

На правах рукописи

Мубеези-Магоола Эндрю Джимми

УПРУГИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
С СУХИМ И ВЯЗКИМ ТРЕНИЕМ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического управления»  
Санкт-Петербургского государственного технического университета

- Научный руководитель – Доктор технических наук, профессор  
С.А. Ковчин.
- Официальные оппоненты – Доктор технических наук, профессор  
А.Е. Бор - Раменский;  
– Кандидат технических наук, доцент  
В.Н. Филатов.
- Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет им.  
В.И. Ульянова (Ленина).

**Защита диссертации состоится «30» Мая 2002г. в 18:00 часов**  
на заседании диссертационного совета Д212.229.20. при Санкт-  
Петербургском государственном техническом университете по адресу:  
Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 151.  
Почтовый адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
СПбГТУ.

Автореферат разослан **8** мая 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.229.20.

А.Д.Курмашев/

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Позиционно – следящие приводы (ПСП) широко используют в станкостроении, машиностроении, робототехнике и производственных системах многих других отраслей промышленности. Требования к ним хорошо изучены и даже занесены в ГОСТ 27803 – 91.

Например, приводы механизмов подачи металлорежущих станков должны обеспечивать диапазоны регулирования скорости до 1:10.000, суммарную погрешность минимальной скорости и неравномерность вращения не более 25%, аperiodичность переходных процессов и полосу пропускания частот замкнутых контуров регулирования скорости 100 Гц и положения 20Гц. В современных приводах подачи эти требования еще выше. Для их выполнения необходимы глубокие знания об объекте управления, со стороны которого приходят основные возмущения на систему автоматического управления (САУ).

Объектом управления в ПСП является силовая часть упругой электромеханической системы (ЭМС) с сухим и (или) вязким трением. Сюда входят: усилитель мощности (УМ), электродвигатель (Д), упруго - диссипативная кинематическая цепь («упругое звено» (УЗ)) и исполнительный механизм с сухим и (или) вязким трением (ИМ). Это устройство названо «обобщенным объектом управления» (ООУ). Его свойства, в большей или меньшей степени, характерны для всех реальных ЭМС. Это позволяет применить выводы и результаты диссертационной работы для оценки поведения в динамических режимах разнообразных реальных редукторных и безредукторных электроприводов с различными структурами управления.

Повышение качества процессов, выполняемых ПСП, заставляют углубленно изучать их свойства и внешние воздействия. К ним относятся упругости, нелинейности возмущений в виде сухого и вязкого трения, нелинейности кинематических цепей и преобразователей энергии. Учет влияния этих воздействий на поведение электромеханических систем (ЭМС) в

динамических режимах их работы и составляет основной предмет исследования в данной работе. Изучением этих вопросов занимались научные коллективы под руководством профессоров: В.И.Ключева (Москва), Б.Ш.Бургина (Новосибирск), В.Б.Клепикова (Харьков), Г.Г.Соколовского (Санкт – Петербург) и другие. Но во всех этих исследованиях не были использованы аналитические функции для представления сухого трения. Поэтому задачи создания качественных систем с упругими и нелинейными электромеханическими объектами управления и сегодня находятся в центре внимания ученых и инженеров, работающих в этой области, что и определяет актуальность темы диссертации.

**Цель работы.** Разработка и исследование моделей упругой ЭМС, с сухим и (или) вязким трением, с различными способами ее замыкания и реализации управления усилителями мощности и методик достоверной оценки результатов таких экспериментов, что направлено на создание основ аналитического расчета регуляторов для сложных электротехнических комплексов, являющихся объектами управления в позиционно следящих системах.

Эта цель достигается решением следующих задач, суть которых уточена в нижеприведенном разделе автореферата о содержании работы:

1. Доопределение основных динамических ограничений для позиционных систем оптимального быстродействия, работающих в режимах малых перемещений с «жесткими» и «упругими» объектами управления.

2. Анализ структур управляющей части ЭМС, обеспечивающих удовлетворительные качества динамических режимов объекта управления, при учете упруго-диссипативных свойств его кинематических цепей и влияния сухого и (или) вязкого трения.

3. Анализ известных аналитических зависимостей сухого трения и предложение новых математических представлений (моделей) этого сложного физического явления.

4. Разработка и создание методик линеаризации зависимостей моментов сухого ( $M_{СТ}$ ) и вязкого ( $M_{ВТ}$ ) трений от угловой скорости ( $\omega$ ), с целью их использования для анализа и синтеза ЭМС.

5. Разработка методик оценки допустимых относительных отклонений скорости ( $\delta_{\omega}$ ) при заданных относительных погрешностях линеаризации момента трения ( $\delta_M$ ).

6. Исследование динамических свойств «упругая кинематическая цепь – исполнительный механизм» упругая разомкнутая ЭМС (с параметрами приводов подач современных металлообрабатывающих станков) при учете сухого и вязкого трения в исполнительном механизме.

7. Разработка структуры релейного регулятора тока, обеспечивающего повышение "грубости" замкнутой ЭМС и снижение влияния на ее динамику вариаций параметров и возмущений.

8. Создание в среде DS88 нескольких моделей замкнутых упругих ЭМС с целью их аналитического исследования при наличии:

- различных принципов управления усилителями мощности,
- реализации обратных связей,
- реализации моделей моментов сухого и вязкого трения в исполнительном механизме.

9. Разработка методик оценки результатов аналитического исследования моделей различных ЭМС и методик оценки их достоверности.

Перечень поставленных задач определяет **основные положения диссертации**, которые и выносятся на ее защиту.

1. Результаты анализа принципов реализации современных позиционно следящих систем, и сущности энергетических ограничений, определяющих условия реализации в них оптимального или субоптимального управления.

2. Результаты анализа математических зависимостей сухого и вязкого трения, и предложения для описания их новых моделей более удобных для линеаризации этих характеристик.

3. Методика линеаризации характеристик и получение моделей силовых элементов с сухим и вязким трением с оценками погрешности линеаризации, определением допустимых значений отклонений управляющих воздействий в диапазоне их изменений, как основы анализа и синтеза линеаризованных моделей жестких и упругих ЭМС.

4. Результаты анализа динамических характеристик линеаризированной разомкнутой двух массовой упругой ЭМС и ее элементов с сухим и вязким трением в исполнительном механизме.

5. Модели упругой ЭМС (в среде DS88) с усилителями мощности в контуре тока со следящим и независимым принципами управления, различными моделями сухого и вязкого трения и способами замыкания обратных связей, как основы для аналитического исследования динамики и выбора регуляторов.

6. Методика обработки и оценки результатов аналитического исследования динамических характеристик линеаризованных и нелинейных моделей упругих ЭМС (полученных в среде DS88).

Решения вышеперечисленных задач и конкретные доказательства положений, выносимых на защиту, составляют научное и прикладное содержание работы.

**Методы исследования** выбирались, исходя из поставленных задач, с учетом особенностей исследуемой ЭМС. Для оценки известных и новых аналитических зависимостей применялись результаты натуральных экспериментов, алгоритмы и методы прикладной математики, теории электропривода и теории автоматического управления. Для анализа динамических характеристик моделей ЭМС разрабатывались методы и оценки результатов аналитического эксперимента, основанные на фундаментальных положениях теории управления. Достоверность результатов аналитических исследований проверялась созданием частных методик их оценки: например, сравнением известных и предложенных аналитических представлений характеристик сухого и вязкого трения с различными экспериментальными данными, а динамических свойств линеаризованных и нелинейных моделей

исполнительных механизмов в упругих замкнутых ЭМС: набором следующих параметров собственных частот колебаний  $\nu_{\text{упо}}$ , длительностей переходных процессов  $t_{\text{п}}$  *при заданных внешних воздействиях* -  $1(t)$ , значений перерегулирования  $\sigma$  % и т.п.

Эти оценки позволили подтвердить адекватность протекания физических процессов в натурных установках и их моделях.

### **Научная новизна** результатов диссертации.

1. Доопределены основные ограничения со стороны электродвигателя и исполнительного механизма для позиционных систем оптимального быстродействия, работающих в режимах малых перемещений с «жесткими» и «упругими» объектами управления.

2. Выполнен анализ известных аналитических зависимостей сухого трения и предложены новые математические представления (модели) этого сложного физического явления.

3. Разработана методика линеаризации зависимостей моментов сухого ( $M_{\text{СТ}}$ ) и вязкого ( $M_{\text{ВТ}}$ ) трений от угловой скорости ( $\omega$ ) с целью использования таких характеристик для анализа и синтеза ЭМС.

4. Разработана структура релейного регулятора тока, обеспечивающего повышение "грубости" замкнутой ЭМС и снижение влияния на ее динамику вариаций параметров и возмущений.

5. Создано в среде DS88 нескольких моделей замкнутых упругих ЭМС с целью их аналитического исследования при наличии:

- различных принципов управления усилителями мощности,
- реализации обратных связей по «выходу» двигателя и «выходу» ООУ,
- реализации линеаризированных и нелинейных моделей моментов сухого и вязкого трения в исполнительном механизме.

- **Практическая ценность работы** состоит:

1. В сопоставлении конкретных динамических свойств современных коллекторных и вентильных машин постоянного тока при их работе в позиционно – следящих приводах.

2. В создании методики конкретных оценок допустимых относительных отклонений скорости ( $\delta_{\omega}$ ) для заданных относительных погрешностей линеаризации момента трения ( $\delta_M$ ) при инженерных решениях задач анализа и синтеза проектируемых жестких и упругих ЭМС.

3. В разработке модели упругого передаточного устройства и исполнительного механизма «упругое звено – объект управления» и в целом упругой разомкнутой ЭМС (с параметрами приводов подач современных металлообрабатывающих станков) при учете сухого и вязкого трения в исполнительном механизме. Эти модели могут быть использованы на стадии проектирования новых станков, роботов и других механизмов с аналогичными свойствами для определения их основных динамических параметров.

4. В создании методики выбора необходимых экспериментальных данных для достоверных практических оценок результатов аналитического исследования моделей различных ЭМС в среде DS88, которые позволяют выполнить анализ и синтез проектируемых устройств, и линеаризацию их основных нелинейностей при заданных значениях отклонений основных переменных САУ.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на Международном научно-техническом семинаре «Оптимизированные электрические приводы» 12 - 14 августа 2001г. при Альборгском Техническом университете (Дания) и научно-техническом семинаре кафедры САУ СПбГТУ в 2002 г. По результатам исследований опубликованы три работы.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четыре главы с материалами основных исследований, заключения, списка литературы из 90 наименований и дополнительных материалов в виде семи приложений.



Работы изложена на 181 листе машинописного текста, из них основная часть составляет 103 листа и, кроме того, содержит 38 рисунков и 12 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко описано основное содержание работы. Значительное внимание уделено изложению вопроса о месте данной работы в общем плане исследований, проводимых на кафедре «Системы автоматического управления» СПбГТУ по разработке двух направлений финитного управления ЭМС (руководители направлений профессора С.А.Ковчин и О.А.Соколов). Это позволило полнее обосновать актуальность темы, конкретизировать цель диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, сформулировать основные задачи исследований.

**Первая глава** посвящена анализу принципов построения современных позиционно – следящих приводов (ПСП). Решая задачи оптимального управления, исследователи давно пришли к выводу о возможности предварительного задания их цикла работы в кратковременном и повторно-кратковременном режимах.. В последние 2-3 десятилетия такие САУ и их регуляторы стали называть "финитными". Однако у них может быть два различных режима работы. Эти режимы мы назвали "режимами больших (или малых) перемещений".

Анализ многочисленных работ, посвященных исследованию поведения ПСП в режимах больших перемещений, показал, что, несмотря на ряд новых предложений («асимметричный оптимум», «пропорционально – интегро дифференциальное», «финитное» и другие принципы управления), основной схемой остается подчиненное (каскадное) построение регуляторов и программное управление позиционно–следящими приводами. Для быстродействующих ООУ реже используют системы с переключаемой структурой. Предпочтение следует отдать аperiodическим финитным цифровым регуляторам.

Доопределены ограничения основных параметров элементов таких ПСП при их работе с малыми перемещениями. Показано, что их следует рассчитывать независимо как для двигателя, так и для исполнительного механизма

Анализ содержания предшествующих работ и полученных в них результатов, проведенный во введении и первой главе диссертации, привел к выводу о том, что дальнейшее улучшение качества финитного управления возможно только после всестороннего изучения и учета свойств силовой части ЭМС, как обобщенного объекта управления в такой структуре. Это не только определило основную цель исследований, но и заставило подробно изучить свойства вязкого и, особенно, сухого трения. Поэтому значительное место уделено описанию результатов изучения этого сложного физико-химического явления.

Отмечено, что еще в 50-е годы 20в работами И.В.Крагельского было доказано, что значение коэффициента трения покоя зависит от длительности контакта пары трения и определяется решением дифференциального уравнения первого порядка при ненулевых начальных условиях

$$k_{Tn}(t) = k_{Tn}(\infty)(1 - e^{-t/T}) + k_{Tn}(0)e^{-t/T}, \quad (1)$$

где  $t$ -время,  $T$ - постоянная времени,  $k_{Tn}(0)$  и  $k_{Tn}(\infty)$ -начальное и установившееся значения коэффициента трения.

Влияние скорости скольжения на силу трения выражается в том, что коэффициент трения представляется такой зависимостью:

$$k_{Tn}(v) = (a + bv)e^{-cv} + d, \quad (2)$$

где  $k_{TC}$  - коэффициент трения скольжения,  $v$ -скорость прямолинейного скольжения,  $a, b, c$  и  $d$  постоянные величины, зависящие от природы тел, составляющих пару трения.

Однако эти зависимости не отражены ни в одном учебник по теории электропривода и не использовались электромеханиками.

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей объекта управления с явно выраженным влиянием сухого или вязкого трения и исследованию упругих ЭМС с такими возмущениями.

Выполнен анализ известных аналитических зависимостей сухого трения от скорости движения объекта.

Исходя из того, что линеаризация зависимости (2) сложна были предложены две новые аналитические зависимости для представления момента сухого трения функцией  $M_{CT}(\omega)$ . Момент вязкого трения  $M_{BT}$  представлялся известной, используемой в теории электропривода зависимостью  $M_{BT}(\omega)$ . Далее, исследовалось устройство названное «обобщенным объектом управления» (ООУ). Для него использовались два прототипа: упругий механизм подачи станка со значительным моментом сухого трения и механическая часть электромеханического комплекса (ЭМК) (центрифуга) для воспроизведения параметров движения – жесткая машина с о значительным сухим и вязким трением. Для обоих прототипов имелись различные экспериментальные данные оценки их динамических и установившихся режимов

Момент сопротивления  $M_C$  ООУ определяется составляющими:  $M_{CT}$  вызванными только силами сухого трения, и  $M_{BT}$  – силами вязкого трения. Обе эти составляющие момента являются нелинейными функциями угловой скорости  $\omega$ .

По экспериментальным данным, установлено, что момент сопротивления  $M_C$  можно записать приближенной аналитической зависимостью:

$$M_C(\omega) = \frac{k_C \Delta M_{II}}{\omega} + M_0 + k_B \omega^2 \quad (3)$$

где  $\frac{k_C \Delta M_{II}}{\omega}$  - составляющая момента, вызванная силами сухого трения;

$M_0$  – постоянная составляющая;  $k_B \omega^2$  - составляющая момента сопротивления,

вызванная силами вязкого трения;  $\Delta M_{\Pi}$  – начальное значение приращения момента сухого трения;  $k_c, k_n$  – коэффициенты пропорциональности.

Формула (3) справедлива при  $\omega \geq k_c$ , поэтому предложено и другое представление момента сухого трения.

$$M_{\text{CT}}(\omega_1) = \Delta M_{\text{CT}}(\omega_1) + M_0 = \frac{k_{c1} \Delta M_{\Pi}}{\omega_1} + M_0, \text{ при } \omega_1 = a + \omega, \quad (4)$$

где  $k_{c1} = a$ , постоянная величина размерностью рад/с, определяется расчетом по экспериментальным данным,  $a$  – величина смещения начала координат зависимости  $M_{\text{CT}}(\omega)$  по оси абсцисс.

При преобладании сухого трения линейаризация формул (3) или (4) приводит к такому выражению:

$$\delta_{\omega 1} = \pm \sqrt{\delta_{M1}(1 + d_{M1}d_c)}, \quad (5)$$

где  $d_{M1} = M_0/\Delta M_{\Pi} = \text{const}$ ,  $d_c = k_c/\omega_0$ ,  $\delta_{\omega 1} = \Delta\omega/\omega_0$ ,  $\delta_{M1} = \Delta M/M_{01}$ . и

$M_{01}$  значение момента сухого трения в точке линейаризации

$$M_{01} = \frac{k_c \Delta M_{\Pi}}{\omega_0} + M_0.$$

Рассматривая выражение (5), легко заметить, что при  $\delta_{M1} = 1,0\%$

$\delta_{\omega 1} = \pm 0,1\sqrt{1 + d_{M1}d_c} > 10\%$ , при  $\delta_{M1} = 2,0\%$ ,  $\delta_{\omega 1} > 14\%$  и т.д.

Любопытно отметить, что линейаризация характеристики вязкого трения приводит к тем же результатам при различных значениях  $\omega_0$ . Например, для выбранного двигателя при  $\omega_{01} = 5,02$  рад/с и  $\omega_{02} = 80,32$  рад/с получено:

$$\delta_{\omega} = 1,22\sqrt{\delta_M}. \quad (6)$$

Но в данном случае  $\delta_{\omega} = \Delta\omega/\omega_{\text{НОМ}}$ ,  $\delta_M = \Delta M/M_{\text{НОМ}}$

Таким образом, даже при задании  $\delta_M = 1\%$  можно задавать 12% отклонение скорости во всем диапазоне ее изменения при любых режимах работы привода

Функцию  $M_c(\omega)$  можно разделять на три участка, и при вышеуказанных отклонениях угловой скорости модели жестких ЭМС или ИМ в упругих системах могут быть линеаризованы.

1. При  $\omega \ll \omega_3$ , можно не учитывать влияние вязкого трения, после линеаризации получим модель силовой части с учетом сухого трения:

$$K_{дс}(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta M(s)} = \frac{k_{дс}}{(T_{мс}s - 1)}, \quad (7)$$

где  $\omega$  - рабочая угловая скорость привода,  $\omega_3$  - критическая угловая скорость, при которой момент сопротивления равен экстремуму,  $k_{дс} = \frac{\omega^2}{k_c \Delta M_{п}}$ ,

$T_{мс} = J k_{дс}$ ,  $J$  - момент инерции привода.

2. При  $\omega \cong \omega_3$ , учитывается только постоянная составляющая  $M_0$ , что соответствует базовой модели:

$$K_{д}(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta M(s)} = \frac{1}{Js}. \quad (8)$$

3. При  $\omega \gg \omega_3$ , после линеаризации получим модель силовой части с учетом влияния только вязкого трения:

$$K_{дв}(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta M(s)} = \frac{k_{дв}}{T_{мв}s + 1}, \quad (9)$$

где  $k_{дв} = \frac{1}{2k_b \omega}$ ,  $T_{мв} = J k_{дв}$ .

Показано, что влияния момента трения на логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАХ) силовой части приводов малой мощности и большой мощности сильно отличаются. Модель привода малой мощности с учетом сухого трения имеет повышенный коэффициент передачи и пониженную собственную частоту по сравнению с базовой моделью, а для привода большой мощности, где сухое трение в ИМ применением специальных мер было снижено в несколько раз оказалось, что оно почти не влияет на систему.

С учетом вязкого трения получаем совершенно другие результаты: соответствующая модель привода большой мощности имеет пониженный

коэффициент и повышенную собственную частоту по сравнению с базовой моделью. Чем больше рабочая скорость, тем сильнее это влияние. Модель малой мощности с учетом вязкого трения очень мало отличается от базовой модели, даже при большой угловой скорости.

Важнейшим результатом является то, что аналитические представления функцией  $M_{ст}(\omega)$  и  $M_{вт}(\omega)$  позволяют исключить их из разряда независимых воздействий и учесть в изменяемой структуре силовой части ЭМС

Исследованы частотные характеристики моделей «УЗ – ИМ» и разомкнутой ЭМС с учетом влияния сухого и вязкого трения. Изменение момента инерции ИМ  $J_2$  заметно влияет на величину  $v_{\Pi}$  и  $\zeta_{\Pi}$  модели "УЗ-ИМ". Увеличение  $J_2$  делает модель объекта управления более склонной к колебаниям, особенно в зоне малых угловых скоростей вращения  $\omega_2$ . Показано, что их параметры соответствуют аналогу – модели привода и механизма подачи станков. Выявлена специфика динамики таких устройств. Отмечено, что изменением значений  $J_2$  и передаточного отношения  $j$  можно результаты исследований распространить как на редукторные, так и безредукторные системы электропривода. Показано, что их параметры соответствуют аналогу – модели привода и механизма подачи станков. Выявлена специфика динамики таких устройств.

**Третья глава** посвящена разработке элементов модели ПСП в среде DS88. Были разработаны и созданы модели релейного транзисторного регулятора тока со следящим принципом управления и блока линейного и нелинейного воспроизведения функций  $M_{ст}(\omega)$  и  $M_{вт}(\omega)$  в исполнительном механизме. Расчет параметров регулятора выполнен с учетом времен включения и отключения транзисторов. Кроме них, использовались стандартные блоки усилителя мощности с широтно импульсной модуляцией при постоянной частоте коммутации, двигателя, упругого звена и других элементов системы. Построенная модель релейного контура управления током (РКТ) имеет собственное время переходного процесса  $t_{\Pi} \approx 0,22$  мс и частоту коммутации в

стационарном динамическом режиме  $f_k \approx 6,66$  кГц. В ШИП с постоянной частотой коммутации аналогичные параметры:  $t_{\Pi} \approx 5$  мс и  $f_k = 1,0$  кГц.

Анализ гармонического состава тока при работе РКТ в стационарном автоколебательном несимметричном режиме показал, что для аналитического исследования динамических режимов этой модели приемлем метод гармонической линеаризации. Амплитуда третьей гармоники тока равна 11%, следовательно, хорошо выполняются условия «гипотезы фильтра».

**В четвертой главе** представлены результаты аналитических исследований нескольких моделей ЭМС различной структуры, с целью проверки адекватности их поведения с натурными испытаниями физических аналогов.

1. Двухконтурной системы подчиненного управления упругой ЭМС с релейным контуром управления током и предварительным аналоговым пропорциональным (П) регулятором и линеаризованными функциями  $M_{CT}(\omega)$  и  $M_{BT}(\omega)$  в исполнительном механизме. В контуре управления скоростью использован аналоговый ПИ регулятор с замыканием системы «по валу» двигателя.

2. Той же модели, но с блоком нелинейных функций  $M_{CT}(\omega)$  и  $M_{BT}(\omega)$  в исполнительном механизме.

3. Той же модели, что и в п. 2, но с ШИП и аналоговыми ПИ регуляторами в контурах управления током и скоростью.

4. Той же модели, что и в п. 2, но с замыканием контура скорости по выходу исполнительного механизма.

5. Той же модели, что и в п. 2, но с реализацией в контуре управления током аналогового ПИ регулятора.

6. Трехконтурной системы подчиненного управления с цифровым П. регулятором в контуре положения и остальной частью ЭМС, как в п. 2.

Результаты аналитического эксперимента, проведенного при изменении угловой скорости  $\omega_2$  (от 0,25 рад/с до 100 рад/с) и  $\Delta\varphi$  (от 1 рад до 5 рад) при

изменениях приведенного момента инерции ИМ  $J_2 = 0,2J_1$  и  $J_2 = 1,0J_1$  подтвердили основные теоретические выводы и представлены в диссертации.

### Заключение

1. Оптимизация позиционных приводов должна выполняться не только с учетом ограничений параметров электродвигателя, но и основных динамических параметров исполнительного механизма (ИМ). Причем ограничения по ускорению и «рывку» для ИМ должны определяться независимо от ограничений по моменту (току) и их производным для вентильных и коллекторных машин постоянного тока.

2. Известные математические модели сил (моментов) сухого трения не использованы при аналитических исследованиях динамики ЭМС ввиду сложности их линеаризации. Поэтому в диссертации предложены две новые математические модели моментов сухого трения в виде нелинейных функций от частоты вращения. Достоверность этих зависимостей подтверждена сравнением результатов их расчета с экспериментальными данными.

Получены условия линеаризации характеристик моментов сухого и вязкого трения и разработана методика определения пределов отклонений (аргумента) угловой скорости ИМ, позволяющие гарантировать заданную погрешности линеаризации этих функций.

3. Введено понятие «обобщенный объект управления», обоснованное тем, что предложенные модели моментов сухого и вязкого трения принципиально изменяют структуру ЭМС и исключают эти воздействия из категории «независимых внешних возмущений». На основе этого понятия получена математическая модель разомкнутой упругой электромеханической системы (ЭМС) в виде двух переключаемых структур. Определены условия линеаризации и переключения отдельных структур, как функций угловой скорости исполнительного механизма  $\omega_2$

4. Анализ частотных характеристик линеаризованной разомкнутой системы «двигатель - упругое звено – исполнительный механизм (обобщенный



объект управления)» при вариации  $\omega_2$  позволил установить нижеследующее.

Сухое и вязкое трение не влияют на величину собственной частоты  $\nu_{\Pi}$  и значение постоянной времени  $\tau$  модели "упругое звено - исполнительный механизм", но существенно изменяют ее коэффициент демпфирования  $\zeta_{\Pi}$ . В разомкнутой и замкнутой ЭМС их влияние будет другим: сухое трение увеличивает изменения частоты  $\nu_{\Pi}$  при вариациях  $J_2$ , а вязкое трение демпфирует эти вариации. При этом изменяются и условия устойчивости ЭМС. Установлено, что в области низких скоростей работы ЭМС, когда сильно влияние момента сухого трения, возможно возникновение "островка" устойчивости, при различии демпфирования в упругой части и изменении  $J_2$  механизма. Физических причин такого аномального явления в модели ЭМС найти не удалось.

5. Выполнен анализ аналоговых и дискретных моделей построения усилителей мощности (УМ) со следящей релейной системой управления контуром тока якоря двигателя. В среде DS88 построена модель релейного контура управления током (РКТ) и ШИП с постоянной частотой коммутации.

6. В пакете DS88 построено несколько оригинальных моделей упругих электромеханических систем (ЭМС) с обобщенным объектом управления (ОУ), различными системами автоматического управления и различными схемами построения усилителей мощности.

Создана методика аналитического исследования динамических характеристик упругих замкнутых ЭМС, позволяющая оценить различия структур их регуляторов, принципов управления и построения УМ и влияния сухого или вязкого трений в объекте.

7. Подтверждена достоверность предложенного представления характеристики сухого трения и метода ее линеаризации сравнением следующих динамических показателей линеаризованных и нелинейных моделей исполнительных механизмов ЭМС: собственных частот колебаний

$v_{\text{упо}}$ , длительностей переходных процессов  $t_{\text{п}}$  при заданных внешних воздействиях -  $l(t)$ , значений перерегулирования  $\sigma\%$  и т.п.

8. Выполнено исследование замкнутой по скорости вращения и по углу поворота вала двигателя упругой ЭМС с релейным контуром управления током (РКТ) и с силовой частью ШИП-Д и обобщенным (линеаризированным или нелинейным) ОУ. Проведена сравнительная оценка динамических характеристик ЭМС с РКТ, где реализовано следящее по току управление частотой коммутации УМ, и с ШИП, где частота коммутации постоянна.

Сравнением различных динамических параметров этих ЭМС доказано, что система ШИП-Д с подчиненным управлением током двигателя обладает существенно более «линейными» свойствами, чем привод с РКТ.

Проведено исследование влияния на динамику упругой ЭМС способов замыкания главной обратной связи по выходу (валу) двигателя или конечному звену – валу исполнительного механизма. Выполнен анализ различий влияния на системы сухого и вязкого трения и вариаций приведенного момента инерции механизма  $J_2$ .

Результаты анализа позволили расширить представления о физических свойствах таких ЭМС.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ковчин.С.А., Мубеези-Магоола. Э. Дж. Математические модели исполнительных механизмов с сухим и вязким трением //В кн. «Проблемы машиноведения и машиностроения»: Межвуз. сб. Вып22. – СПб.: СЗПИ, 2001. – С.10 – 22.

2. Курмашев А.Д., Мубеези-Магоола Э. Дж. Математическая модель релейного контура тока //В кн. «Проблемы машиноведения и машиностроения»: Межвуз. сб. Вып. 22-СПб СЗТУ, 2001-С.83-89.

3. Kovchin S.A., Mubeezi Magoola A. J., Undarov S.A. Simulation of moments of dry and viscous friction in electromechanical systems /Proc. "Nordic Network for Multi Disciplinary Optimised Electric Drives. Summer Seminar at Skagen. 12-14 Aug. 2001".- Aalborg: Aalborg University, 2001.