктивный метод отыскания структуры сил реакций сервосвязей; методах теории дифференциальных уравнений, методах теории устойчивости и стабилизации движений; на методах механики управляемого движения; используются теории, разработанные А.Бегеном и А.Г.Азизовым для систем с условными связями (сервосвязями).

Основные положения, выносимые на защиту:

- явный вид уравнений движения механических систем, стесненных геометрическими связями первого и второго рода;
- явный вид сил реакций сервосвязей систем, стесненных геометрическими связями первого и второго рода;
- область применения уравнений Гапонова для коллекторных электрических машин;
- цифровая следящая система (ЦСС) для реализации сервосвязей электромеханическими силами;
- метод реализации геометрических сервосвязей электромеханическими силами;
- явный вид уравнений движения механических систем, стесненных геометрическими и кинематическими связями первого и второго рода;
- явный вид сил реакций сервосвязей систем, стесненных геометрическими и кинематическими связями первого и второго рода;
- метод реализации кинематических сервосвязей электромеханическими силами;
- явный вид силы реакции сервосвязи машинного агрегата, предназначенного для перематывания ленты с постоянной скоростью и её реализация построением цифровой следящей системы (ЦСС);
- метод реализации сервосвязей электромеханическими силами в случае, когда часть координат не доступно непосредственному измерению;

- распространение метода реализации сервосвязей в случае когда часть координат не доступно непосредственному измерению на корректируемый гироскоп в её прецессионном, а также нутационном движениях;

- полная система уравнений ЦСС и явный вид управляющих воздействий в случаях, когда в качестве исполнительного элемента ЦСС принимаются различные электрические машины постоянного тока (двигатели с параллельным возбуждением, с последовательным возбуждением, со смешанным возбуждением), а также переменного тока (асинхронные двигатели);

- конечно-разностные уравнения для определения закона формирования управляющих воздействий, которые обеспечивают устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями;

- распространение методов аналитической динамики систем с сервосвязями к виброзащитным системам;

- обобщение алгоритма (метода) отыскания структуры сил реакций сервосвязей;

- разработанный метод реализации сервосвязей электромеханическими силами.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- для исследования динамики механических систем, стесненных сервосвязями впервые применены положения теории электромеханических систем, а также к решению данных задач привлечены вычислительные средства;

- с учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей получен явный вид уравнений движения и явный вид сил реакций сервосвязей механических систем, стесненных геометрическими связями;

- с учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей получен явный вид уравнений движения и явный вид сил реакций сервосвязей механических систем, стесненных геометрическими и кинематическими связями первого и второго рода;

- предложена электромеханическая цифровая следящая система (ЦСС), обеспечивающая устойчивую реализацию соотношений сервосвязей путем изменения напряжения, подаваемого на обмотку якоря электрической машины постоянного и переменного тока (исполнительного элемента ЦСС);

- предложен новый метод с активной изоляцией объекта от вибраций;

- предложена электромеханическая цифровая следящая система (ЦСС), обеспечивающая устойчивую реализацию соотношений сервосвязей, наложенных на корректируемый гироскоп (в её прецессионном и нутационном движениях);

- предложена электромеханическая цифровая следящая система (ЦСС), обеспечивающая постоянство линейной скорости ленты намоточных машин;

- разработан метод реализации сервосвязей электромеханическими силами.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Сделан важный шаг для решения проблемы построения аналитической динамики систем с сервосвязями. Предлагаемый в диссертации метод позволяет расширить класс задач, содержащих механические системы с неидеальными связями (связи с трением, условные связи), для которых возможно получить дифференциальные уравнения движения, определить силы связей и закон трения системы; определить силовое воздействие, реализующее условную связь.

Реализация результатов исследования.

Результаты данной работы могут быть использованы при исследовании конкретных механических систем, содержащих сервосвязи, в частности при конструировании и использовании различных видов управляемых машинных агрегатов, применяемых в текстильной промышленности, при конструировании и использовании различных видов управляемых гироскопических компасов, а также управляемых амортизаторов, применяемых в авиационной и космической промышленности и в других отраслях.

Результаты данной работы могут быть использованы в учебном процессе при чтении специальных курсов по аналитической механике и механике управляемого движения, в рамках бакалавриата и магистратуры по направлению «Теоретическая механика» в Национальном Университете Узбекистана, а также при написании курсовых, выпускных и диссертационных работ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на межкафедральном научном семинаре «Динамические системы и механика» факультета «Прикладная математика и физика» Московского авиационного института (государственного технического университета); научной конференции «Механика и применения» (Ташкент, 1993 г.); Республиканской научной конференции, посвященной 90 летию Академика М.Т. Уразбаева. (Ташкент, 1996); международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики» (Ташкент, 2006 г.); ежегодных научно-теоретических конференциях Бухарского технологического института пищевой и легкой промышленности (Бухара, 1994-2010 гг.); научном семинаре кафедры «Теоретическая и прикладная механика» УзНУ (Ташкент, 2008); 5-ой международной научной конференции «Авиация и космонавтика-2006» (Москва, 2006); Республиканской научно-технической конференции «Машиностроение и авиационная механика» (Ташкент, 2004); Международной научной конференции «Инновация-2006» (Ташкент, 2006); Международной конференции посвященной 70 летию Академика Т.Ш. Ширинкулова, (Самарканд, 2007);

международной научной конференции кафедр

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 20 журнальные статьи, 15 тезисов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка литературы из 150 наименований. Она изложена на 234 страницах компьютерного текста, содержит 9 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, определены основные положения, выносимые на защиту, и даётся её краткая характеристика.

В первой главе работы рассматривается проблема стабилизации движений механических систем, стесненных геометрическими сервосвязями. На основе метода отыскания структуры сил реакций сервосвязей, получен явный вид уравнений движения таких систем и явный вид сил реакций сервосвязей. Предложена построить электромеханическую следящую систему, исполнительным элементом которой выбрана электрическая машина постоянного тока независимого возбуждения. Решены конкретные задачи.

В параграфе 1.1. рассматривается механическая система, положение которой определяется обобщенными координатами $q_1, \dots, q_n$, и стесненная геометрическими сервосвязями вида:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{\alpha}(t, q_1, \dots, q_n) = 0, \quad (\alpha=1, \dots, a) \quad (1)$$

Имея ввиду параметрическое освобождение системы от сервосвязей, введем дополнительные независимые величины η_p , соответствующие преобразованию системы с сервосвязями (1) к виду:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{\alpha}^*(t, q_1, \dots, q_n, \eta_1, \dots, \eta_a) = 0, \quad (\alpha=1, \dots, a) \quad (2)$$

где $\eta_1, \dots, \eta_a$ - параметры, характеризующие освобождение системы от сервосвязей (1). Методом (А)-перемещений составлены уравнения движения, и используя метод отыскания структуры сил реакций сервосвязей определена их структура, обеспечивающая стабилизацию движения системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями. Введением новых обобщенных координат получена явная форма уравнений движения:

$$1) \quad \sum_{p=1}^a A_{ap} \eta_p + \sum_{s=1}^{n-a} A_{\alpha, a+s} q_{a+s} + \sum_{p=1}^a \sum_{\alpha_1=1}^a [p, \alpha_1, \alpha] h_p \eta_{\alpha_1} +$$

$$+ \sum_{p=1}^a \sum_{s=1}^{n-a} [p, a+s, \alpha] h_p q_{a+s} + \sum_{s=1}^{n-a} \sum_{s_1=1}^{n-a} [a+s, a+s_1, \alpha] \cdot q_{a+s} q_{a+s_1} = Q_\alpha + R_\alpha^{(2)},$$

$$(\alpha = 1, \dots, a)$$

$$2) \sum_{\alpha=1}^a A_{\alpha, a+s} \ddot{\eta}_\alpha + \sum_{s_1=1}^{n-a} A_{a+s, a+s_1} \ddot{q}_{a+s_1} + \sum_{s_1=1}^{n-a} \sum_{s_2=1}^{n-a} [a+s_1, a+s_2, a+s] \dot{q}_{a+s_1} \dot{q}_{a+s_2} +$$

$$+ \sum_{p=1}^a \sum_{\alpha=1}^a [\alpha, p, a+s] h_p \eta_\alpha + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{s_1=1}^{n-a} [\alpha, a+s_1, a+s] \cdot q_{a+s_1} \eta_\alpha = Q_{\alpha+s} + R_{\alpha+s}^{(2)},$$

$$(s = 1, \dots, n-a) \quad (3)$$

где $A_{\alpha p}$ - ; $[p, a+s, \alpha]$ - символы Кристоффеля первого рода, Q_{a+s} - обобщенная сила, отнесенная к координате q_{a+s} ; $R_{\alpha+s}^{(2)}$ - обобщенная сила реакции servosвязи, и определен явный вид сил реакций servosвязей:

$$R_\alpha^{(2)} = \sum_{s=1}^{n-a} \sum_{s_1=1}^{n-a} [a+s, a+s_1, \alpha]^0 \dot{q}_{a+s} \dot{q}_{a+s_1} - Q_\alpha^0 - \sum_{p=1}^a (K'_{\alpha p} \dot{\eta}_p + K''_{\alpha p} \eta_p), \quad (\alpha=1, \dots, a)$$

$$R_{\alpha+s}^{(2)} = \sum_{s_1=1}^{n-a} \sum_{s_2=1}^{n-a} [a+s_1, a+s_2, \alpha+s]^0 \dot{q}_{a+s_1} \dot{q}_{a+s_2} - Q_{\alpha+s}^0 \quad (s=1, \dots, (n-a)) \quad (4)$$

В параграфе 1.2. рассматривается осуществление программного движения алгоритмом управления по принципу обратной связи. Из дифференциального уравнения отклонения $\delta_j(t) = q_j^0 - q_j$, где q_j^0 и q_j – параметры, характеризующие состояние управляемой системы в начальный и текущий моменты времени соответственно, определен закон формирования управляющих напряжений и методом структурного синтеза построен алгоритм осуществления заданного движения. Найдены условия устойчивости.

В параграфе 1.3. для электрических машин (ЭМ), используемых исполнительными элементами электромеханической системы, рассматривается модель ЭМ постоянного тока с независимым возбуждением, предложенная А.В.Гапоновым. Обычно, при изучении общей теории электромеханических систем уравнения движения ЭМ составляли в форме уравнений Лагранжа-Максвелла, рассматривая при этом ЭМ как голономную электромеханическую систему. Здесь рассматривается ЭМ со скользящими контактами, при вращении якоря которой в системе удовлетворяются неголономные контактные связи. Особенностью и удобством уравнений А.В.Гапонова является то, что уравнения неголономных связей в систему уравнений ЭМ не входят. В данное время в промышленности ЭМ со скользящими контактами используются довольно широко, и в зависимости от характера задачи, требований к качеству переходного процесса, они могут быть использованы и в системах автоматического управления, в частности, исполнительным элементом следящей системы. При рассматривании

обобщенной и упрощенной модели ЭМ со скользящими контактами, определена область использования обобщенной модели и сходство упрощенной модели к уравнениям движения бесколлекторной ЭМ для используемого способа регулирования угловой скорости ЭМ.

В параграфе 1.4. рассматриваются вопросы реализации сервосвязей. Из работ В.В.Румянцева, а также А.Г.Азизова известно, что примером систем, содержащих сервосвязи, являются следующие системы. Поэтому для реализации сервосвязей нами предлагается построить электромеханическую следящую систему, функциональная схема которой приведена на рис.1.1.

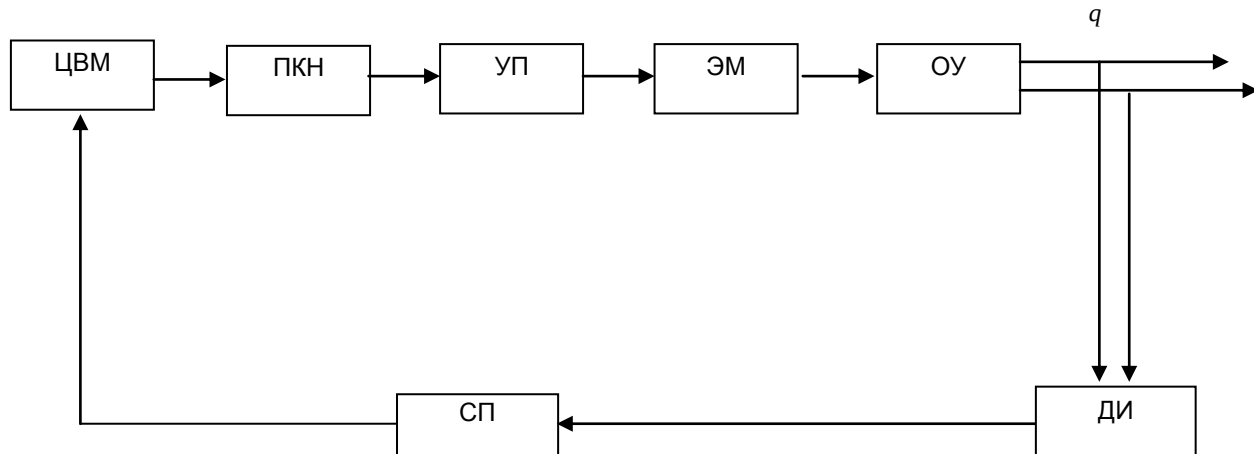


Рис.1.1.

Здесь ЦВМ- цифровая вычислительная машина; ПКН- преобразователь кода в напряжение; УП- усилитель-преобразователь; ЭМ- электрическая машина; ОУ- объект управления; ДИ- датчики измерения; СП- схема преобразования.

1) Особенностью этой схемы является то, что в нее включена ЦВМ (цифровая вычислительная машина). В качестве исполнительного элемента следящей системы используется ЭМ постоянного тока с независимым возбуждением и регулирование угловой скорости ЭМ постоянного тока с независимым возбуждением изменением якорного напряжения.

Для того, чтобы получить желаемое движение, напряжение, подаваемое на вход обмотки якоря ЭМ преобразуется с помощью системы управления, в которую входят датчики измерения ДИ, преобразователи напряжений в коды по схеме преобразования СП, цифровая вычислительная машина (ЦВМ), преобразователи кодов в напряжения (ПКН), усилительно-преобразовательные устройства (УП).

Изменения многообразия допустимых состояний механической системы приводит к изменению параметров других элементов следящей системы, что требует совместного рассмотрения их уравнений движения. Путем добавления к уравнения движения ОУ :

$$\sum_{p=1}^a A_{\alpha p} \ddot{\eta}_p + \sum_{s=1}^{n-a} A_{\alpha, a+s} q_{a+s} + \sum_{p=1}^a \sum_{s=1}^{n-a} [a + s, p, \alpha] \eta_p q_{a+s} +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{s=1}^{n-a} \sum_{s_1=1}^{n-a} [a+s, a+s_1, \alpha] \dot{q}_{a+s} \dot{q}_{a+s_1} + \sum_{\alpha_1=1}^a \sum_{p=1}^a [\alpha_1, p, \alpha] \dot{q}_p \dot{q}_{\alpha_1} = \\
& = Q_\alpha - J_{\gamma_\alpha} \cdot i_\alpha^2 \cdot \dot{\gamma}_\alpha + i_\alpha \cdot \kappa_{m_\alpha} \cdot I_\alpha, \quad (\alpha=1, \dots, a) \\
& \sum_{\alpha=1}^a A_{\alpha+s, \alpha} \ddot{\gamma}_\alpha + \sum_{s_1=1}^{n-a} A_{a+s, a+s_1, \alpha} \ddot{q}_{a+s_1} + \sum_{s_1=1}^{n-a} \sum_{s_2=1}^{n-a} [a+s_1, a+s_2, a+s] \cdot \dot{q}_{a+s_1} \dot{q}_{a+s_2} + \\
& + \sum_{\alpha=1}^{n-a} \sum_{p=1}^{n-a} [\alpha, p, a+s] \dot{q}_\alpha \dot{q}_p + \sum_{\alpha_1=1}^a \sum_{s_1=1}^{n-a} [\alpha, a+s_1, a+s] \dot{q}_\alpha \dot{q}_{a+s_1} = \\
& = Q_{\alpha+s} + i_{a+s} \cdot K_{m_{a+s}} \cdot I_{\alpha+s} - J_{\gamma_{a+s}} \cdot i_{a+s}^2 \cdot \dot{\gamma}_{a+s}, \quad (s=1, \dots, (n-a)) \quad (5)
\end{aligned}$$

где $K_{m_{a+s}}$ - коэффициент вращательного момента; $J_{\gamma_{a+s}}$ - момент инерции якоря; i_{a+s}^2 - коэффициент передачи; $I_{\alpha+s}$ - ток якоря ЭМ;

1) уравнений датчиков измерения (ДИ):

$$T_{j_2}^D \cdot \dot{U}_{j_2}^D + U_{j_2}^D = K_{j_2}^D \bar{Y}_{j_2}, \quad (6)$$

где $\bar{Y}_{j_2} = Y_{j_2}$, $(j_2 = 1, \dots, n)$; $\dot{\bar{Y}}_{j_2} = \dot{Y}_{j_2}$, $(j_2 = 1, \dots, n)$; $U_{j_2}^D$ - выходной параметр; $K_{j_2}^D$ - коэффициент передачи; $T_{j_2}^D$ - время запаздывания.

2) уравнения схемы преобразования (СП):

$$T_{j_2}^{СП} \dot{x}_{j_2}^{СП} + x_{j_2}^{СП} = K_{j_2}^{СП} U_{j_2}^D, \quad (j_2=1, \dots, 2n) \quad (7)$$

где $K_{j_2}^{СП}$ - коэффициент передачи СП; $x_{j_2}^{СП}$ - выходные коды СП;

$T_{j_2}^{СП}$ - время запаздывания.

3) уравнения ЦВМ:

$$T_j^{ЦВМ} \dot{x}_j^{ЦВМ} + x_j^{ЦВМ} = f_j(x_{j_1}^D, \dots, x_n^D, \dots), \quad (j=1, \dots, n) \quad (8)$$

где $x_j^{ЦВМ}$ - выходные параметры ЦВМ; $T_j^{ЦВМ}$ - время запаздывания ЦВМ;

f_j - некоторая функция своих аргументов.

4) уравнения ПКН:

$$T_j^{ПКН} \dot{U}_j^{ПКН} + U_j^{ПКН} = K_j^{ПКН} \cdot x_j^{ЦВМ}, \quad (j=1, \dots, n) \quad (9)$$

где $U_j^{ПКН}$ - выходной параметр ПКН.

5) уравнения усилителя-преобразователя (УП):

$$T_j^{УП} \dot{U}_j^{УП} + U_j^{УП} = K_j^{УП} \cdot U_j^{ПКН}, \quad (j=1, \dots, n) \quad (10)$$

где: $U_j^{УП}$ - напряжение на выходе УП; $T_j^{УП}$, $K_j^{УП}$ - время запаздывания и коэффициент усиления.

К полученной системе уравнений (5)-(10) добавляя уравнения баланса напряжений цепей якорей:

$$L_j \frac{dI_j}{dt} + R_j I_j + K_{wj} \cdot i_j \cdot \dot{Y}_j = U_j^{УП}, \quad (j=1, \dots, n) \quad (11)$$

где L_j , R_j - индуктивное и активное сопротивление якорной цепи; I_j - ток цепи якоря; K_{wj} - коэффициент противо-ЭДС, получим замкнутую систему уравнений (5)-(11). Наряду с обобщенной моделью следящей системы, рассмотрим упрощенную модель, т.е. полагаем, что

$$T_j^{ЦВМ} = T_j^{ПКН} = T_j^{УП} = T_j = 0, \quad (j=1, \dots, n)$$

$$T_{j_2}^D = T_{j_2}^{CП} = 0, \quad (j_2=1, \dots, 2n) \quad (12)$$

Если на ЦВМ, входящий в состав следящей системы, дадим команду формировать управляющие коды по закону:

$$x_{\alpha}^{ЦВМ} = \frac{R_{\alpha}}{i_{\alpha} \cdot K_{\alpha}^{УП} \cdot K_{\alpha}^{ПКН} \cdot K_{m_{\alpha}}} \left\{ \sum_{s_1=1}^{n-a} \sum_{s=1}^{n-a} [a + s_1, a + s, \alpha]^0 \cdot \dot{q}_{a+s} \dot{q}_{a+s_1} - \right. \\ \left. - Q_{\alpha} + J_{\alpha} \cdot i_{\alpha}^2 \ddot{Y}_{\alpha} - \sum_{p=1}^a (K'_{\alpha p} \dot{\eta}_p + K''_{\alpha p} \eta_p) \right\} + \frac{K_{w\alpha} \cdot i_{\alpha} \cdot \dot{Y}_{\alpha}}{K_{\alpha}^{УП} \cdot K_{\alpha}^{ПКН}}, \quad (\alpha=1, \dots, a)$$

$$x_{a+s}^{ЦВМ} = \frac{R_{a+s}}{i_{a+s} \cdot K_{a+s}^{УП} \cdot K_{a+s}^{ПКН} \cdot K_{m_{a+s}}} \left\{ \sum_{s_1=1}^{n-a} \sum_{s_2=1}^{n-a} [a + s_1, a + s_2, \alpha + s]^0 \cdot \dot{q}_{a+s_1} \dot{q}_{a+s_2} - \right.$$

$$- Q_{a+s}^o + J_{я_{a+s}} \cdot i_{a+s}^2 \ddot{Y}_{a+s} \} + \frac{K_{w_{a+s}} \cdot i_{a+s} \cdot \dot{Y}_{a+s}}{K_{a+s}^{УП} \cdot K_{a+s}^{ПХН}}, \quad (s=1, \dots, n-a) \quad (13)$$

то эти законы обеспечивают стабилизацию движения системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями.

В параграфе 1.5. рассматриваются некоторые особенности выбора исполнительного элемента следящей системы – электрической машины ЭМ. В работах [52-54] разработана общая методика выбора ЭМ. В работе [55] исследованы некоторые особенности выбора ЭМ в зависимости от способа регулирования угловой скорости двигателей главного движения станков, а также двигателей подачи. Двигатели подачи по своим характеристикам отвечают требованиям к ЭМ следящих приводов, а именно, отличаются высоким быстродействием, малой электромеханической постоянной времени, большим диапазоном регулирования угловой скорости якоря [56,61,63]. Регулируя угловую скорость якоря путем изменения напряжения, подаваемого на обмотку якоря, рассматриваются особенности выбора ЭМ по моменту.

В параграфе 1.6 рассматриваются классический пример А.Бегена – система, состоящая из пластинки и диска. Исследуя движение без освобождения от сервосвязи, составлены уравнения движения с множителями. Найдено частное решение уравнений движения системы и, рассматривая вопрос о реализации ее алгоритмом управления по принципу обратной связи (§1.2) относительно частного решения системы, показано, что оно не может быть устойчиво осуществлено данным алгоритмом. Далее, с учетом освобождения системы от сервосвязи, составлены уравнения движения, определен вид силы реакции сервосвязи, найдены условия устойчивости.

Для реализации сервосвязи предложена построить электромеханическую цифровую следящую систему. Составлена полная система ее уравнений, для упрощенной модели ЦСС найден закон формирования управляющих кодов ЦВМ, обеспечивающих устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязью.

Во второй главе рассматривается вопрос о стабилизации электромеханическими силами движений механических систем, стесненных как геометрическими, так и кинематическими связями первого и второго рода.

В параграфе 2.1. рассматривается механическая система, положение которой определяется обобщенными координатами $q_1, \dots, q_n$, стеснена обычными неголономными идеальными связями вида:

$$\sum_{i=1}^n b_{\beta i} \dot{q}_i + b_{\beta} = 0, \quad (\beta=1, \dots, b) \quad (14)$$

а также сервосвязями вида:

$$\begin{aligned}\Phi_{\alpha}(t, q_1, \dots, q_n) &= 0, & (\alpha=1, \dots, a) \\ \psi_{\gamma}(t, q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n) &= 0, & (\gamma=1, \dots, c) \quad (a+c=\kappa) \quad (15)\end{aligned}$$

С учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей:

$$\begin{aligned}\Phi_{\alpha}^*(t, q_1, \dots, q_n, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_a) &= 0, & (\alpha=1, \dots, a) \\ \psi_{\gamma}^*(t, q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n, \xi_1, \dots, \xi_c) &= 0, & (\gamma=1, \dots, c; \quad a+c=\kappa) \quad (16)\end{aligned}$$

где η_p, ξ_{δ} - параметры, характеризующие освобождение системы соответственно от первой и второй групп уравнений (15), вводятся скоростные параметры e_{γ} и на (А)-перемещениях составляются уравнения движения типа Аппеля. Получен явный вид этих уравнений:

$$\begin{aligned}1) \quad & \sum_{p=1}^a A_{ap} \eta_p + \sum_{\delta=1}^c A_{a, a+\delta} \dot{\xi}_{\delta} + \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} A_{a, \kappa+\rho} e_{\kappa+\rho} + \\ & + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{p=1}^a [\alpha_1, p, \alpha] \dot{\eta}_{\alpha_1} \dot{\eta}_p + \sum_{p=1}^a \sum_{\delta=1}^c [p, a+\delta, \alpha] \dot{\eta}_p \dot{\xi}_{\delta} + \\ & + \sum_{p=1}^a \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} [p, \kappa+\rho_1, \alpha] \dot{\eta}_p e_{\kappa+\rho_1} + \sum_{\delta=1}^c \sum_{\gamma=1}^c [a+\gamma, a+\delta, \alpha] \cdot \dot{\xi}_{\delta} \dot{\xi}_{\gamma} + \\ & + \sum_{\delta=1}^c \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} [a+\delta, \kappa+\rho, \alpha] \dot{\xi}_{\delta} e_{\kappa+\rho} + \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} [\kappa+\rho_1, \kappa+\rho, \alpha] e_{\kappa+\rho_1} e_{\kappa+\rho} = \\ & = Q_{\alpha} + \sum_{\theta_2=1}^{\kappa} \lambda_{\theta_2} \tilde{a}_{\theta_2 \alpha}, & (\alpha=1, \dots, a) \\ 2) \quad & \sum_{p=1}^a A_{a+\delta, p} \ddot{\eta}_p + \sum_{\delta_1=1}^c A_{a+\delta, a+\delta_1} \ddot{\xi}_{\delta_1} + \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} A_{a+\delta, \kappa+\rho} \ddot{e}_{\kappa+\rho} + \\ & + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{p=1}^a [\alpha, p, a+\delta] \ddot{\eta}_{\alpha} \ddot{\eta}_p + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{\delta_1=1}^c [\alpha, a+\delta_1, a+\delta] \ddot{\eta}_{\alpha} \ddot{\xi}_{\delta_1} + \\ & + \sum_{\gamma=1}^a \sum_{\delta_1=1}^c [a+\gamma, a+\delta_1, a+\delta] \ddot{\xi}_{\gamma} \ddot{\xi}_{\delta_1} + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} [\alpha, \kappa+\rho, a+\delta] \cdot \ddot{\eta}_{\alpha} e_{\kappa+\rho} + \\ & + \sum_{\gamma=1}^c \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} [a+\gamma, \kappa+\rho, a+\delta] \ddot{\xi}_{\gamma} e_{\kappa+\rho} + \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} [\kappa+\rho_1, \kappa+\rho, a+\delta] e_{\kappa+\rho_1} e_{\kappa+\rho} =\end{aligned}$$

$$= Q_{a+\delta} + \sum_{\theta_2=1}^{\kappa} \tilde{a}_{\theta_2, a+\delta}, \quad (\delta=1, \dots, c)$$

$$\begin{aligned} 3) \quad & \sum_{p=1}^a A \dot{\eta}_p + \sum_{\delta=1}^c A_{\kappa+\rho, a+\delta} \dot{\xi}_{\delta} + \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} A_{\kappa+\rho, \kappa+\rho_1} \dot{e}_{\kappa+\rho_1} + \\ & + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{p=1}^a [p, \alpha, \kappa+\rho] \dot{\eta}_p \eta_{\alpha} + \sum_{p=1}^a \sum_{\delta=1}^c [p, a+\delta, \kappa+\rho] \dot{\eta}_p \xi_{\delta} + \\ & + \sum_{p=1}^a \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} [p, \kappa+\rho_1, \kappa+\rho] \dot{\eta}_p e_{\kappa+\rho_1} + \sum_{\delta=1}^c \sum_{\gamma=1}^c [a+\delta, a+\gamma, \kappa+\rho] \cdot \xi_{\delta} \xi_{\gamma} + \\ & + \sum_{\delta=1}^c \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} [a+\delta, \kappa+\rho_1, \kappa+\rho] \xi_{\delta} e_{\kappa+\rho_1} + \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} \sum_{\rho_2=1}^{n-\kappa-b} [\kappa+\rho_2, \kappa+\rho_1, \kappa+\rho] e_{\kappa+\rho_1} e_{\kappa+\rho_2} = \\ & = Q_{\kappa+\rho} + \sum_{\theta_2=1}^{\kappa} \lambda_{\theta_2} \tilde{a}_{\theta_2, \kappa+\rho}, \quad (\rho=1, \dots, n-\kappa-b) \end{aligned} \quad (17)$$

где

и впервые получен явный вид сил реакций сервосвязей

$$R_{\alpha}^{(2)} = \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} [\kappa+\rho, \kappa+\rho_1, \alpha]^o e_{\kappa+\rho} e_{\kappa+\rho_1} - Q_{\alpha}^o - \sum_{p=1}^a (\kappa'_{ap} \eta_p + \kappa''_{ap} \eta_p) - \sum_{\delta=1}^c \kappa_{\alpha, a+\delta} \xi_{\delta}$$

, $(\alpha=1, \dots, a)$

$$\begin{aligned} R_{a+\delta}^{(2)} = & \sum_{\rho=1}^{n-\kappa-b} \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} [\kappa+\rho, \kappa+\rho_1, a+\delta]^o - Q_{a+\delta}^o - \sum_{p=1}^a (\kappa'_{a+\delta, p} \cdot \eta_p + \kappa''_{a+\delta, p} \cdot \eta_p) - \\ & - \sum_{\gamma=1}^a \kappa_{a+\delta, a+\gamma} \cdot \xi_{\gamma}, \quad (\gamma=1, \dots, c) \end{aligned} \quad (18)$$

$$R_{\alpha+\rho}^{(2)} = \sum_{\rho_1=1}^{n-\kappa-b} \sum_{\rho_2=1}^{n-\kappa-b} [\kappa+\rho_1, \kappa+\rho_2, \kappa+\rho]^o \cdot e_{\kappa+\rho_1} e_{\kappa+\rho_2} - Q_{\kappa+\rho}^o, \quad (\rho=1, \dots, (n-\kappa-b))$$

где κ'_{ap} , κ''_{ap} , $\kappa_{\alpha, a+\delta}$ - некоторые постоянные, обеспечивающие стабилизацию движения системы по отношению к многообразию, определяемому как геометрическими, так и кинематическими сервосвязями. Исследуя методом функций Ляпунова найдены условия устойчивости.

В параграфе 2.2. рассматривается проблема реализации сервосвязей. Для этого, как и в решении задачи реализации геометрических сервосвязей (§1.4) предлагается построить электромеханическую следящую систему. Здесь в отличие от §1.4. дополнительно вычисляются значения параметров освобождения от кинематических сервосвязей. Составлена ее полная система

уравнений и определен закон формирования управляющих кодов ЦВМ, обеспечивающих устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями.

В параграфе 2.3. полученные результаты иллюстрируются на примере шара, катящегося без скольжения по автоматически регулируемой плоскости. Система кроме обычных идеальных неголономных связей, стеснена кинематическими сервосвязями, выражающими собой вращение центра шара вокруг неподвижной оси с постоянной угловой скоростью. С учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей на (А)-перемещениях составлены уравнения движения с множителями сервосвязей и найден явный вид сил реакций сервосвязей. Найдены условия устойчивости.

Для реализации сервосвязей предлагается построить электромеханическую цифровую следящую систему (ЦСС). Составлена полная система уравнений (ЦСС) и найдены законы формирования управляющих кодов ЦВМ, обеспечивающих устойчивую реализацию сервосвязей.

В параграфе 2.4. рассматривается прикладной пример – машинный агрегат, предназначенный для перематывания ленты. Система стеснена одной кинематической сервосвязью,

$$\left(\rho_{20} + h \frac{\varphi_2}{2\pi} \right) \dot{\varphi}_2 = v_0$$

где ρ_{20} – радиус пустого барабана 2; h – толщина ленты; φ_2 – угол поворота барабана 2; v_0 – постоянная линейная скорость ленты, которую требуется поддерживать. Полагая, что сила реакции сервосвязи приложена на наматывающий барабан, с учетом наложенной сервосвязи, переменности масс частей системы и освобождаемости от сервосвязи, составлены дифференциальные уравнения движения и определен явный вид силы реакции сервосвязи:

$$\lambda = - \frac{1}{i_1} \left\{ \frac{J_1 \cdot i_1^2 + J_2(\varphi_2)}{\rho_{20} + h(\varphi_2 / 2\pi)} \frac{\dot{\varphi}_2^3}{2\pi} - e_1 \right\},$$

где $J_1, J_2(\varphi_2)$ – моменты инерции редуктора и барабана 2 соответственно; e_1 – положительная постоянная; ρ_{20} – радиус пустого барабана 2, найдены условия, обеспечивающие постоянство линейной скорости ленты

$$J_3(\varphi_3) < M_{эл} \cdot i_1 - M_{тр} - \gamma_2 [J_1 \cdot i_1^2 + J_2(\varphi_2)],$$

где $J_3(\varphi_3)$ – момент инерции барабана 3; $M_{эл}$ – электромеханический момент ЭМ; $M_{тр}$ – момент трения барабана 3; γ_2 – некоторое постоянное число.

Далее рассматривается задача реализации сервосвязи. Для этого предлагается построить ЦСС. Составлена полная система уравнений ЦСС, а также определен закон формирования управляющего кода ЦВМ, обеспечивающего устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязью.

В третьей главе рассматриваются проблема реализации сервосвязей в случае, когда часть координат недоступна непосредственному измерению. Предлагается решить проблему реализации сервосвязей электромеханическими силами построением электромеханической ЦСС. Как приложение полученных результатов рассматривается проблема реализации сервосвязей, наложенных на корректируемый гирокомпас в ее прецессионном и нутационном движениях.

В параграфе 3.1. рассматривается механическая система, стесненная геометрическими и кинематическими связями первого и второго родов, часть координат которой недоступна непосредственному измерению. Используя конструктивный метод отыскания структуры сил реакций сервосвязей, найдена их структура как функция доступных измерению величин. Рассматривая вопрос о реализации сервосвязей электромеханической ЦСС, составлена ее полная система уравнений и определены законы формирования управляющих кодов ЦВМ, обеспечивающих устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями.

В параграфе 3.2. рассматривается однороторный корректируемый гирокомпас. По назначению прибора (компаса) на систему должны быть наложены сервосвязи

$$\alpha_6 = 0 \quad , \quad \beta_2 = 0 \quad (3.2.3)$$

выражающие собой условие совпадения оси ротора гироскопа с направлением оси O_η (север). Относительное положение внешнего кольца гироскопа (угол α_6) недоступно непосредственному измерению, но доступно измерению относительное положение внутреннего кольца (угол β_2). В рамках прецессионной теории получены уравнения движения (с учетом параметрического освобождения) с неизвестной реакцией сервосвязи. Я.Н.Ройтенбергом был предложен закон формирования реакций связей второго рода (корректирующих моментов), при подстановке которых уравнения движения будут иметь частное решение, совместимое с сервосвязями и удовлетворяющиеся в некоторых пределах скоростей $v < v_{max}$ и широт $|\varphi| < \varphi_{1max}$. Однако, А.Г. Азизовым предложен другой закон формирования реакций связей второго рода, обеспечивающий устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями при любых скоростях движения корабля и в широтах $\varphi_1 \neq 90^\circ$. Для реализации этого закона формирования реакций связей второго рода, предложен построить электромеханическую ЦСС, и найден закон формирования управляющих кодов ЦВМ:

$$\begin{aligned}
x_1^{ЦБМ} &= \frac{R_1}{i_1 \cdot K_1^{УП} \cdot K_1^{ПКН} \cdot K_{m_1}} \left\{ H \left[\dot{\beta}_2 - \Omega \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin \frac{\dot{\beta}_2 + \kappa_3'' \beta_2}{\kappa_2''} - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{\nu}{R} \cos x \right] \cdot \cos \beta_2 + J_{я_1} \cdot i_1^2 \cdot \ddot{\alpha}_6 \right\} + \frac{K_{w_1} \cdot i_1 \cdot \dot{\alpha}_6}{K_1^{УП} \cdot K_1^{ПКН}}, \\
x_2^{ЦБМ} &= \frac{R_2}{i_2 \cdot K_2^{УП} \cdot K_2^{ПКН} \cdot K_{m_2}} \left\{ H \left[\Omega \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \frac{\dot{\beta}_2 + \kappa_3'' \beta_2}{\kappa_2''} + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{\nu}{R} \cdot \sin x \right] \cdot \sin \beta_2 - H \left[\kappa_1'' \beta_2 + \Omega \cdot \sin \varphi_1 + \frac{\nu}{R} \sin \left(x + \frac{\dot{\beta}_2 + \kappa_1'' \beta_2}{\kappa_2''} \right) \cdot \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \right] \cdot \cos \beta_2 + J_{я_2} \cdot i_2^2 \cdot \ddot{\beta}_2 \right\} + \frac{K_{w_1} \cdot i_1 \cdot \dot{\beta}_2}{K_2^{УП} \cdot K_2^{ПКН}},
\end{aligned}$$

где $\kappa_1^{УП}, \kappa_1^{ПКН}$ - коэффициенты усиления УП и ПКН соответственно; R_1, R_2 - омические сопротивления; K_{m_1}, K_{m_2} - коэффициенты вращательного момента; обеспечивающие устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями.

В параграфе 3.3. продолжено исследование однороторного корректируемого гироскопа в рамках нутационной теории. Используя предложенный А.Г.Азизовым закон формирования реакций связей второго рода, при некоторых ограничениях на скорость корабля и на моменты инерции гироскопа, нами предложен построить электромеханическую ЦСС, и осуществлена устойчивая реализация сервосвязей. Условия устойчивости имеют вид:

$$\begin{aligned}
&\kappa_1 > 0, \quad \kappa_2 > 0, \quad \kappa_3 > 0, \quad \kappa_4 > 0 \\
\Delta_3 &= \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 (\kappa_2 + \kappa_3) + \kappa_1^2 \kappa_3^2 (\kappa_2 + \kappa_4) + \kappa_1 \kappa_3 \kappa_4 (\kappa_1^2 - 2 \kappa_2) > 0,
\end{aligned}$$

где $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$ - некоторые постоянные.

В четвертой главе рассматривается проблема осуществления сервосвязей электромеханическими силами, когда в качестве исполнительного элемента ЦСС приняты ЭМ постоянного и переменного тока. Составляется полная система уравнений ЦСС, для упрощенной модели ЦСС определяются законы формирования управляющих воздействий, обеспечивающие устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями, а для обобщенной модели проблема приводится к решению конечно-разностных уравнений.

В параграфе 4.1. рассматривается проблема осуществления сервосвязей электромеханическими силами, когда в качестве исполнительного элемента ЦСС приняты ЭМ постоянного тока с

параллельным возбуждением. Построена полная система уравнений ЦСС, для чего к уравнениям объекта управления ОУ:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \sum_{p=1}^a A_{\alpha p} \ddot{\eta}_p + \sum_{s=1}^{n-a} A_{\alpha, a+s} \cdot \ddot{q}_{a+s} + \sum_{p=1}^a \sum_{s=1}^{n-a} [a+s, p, \alpha] \cdot \dot{\eta}_p \dot{q}_{a+s} + \\
 & + \sum_{m=1}^{n-a} \sum_{s=1}^{n-a} [a+m, a+s, \alpha] \cdot \dot{q}_{a+m} \dot{q}_{a+s} + \sum_{\beta=1}^a \sum_{p=1}^a [\beta, p, \alpha] \cdot \dot{\eta}_\beta \dot{\eta}_p = \\
 & = Q_\alpha - (J_\gamma)_\alpha \cdot (i_\gamma)_\alpha^2 \cdot \ddot{\eta}_\alpha + (i_\gamma)_\alpha \chi_\alpha \cdot (I_a)_\alpha \cdot (I_b)_\alpha, \quad (\alpha=1, \dots, a) \\
 2) \quad & \sum_{\alpha=1}^a A_{\alpha a+s, \alpha} \ddot{\eta}_\alpha + \sum_{m=1}^{n-a} A_{a+s, a+m} \cdot \ddot{q}_{a+m} + \sum_{m=1}^{n-a} \sum_{\alpha=1}^a [\alpha, a+m, a+s] \cdot \dot{q}_{a+m} \dot{\eta}_\alpha + \\
 & + \sum_{m=1}^{n-a} \sum_{e=1}^{n-a} [a+m, a+e, a+s] \cdot \dot{q}_{a+m} \dot{q}_{a+e} + \sum_{\alpha=1}^a \sum_{p=1}^a [\alpha, p, a+s] \cdot \dot{\eta}_\alpha \dot{\eta}_p = \\
 & = Q_{a+s} - (J_\gamma)_{a+s} \cdot (i_\gamma)_{a+s}^2 \cdot \ddot{q}_{a+s} + (i_\gamma)_{a+s} \chi_{a+s} \cdot (I_a)_{a+s} \cdot (I_b)_{a+s}, \\
 & (s=1, \dots, n-a) \quad (4.2.1)
 \end{aligned}$$

где

(как для случая системы с геометрическими сервосвязями, так и кинематическими сервосвязями) и для упрощенной модели ЦСС определен аналитический закон формирования управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями. С учетом динамики привода полная система уравнений приведена к конечно-разностным уравнениям и задача сведена к итерационному процессу, к которой применен метод Зейделя [91].

В параграфе 4.2. рассматривается проблема осуществления сервосвязей электромеханическими силами когда в качестве исполнительного элемента (ЭМ) приняты ЭМ постоянного тока со смешанным возбуждением. Двигатели со смешанным возбуждением применяются в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске, допустимы значительные изменения угловой скорости при изменении нагрузки и эксплуатация при весьма малой нагрузке [11,18,19]. Для упрощенной модели ЦСС определен аналитический закон формирования управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивость системы по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями. Учитывая динамику привода, полная система уравнений ЦСС сведена к

системе конечно-разностным уравнениям. Проблема сведена к итерационному процессу, который осуществляется методом Зейделя [91].

В параграфе 4.3. рассмотрена проблема осуществления сервосвязей электромеханическими силами, когда в качестве исполнительного элемента (ЭМ) приняты ЭМ постоянного тока с последовательным возбуждением. В этом двигателе сила тока возбуждения равна силе тока якоря вследствие последовательного соединения их обмоток. Уменьшение числа степеней свободы приводит к уменьшению числа уравнений системы [19]. При малых нагрузках угловая скорость двигателя с последовательным возбуждением резко возрастает и может превысить допустимое значение. Такие двигатели нельзя использовать в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке. Они находят применение при тяжелых условиях пуска, когда момент нагрузки может меняться в широких пределах [11,18]. Построена полная система уравнений ЦСС и для упрощенной модели ЦСС определен аналитический закон формирования управляющих воздействий, которые обеспечивают устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями. Для динамического режима задача сведена к решению конечно-разностной системы уравнений, которая решается методом Зейделя [91].

В параграфе 4.4. решена модельная задача. Для классического примера А. Бегена с диском и пластинкой [1] построена ЦСС, для её упрощенной модели найдены законы формирования управляющих воздействий и исследована устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязью. Для динамического режима (для полной модели) задача сведена к конечно-разностным уравнениям, которая решается методом Зейделя. На языке C++ составлена программа. Для сравнения результаты численного и аналитического законов формирования управляющих воздействий внесены в таблицу.

В параграфе 4.5. рассматриваются некоторые особенности вопроса осуществления сервосвязей электромеханическими силами, когда в качестве исполнительного элемента ЦСС используются асинхронные двигатели (АД). Обсуждаются вопросы регулирования частоты вращения АД и силовые преобразователи переменного тока.

В параграфе 4.6. рассматривается задача определения закона формирования управляющих воздействий для стационарного режима ЦСС как для системы, стесненной геометрическими сервосвязями, так и кинематическими сервосвязями.

В параграфе 4.7. рассматриваются вопросы определения управляющих воздействий для динамического процесса. Проблема приведена к конечно-разностным схемам и для ее решения предлагается применять метод Зейделя.

В параграфе 4.8. решена модельная задача. На классическом примере Бегена шаром на автоматически регулируемой плоскости для стационарного режима найден закон формирования управляющих воздействий, для

динамического режима методом Зейделя предложена определить численно управляющие воздействия.

В пятой главе рассматривается проблема гашения колебаний системы, имеющей n степеней свободы. В отличие от рассмотренных ранее работ, посвящённых этому направлению, здесь впервые виброзащита будет осуществляться за счёт привлечения дополнительных источников энергии. Для этого к виброзащитным системам применяются методы динамики систем с сервосвязями.

В параграфе 5.1 рассматривается проблема гашения колебаний системы, имеющей n степеней свободы. Принимая выражения положения равновесия за соотношений сервосвязей, с учетом параметрического освобождения системы (колебания около положения равновесия) от

сервосвязей составляются уравнения с множителями. Формируя реакции сервосвязей, получены условия, при которых обеспечивается устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями.

В параграфе 5.2 рассматривается проблема виброзащиты тела, имеющего шесть степеней свободы. Считая, что на систему наложена шесть сервосвязей, с учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей, получены уравнения с множителями. Найдены условия, при которых обеспечивается устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями.

В параграфе 5.3 рассматривается проблема осуществления сил реакций сервосвязей за счёт внутренних источников энергии. Рассматривается три случая:

- 1) переменные коэффициенты жесткости;
- 2) переменные коэффициенты вязкости;
- 3) одновременно переменные коэффициент жесткости и коэффициент вязкости.

В трех рассмотренных случаях получены условия, при которых обеспечивается устойчивость системы около положения равновесия (сервосвязей).

В параграфе 5.4 рассматривается проблема активного гашения колебаний

В заключении приведены выводы и перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— с учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей получена явная форма уравнений движения и найден явный вид сил реакций сервосвязей для механических систем, стесненных геометрическими связями

первого и второго родов, по отношению к многообразию, определяемому геометрическими сервосвязями;

- получен закон формирования якорных напряжений ЭМ постоянного тока независимого возбуждения, обеспечивающий устойчивость программного движения механической системы;

- выяснена особенность использования обобщенной модели коллекторных ЭМ постоянного тока, модель которых может быть описана уравнениями А.В.Гапонова, а также показано сходство записи упрощенной модели уравнениями бесколлекторных ЭМ;

- для реализации сервосвязей предложена построить электромеханическую цифровую следящую систему (ЦСС), найдены законы формирования управляющих воздействий ЦВМ, обеспечивающие стабилизацию движения механической системы по отношению к многообразию, определяемому геометрическими сервосвязями;

- разработана методика выбора исполнительного элемента следящей системы (ЭМ), способного реализовать сервосвязь, по максимально допустимому моменту.

- с учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей в скоростных параметрах получена явная форма уравнений движения и найден явный вид сил реакции сервосвязей механических систем, стесненных геометрическими и кинематическими связями первого и второго родов, по отношению к многообразию, определяемому сервосвязями;

- предложено построить электромеханическую цифровую следящую систему, найдены законы формирования управляющих воздействий ЦВМ, обеспечивающие стабилизацию движения механической системы по отношению к многообразию, определяемому геометрическими и кинематическими сервосвязями;

- как приложение полученных результатов, при рассмотрении задач перематывания ленты, найдена структура силы реакции сервосвязи, которая действует через редуктор на наматывающий барабан, а также предложено построить электромеханическую цифровую следящую систему, определен закон формирования управляющих воздействий ЦВМ, обеспечивающий постоянство линейной скорости ленты;

- с учетом параметрического освобождения системы от сервосвязей составлены уравнения движения механической системы, стесненной геометрическими и кинематическими связями первого и второго родов, найдена структура сил реакций сервосвязей как функция доступных измерению величин;

- рассматривая проблему стабилизации электромеханическими силами движений корректируемого гирокомпаса (без учета прецессии гироскопа), предложено построить цифровую следящую систему (ЦСС) и найдены законы формирования управляющих воздействий ЦВМ, обеспечивающие стабилизацию его движений в любых широтах и при любых скоростях движения корабля;

– при рассмотрении задачи стабилизации электромеханическими силами движений корректируемого гироскопа (с учетом прецессии гироскопа), найден закон формирования управляющих воздействий ЦВМ, обеспечивающий стабилизацию движения системы по отношению к сервосвязям;

– в качестве ЭМ при использовании двигателей постоянного тока (с параллельным возбуждением, с последовательным возбуждением, со смешанным возбуждением), найдены законы формирования управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями;

– для динамического режима задача определения управляющих воздействий сведена к решению системы конечно-разностных уравнений методом итераций Зейделя;

– в качестве ЭМ при использовании двигателей переменного тока (АД), для стационарного режима найден аналитический закон формирования управляющих воздействий, которые обеспечивают устойчивость системы по отношению многообразия, определяемого сервосвязями. Для динамического режима задача сведена к решению системы конечно-разностных уравнений, которая решена методом Зейделя;

-обобщен алгоритм отыскания структуры сил реакций сервосвязей, разработанный А.Г.Азизовым;

-разработан новый метод реализации сервосвязей электромеханическими силами.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Научные статьи:

1. Азизов. А.Г., Тешаев М.Х. О реализации сервосвязей электромагнитными силами // Известия АН УзССР. Сер. Техн. Наук. 1991. №2 .-С. 57-60

2. Тешаев М.Х., Ядгоров У.Т., Агзамова Д.И. Колебания аппаратуры, установленной на вязкоупругих опорах/ДАН Р Уз, Сер. матем., технические науки, естествозн. 1997, №4.-С..28-30

3. Тешаев М.Х. Об одном способе реализации геометрических сервосвязей с помощью электромеханических сил/ Узбекский журнал «Проблемы механики». № 1 , 1998 .-С.27-31

4. Тешаев М.Х., Азизов А.Г. Ширинкулов Т.Ш. О стабилизации механических систем, стесненных кинематическими связями/ ДАН Р Уз. Сер. матем., техн. науки, естествозн. 1998 , № 6.-С. 20-23

5. Тешаев М.Х. О стабилизации механических систем, стесненных геометрическими связями / Узбекский журнал «Проблемы механики», №1, 1999.-С. 17-20

6. Тешаев М.Х. О гироскопическом компасе с электромеханической коррекцией / Узбекский журнал «Проблемы механики», №3, 2000.-С.29-32
7. Тешаев М.Х., Рахматов Н.Х. Об осуществлении кинематических servosвязей электромеханическими силами с учётом динамики привода / Узбекский журнал «Проблемы механики», №3, 2000.-С.29-32
8. Тешаев М.Х. . Решение задачи перематывания ленты с учётом динамики привода/ ДАН РУз, Сер.. матем., техн. науки, естесвозн. №2, 2000.- С..26-29
9. Тешаев М.Х. О реализации геометрических servosвязей электромеханическими силами/ ДАН РУз, Сер. матем., техн. науки, естесвозн. №11, 2000.-С.28-30
10. Тешаев М.Х. Об осуществлении геометрических servosвязей электромеханическими силами с учётом динамики привода/ ДАН РУз, Сер. матем., техн. науки, естесвозн. №8-9, 2001.-С.38-40
11. Тешаев М.Х.Об осуществлении кинематических servosвязей электромеханическими силами (исполнительный элемент – двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением) /Узбекский журнал «Проблемы механики», 2007, №5.-С.23-28
12. Тешаев М.Х. О конструировании реакций servosвязей систем, стесненных кинематическими связями/ Узбекский журнал «Проблемы механики» . №1, 2005.-С.3-7
13. Тешаев М.Х. “Об оптимальной стабилизации систем, стесненных геометрическими servosвязями, на основе метода динамического программирования / Объединенный научный журнал. Москва. 2007. №2.(190) С. 59-61.
14. Тешаев М.Х. “Динамическое гашение колебаний тела, имеющего три степени свободы”. Объединенный научный журнал. Москва. 2007. №2 (190) С. 61-63.
15. Тешаев М.Х. “Об условиях устойчивости активных виброзащитных систем”/ Объединенный научный журнал. Москва. 2007. №2 (190) С. 63-64

Тезисы научных статей:

1. Тешаев М.Х. О стабилизации электромеханическими силами механических систем, стесненных связями первого и второго родов. Тезисы докладов международной конференции «Механика и её применения» . Ташкент, 1993, 9-11 ноября.- С. 37
2. Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Ядгоров У.Т. О колебаниях системы с конечным числом степеней свободы/ Тезисы докладов Республиканской научной конференции, посвященной 90 летию Академика М.Т. Уразбаева. Ташкент , 1996, 1-2 октября.-С. 194-195
3. Тешаев М.Х. О стабилизируемости механических систем, стесненных геометрическими связями /Тезисы докладов Республиканской научно-практической конференции «Кадрлар тайёрлаш миллий дастури асосида

техника Олий укув юртларида фундаментал фанларни уқитиш муаммолари» . 24-24 ноябры, 2001.-С. 170-171

4. Тешаев М.Х. О стабилизации движений механических систем когда часть координат не доступны непосредственному измерению /Тезисы докладов школы-семинара «Матем. и числ моделир, процессов тепло и массообмена в многофазных средах».. Бухара,12-14 ноября,2001.-С.70-71 б.

5. Тешаев М.Х. Сервобогланишли механик системаларни оптимал тургунлаштириш тугрисида/ Материалы международной научно -практической конференции «Миллий иктисодиетда технологик жараенларни жадаллаштириш ва энергияни тежайдиган технологиялардан фойдаланиш муаммолари» .Бухара, 20-22 ноября 2003.-С.186-188

6. Тешаев М.Х., Хамроев У. Геометрик сербогланишли системаларни тургунлаштириш тугрисида/ Материалы Международной научной конференции «Механика муаммолари ва иншоотлар сейсmodинааси» .Тошкент, 27-28 мая, 2004.-С. 618-119

7. Тешаев М.Х. Об устойчивости систем с сервосвязями/ 5-я Международная конференция «Авиация и космонавтика -2006» . Москва, 23-26 октябрь, 2006.-С. 31-32

8. Тешаев М.Х. Об управляемости геометрических сервосвязей электромеханическими силами/ Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции «Машиналар механикасининг хозирги замон муаммолари» с участием зарубежных учёных. Ташкент, 7-8 октября 2004.-С.171-173

9. Тешаев М.Х. О стабилизации гироскопического компаса/ Сборник статей Международной научной конференции «Инновация-2006» .Ташкент. 2006.-С. 264-265

10. Тешаев М.Х., Содиков Д., Эргашев Ф., Муродов Х, Об уравнениях движения систем, стесненных геометрическими и кинематическими связями/ Материалы четырнадцатой Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, Крым, 25-31 мая 2005.- С.423-424

11. Тешаев М.Х. О реакциях системы твердых тел на изменение скорости/ Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Фан ва ишлаб чикариш интеграциясини жадаллаштириш муаммолари».Бухара, 2006. –С.159-161

12. Тешаев М.Х. Об устойчивости движений механических систем, когда часть координат не доступны непосредственному измерению/ Тезисы Республиканской научно-методической конференции «Техника йуналишидаги Олий таълим муассасаларида математика ва физика фанларини уқитиш муаммолари» . Ташкент,30-31 мая, 2003.-С. 162-164

13. Сафаров И.И.,Тешаев М.Х., Эсанов Н.К. История изучения защиты механических систем от воздействий/ Программа дополнительного образования. Россия -Узбекистан. Сборник статей слушателей. Москва, декабрь 2006г.- С.71-75

14. Тешаев М.Х. Об оптимальных параметрах гасителей для виброзащитных систем/ Материалы Международной конференции посвященной 70 летию Академика Т.Ш. Ширинкулова. Самарканд. 28-29 июня, 2007, Секция-1. – С.37-39

Р Е З Ю М Е

диссертации Манглиевой Журагул Хамраевны на тему «**Исследование некоторых вопросов аналитической динамики систем с неидеальными связями**» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Ключевые слова: неидеальные связи; комбинирование связей; силы трения; фрикционный редуктор; устойчивость и стабилизация движения.

Объекты исследования: голономные и неголономные механические системы с неидеальными и с условными неидеальными связями (связи с трением, сервосвязи), в том числе фрикционный регулятор скорости при наличии условной неидеальной связи.

Цель работы: исследование движения механических систем с неидеальными связями путем использования расширенного метода комбинирования связей; выделение класса механических систем, как с голономными, так и с неголономными неидеальными связями, анализ которых становится возможным благодаря использованию этого метода; приложение теоретических положений к решению конкретных задач; исследование на устойчивость программных движений фрикционного регулятора при наличии условной неидеальной связи и определение их оптимальной стабилизации.

Методы исследования: методы аналитической механики, теории дифференциальных уравнений, теории устойчивости и стабилизации движений, механики управляемого движения; теории П Пенлеве для систем с неидеальными связями, и А Бегена для систем с условными связями.

Полученные результаты и их новизна: обобщен метод комбинирования связей, на основе которого предложена новая методика составления дифференциальных уравнений движения для голономных и неголономных систем с неидеальными связями; дано обобщение принципа наименьшего принуждения Гаусса для неголономных систем с неидеальными связями в случае возможных перемещений, удовлетворяющих расширенному методу комбинирования связей; получены условия устойчивости и оптимальной стабилизации программных движений управляемого фрикционного регулятора.

Практическая значимость: Предлагаемый метод позволяет расширить класс задач, содержащих механические системы с неидеальными связями, для которых возможно получить дифференциальные уравнения движения, определить силы связей и закон трения системы; определить силовое воздействие, реализующее условную связь.

Степень внедрения и экономическая эффективность:

результаты данной работы используются в учебном процессе при чтении специальных курсов по аналитической механике и механике управляемого движения в рамках бакалавриата и магистратуры по направлению «Теоретическая механика» в Национальном Университете Узбекистана, а также при написании выпускных и диссертационных работ.

Область применения: аналитическая механика; механика управляемого движения; результаты данной работы могут быть использованы при исследовании конкретных механических систем с трением, в частности при конструировании и использовании различных видов управляемых фрикционных редукторов, применяемых в текстильной промышленности, автомобилестроении и в других отраслях.