

ЭНЕРГИЯ ИННОВАЦИЙ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ – 2023

ПРОЕКТ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ
«РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ УПРУГОЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»
(для электромеханических профилей направления
«Электроэнергетика и электротехника»)

И.С. Полющенко

к.т.н., инженер

ООО НПО «Рубикон – Инновация» (г. Смоленск)

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель учебного пособия:

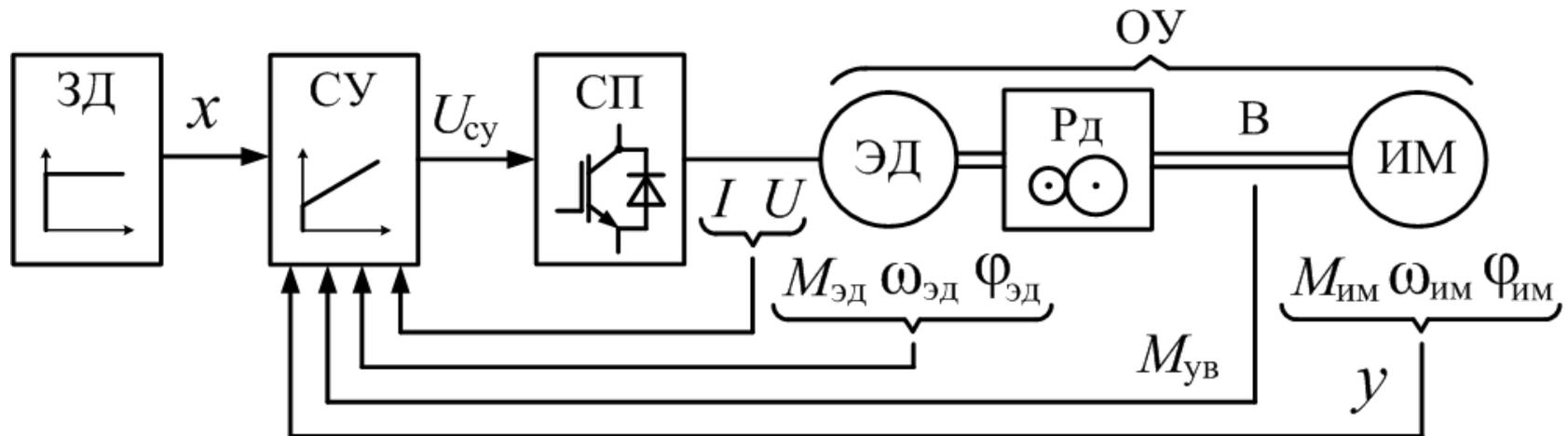
Расширение **профессионального кругозора** студентов, обучающихся на электромеханических профилях бакалавриата и магистратуры направления «Электроэнергетика и электротехника», **как будущих инженеров**, связанных с разработкой и применением разнообразного электротехнического и электромеханического оборудования.

Задачи учебного пособия:

- **Систематизировать** изложение материала в форме **направленной эволюции** электромеханической системы.
- **Разнообразить** типовое содержание изучаемых дисциплин **полезными концепциями**, включающими проблемы, цели, задачи, математический аппарат и корпус технических решений.
- **Усовершенствовать** математическую подготовку в области Теории автоматического управления.
- **Дать детальное математическое** описание проблемы управления, задач управления и способов их решения.
- **Сформировать компетенции** для решения задач анализа и синтеза.

ЭМС КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Электромеханическая система (ЭМС) – это система, осуществляющая обратимое преобразование **электрической энергии и механической энергии** с целью **управления её движением**. В ЭМС осуществляется **скоординированное протекание** физических и управляющих процессов. Она и её объект управления ОУ состоят из разнообразных электротехнических, электронных, электромеханических, механических и управляющих элементов, имеющих коэффициенты передачи и постоянные времени, которыми определяются **статические и динамические свойства**.

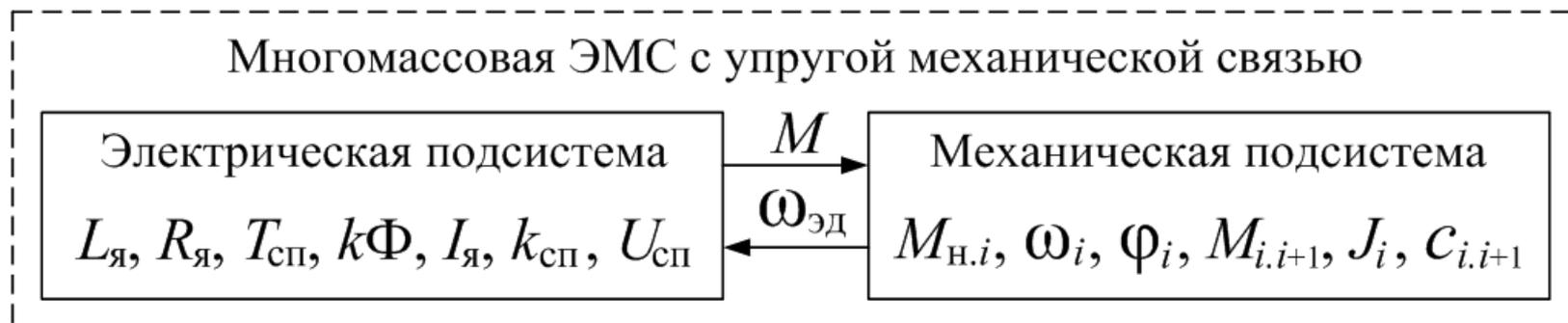


Функциональная схема ЭМС с упругой механической частью

ЭМС КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Эквивалентная масса исполнительного механизма ИМ упругой ЭМС может **перемещаться относительно ротора** электрического двигателя ЭД в пределах **упругих деформаций** вала. Каждая масса имеет собственную мгновенную скорость и к ней приложены собственные мгновенные значения моментов. При **жёсткой механике** вращающаяся масса ротора ЭД и вращающаяся масса ИМ рассматриваются **как единое целое**.

Причина возникновения **упругих электромеханических колебаний** в многомассовой ЭМС – это **взаимное влияние** протекания электрических и механических процессов из-за наличия **момента упругого взаимодействия** движущихся масс и действия **электромеханической связи**.



Обобщённая структурная схема ЭМС с упругой механической частью

ПРОБЛЕМА СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДИКИ ОБРАЗОВАНИЯ

Техническая проблема: Разнообразие систем электроприводов и производственных механизмов, которые **требуют детального учёта** физических процессов и **применения** специфических и нетривиальных технических решений **для обеспечения** точности, динамики и показателей качества автоматического управления движением.

Методическая проблема: Содержание курсов дисциплин «Теория электропривода» и «Системы управления электроприводов» **не имеет** всего многообразия технических решений, требующихся **для полноценной профессиональной деятельности**, часто ограничиваясь типовой тематикой.



Преимственность изучения дисциплин с 1 до 8 семестра бакалавриата

ПРОБЛЕМА СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДИКИ ОБРАЗОВАНИЯ

Задача анализа (Почему сделано именно так? Что происходит? Почему это происходит? Что может происходить?):

- **Наблюдая** движение ЭМС или результаты компьютерного моделирования, **объяснить** его протекание, а именно, продолжительность, колебательность, динамические нагрузки, точность, воздействие возмущающих факторов.
- **По описанию** ЭМС в форме дифференциальных уравнений, передаточных функций, структурных схем **определить**, с какой **целью** были применены те или иные технические решения, а также **охарактеризовать** статику и динамику ЭМС при различных задающих и возмущающих воздействиях.



Значение Теории автоматического управления для задач анализа и синтеза

ПРОБЛЕМА СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДИКИ ОБРАЗОВАНИЯ

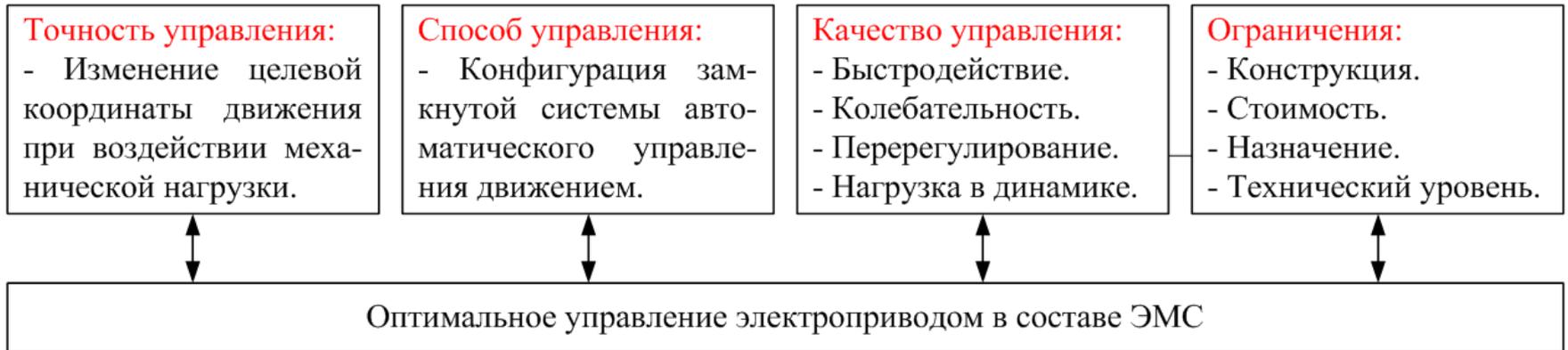
Задача синтеза (Что надо делать? Зачем надо делать? Как надо делать?):

- В зависимости от конструкции ЭМС и требований к ней **определить круг технических решений** для **выполнения этих требований**, оценив при этом необходимость и возможность их коррекции и изменения конструкции.
- **Определить приемлемость** применения технических решений с учётом средств их реализации, осуществляющих сбор и обработку информации, а также захват и генерирование сигналов.
- **Выявить** возможные **противоречия** между требованиями к ЭМС и исходными данными для разработки.
- **Оценить осуществимость** исходных требований либо доказать обратное.
- **Доказывать** свою правоту, убедительно и аргументировано **обосновывая применение** технических решений и средств их осуществления, а также описывая ход разработки.
- **Осуществить детализацию** технических решений при их осуществлении.
- **Критически оценить** результат разработки и степень достижения исходных требований.

ПРОБЛЕМА СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДИКИ ОБРАЗОВАНИЯ

Анализ и синтез жёсткой ЭМС по стандартному содержанию дисциплин:

- **Однотипное детерминированное** математическое описание ЭМС.
- **Формализованная последовательность** синтеза для любых параметров ОУ.
- ЭДС вращения электрического двигателя считается возмущающим воздействием и **формально не учитывается**.
- **Детерминированность регуляторов** – их коэффициенты индивидуально и независимо корректируют параметры объекта управления.
- **Критерий настройки** – максимальное быстродействие при максимальном демпфировании колебаний.



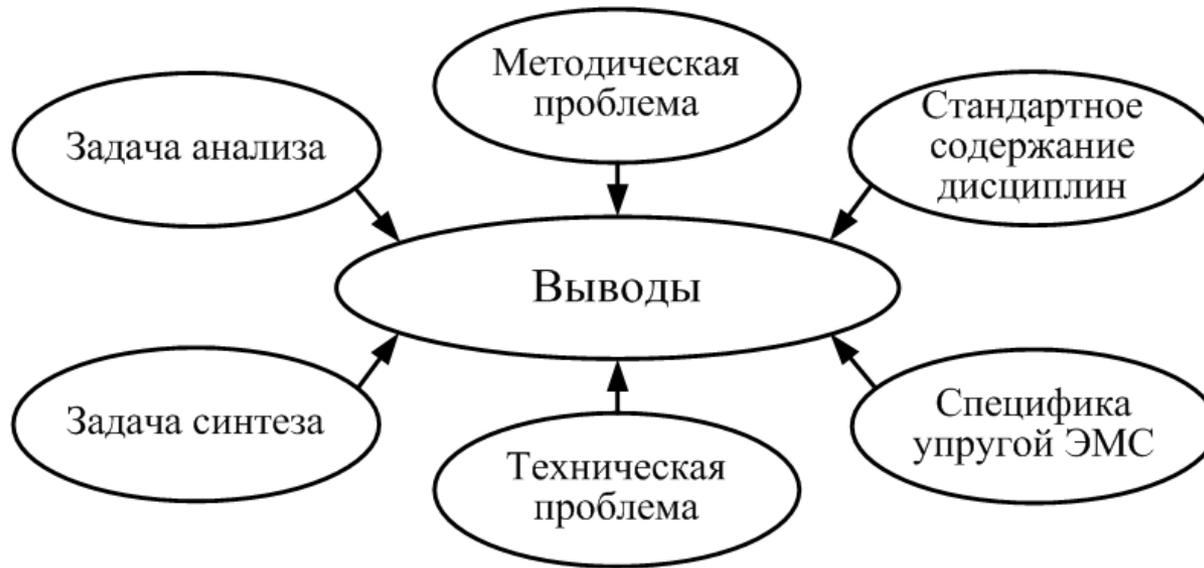
Достижение оптимального управления ЭМС

ПРОБЛЕМА СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДИКИ ОБРАЗОВАНИЯ

Особенности автоматического регулирования координат упругой ЭМС:

- **Разнообразие ЭМС**, в которых проявляются упругие свойства.
- **Взаимосвязь** конструкции ЭМС, характеристик технических средств управления и критериев настройки.
- Значительное количество **промежуточных координат**.
- Наличие **момента упругого взаимодействия** между массами.
- Необходимость учёта **электрохимической связи**.
- Сравнительно сложное **математическое описание**.
- **Влияние** количественных характеристик и величин параметров объекта управления на **эффект от применения** технических решений.
- Нетривиальность и разнообразие **критериев оптимальности движения**.
- Критерий настройки – **лучшей вариант из возможных** для достижения.
- **Ограниченные возможности** применения **подчинённого регулирования** и клишированных технических решений.
- **Яркое противоречие** точности, быстродействия и качества регулирования.
- Необходимость **детального учёта** электромагнитных процессов и электрохимических процессов.

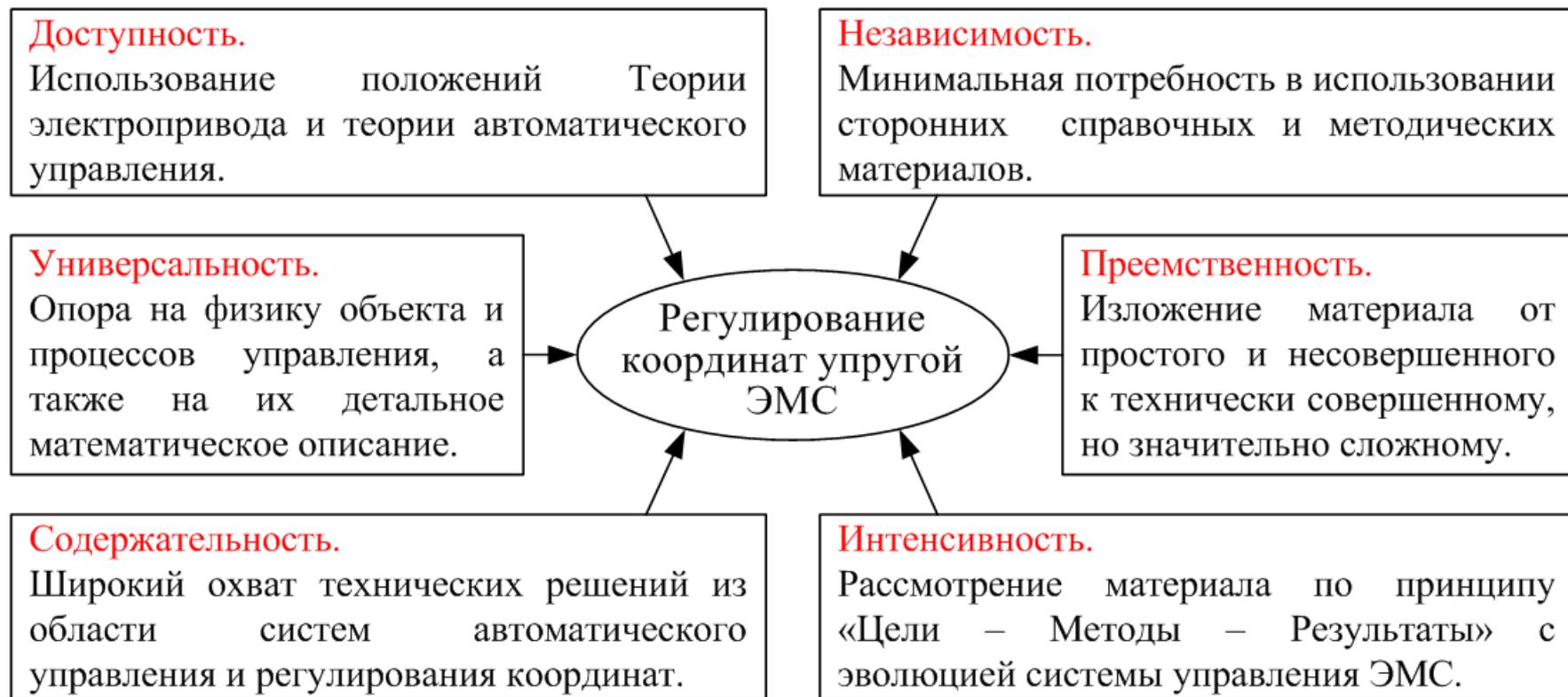
ПРОБЛЕМА СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДИКИ ОБРАЗОВАНИЯ



Выводы:

- **Невозможно полноценное решение** задач анализа и синтеза упругой ЭМС из-за незнания физических основ, математического аппарата и аппарата методологии регулирования координат упругих ЭМС.
- **Методы анализа и синтеза** ЭМС с жёсткой механикой в **полной мере не распространяются** на ЭМС с упругой механикой.
- Теория автоматического управления **позволяет получить** полноценное решение задач анализа и синтеза, но она **изучается недостаточно**.

КОНЦЕПЦИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ



Концепция, содержание и методология учебного пособия

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Движение разомкнутой ЭМС, в том числе, обладающей упругими электромеханическими свойствами описывается следующей **передаточной функцией** по управляющему воздействию:

$$W_p(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{B_m(\{q_i\})(p)}{A_n(\{q_i\})(p)}$$

где $\{q_i\}$ – параметры **объекта управления**; A_n и B_m – коэффициенты характеристического полинома; n и m – порядки полиномов $A_n(p)$ и $B_m(p)$, причём $n > m$; $x(p)$ – входной задающий сигнал; $y(p)$ – целевая координата.

Статическая механическая характеристика разомкнутой упругой ЭМС:

$$y_p(M) = y_{0p} - \mu_p(\{q_i\})M$$

где y_{0p} – заданное значение **целевой координаты**; μ_p – коэффициент её изменения при изменении нагрузки M , зависящий от параметров ЭМС.

От коэффициентов полиномов $A_n(p)$ и $B_m(p)$ **зависят динамические свойства** ЭМС, а от коэффициента μ_p **зависят статические свойства** ЭМС при действии механической нагрузки.

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Целью синтеза ЭМС является разработка её **системы автоматического управления**, быстродействие, точность, колебательность, подверженность действию нагрузки которой задаются **взаимно независимо** и **независимо от свойств ОУ**. **Решение задачи анализа** основано на материалах синтеза.

Для **достижения поставленной цели** синтеза необходимо скорректировать все коэффициенты полиномов $A_n(p)$ и $B_m(p)$, заменив их полиномами $C_k(p)$ и $D_h(p)$, чтобы должным образом **обеспечить расположение нулей и полюсов** передаточной функции замкнутой ЭМС. Кроме того, требуется скорректировать коэффициент μ_p , заменив его коэффициентом μ_3 , чтобы повысить жёсткость статической механической характеристики.

Передаточная функция **замкнутой упругой ЭМС** по управляющему воздействию, которая **должна быть получена** при решении задачи синтеза:

$$W_3(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{C_k(\{q_i\}, \{v_j\})(p)}{D_h(\{q_i\}, \{v_j\})(p)}$$

где $\{v_j\}$ – параметры корректирующих элементов; k и h – порядки полиномов $C_k(p)$ и $D_h(p)$, причём $h > k$, $h \neq n$, $k \neq m$.

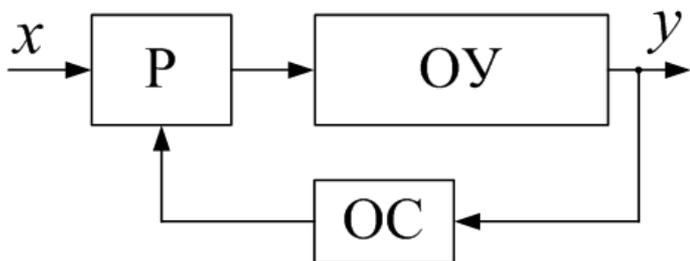
СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Статическая механическая характеристика замкнутой упругой ЭМС, которая должна быть получена в результате синтеза:

$$y_3(M) = y_{03} - \mu_3(\{q_i\}, \{v_j\})M$$

где y_{03} – заданное значение **целевой координаты**; μ_3 – коэффициенты, зависящие от параметров ЭМС и корректирующих элементов, $\mu_p > \mu_3$.

При **решении задачи синтеза** коэффициенты полиномов $C_k(p)$ и $D_h(p)$, а также коэффициент μ_3 могут быть **независимо заданы** через параметры $\{v_j\}$ таким образом, чтобы **обеспечить статические и динамические свойства** ЭМС, **задаваемые произвольно**, но с учётом физических ограничений.



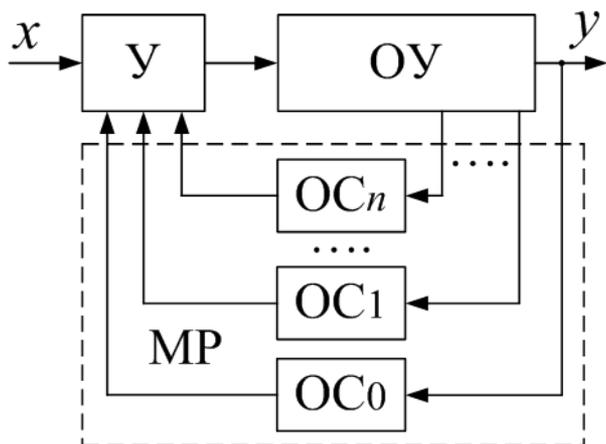
Замкнутая система с последовательной коррекцией

П-регулятор: $W_{\text{п}}(p) = k_{\text{п}}$

ПИ-регулятор: $W_{\text{пи}}(p) = \frac{k_{\text{п}}p + k_{\text{и}}}{p}$

ПИД-регулятор: $W_{\text{пид}}(p) = \frac{k_{\text{д}}p^2 + k_{\text{п}}p + k_{\text{и}}}{p}$

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ



Замкнутая система с
параллельной коррекцией или
модальным управлением

Модальный регулятор:

$$W_{\text{мр}}(p) = k_{\text{ос0}} + k_{\text{ос1}}p + \dots + k_{\text{осn}}p^n$$

Реализация последовательного регулятора **ограничена** ПИД-формой. **Реализация** параллельного и модального регуляторов **ограничена** вычислением производных высших порядков и **измеримостью** внутренних координат ЭМС, которые им пропорциональны.

Достижение заявленной цели **синтеза** системы автоматического управления упругой ЭМС имеет **специфику**:

- **Ограничение** применения различных технических решений и устройств, **обусловленное конструкцией и стоимостью**.
- Оно **не всегда требуется** в полном объёме в зависимости от назначения ЭМС и **достаточности её технического уровня**.

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Проблемы синтеза системы автоматического управления упругой ЭМС, которые ограничивают достижение заявленной цели:

- Коэффициентов передаточной функции **значительно больше**, чем имеет жёсткая ЭМС.
- Регуляторы должны иметь **много корректирующих составляющих**, что **осложняет и ограничивает** их осуществимость.
- Регуляторы требуют **сложной процедуры** синтеза и практики настройки.
- Промежуточные координаты могут быть **сложны для измерения**.
- Регуляторы **комплексно, неоднозначно и противоречиво влияют** на коэффициенты передаточной функции, а также могут не влиять на них по отдельности.
- Требуется **ограничение** промежуточных координат.
- Влиянием ЭДС вращения **нельзя пренебречь**, так как она **является причиной** протекания процессов в объекте управления.
- Требуется **комбинировать использование** средств последовательной и параллельной коррекции в **каждом из контуров** в порядке их подчинённости.

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Подходы к синтезу систем автоматического управления упругих ЭМС:

- Использование **электрохимической связи** для демпфирования колебаний.
- **Изменение конструкции механизма**, а именно, соотношения движущихся масс, передаточного числа редукторов, жёсткости связей между массами.
- Критерий настройки – **достижение лучшего из возможных** вариантов.
- **Введение дополнительных** последовательных и параллельных регуляторов в качестве корректирующих элементов.
- **Применение** различных регуляторов, обратных связей и замкнутых контуров **по отдельности и в сочетании**.



«Эволюция» систем управления упругой ЭМС

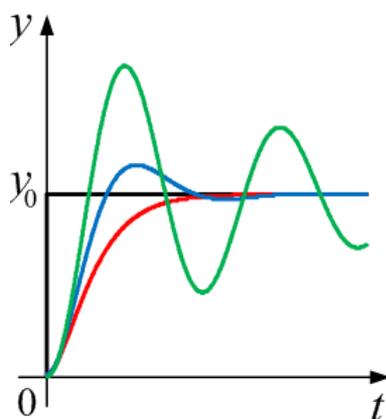
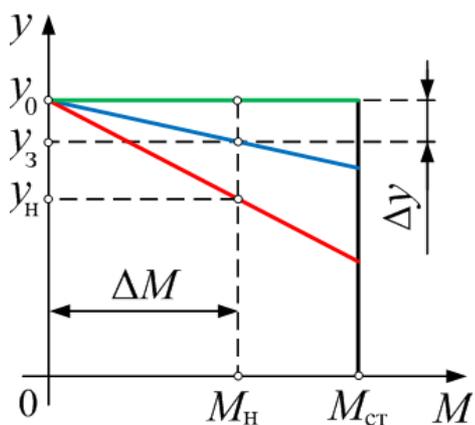
СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ



СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Результат синтеза системы регулирования координат упругой ЭМС с учётом ограничений и подходов к решению этой задачи:

- Возможна **недостижимость** заданных показателей статики и динамики.
- Возможна **необходимость** изменения параметров объекта управления.
- Решение **достижимо при некотором диапазоне** параметров объекта ОУ.
- **Компромисс** между **статическими** (точностью) и **динамическими** (быстродействие и колебательность) свойствами.
- Более **полное решение** задачи синтеза требует **большого усложнения** системы автоматического управления.
- **Более простая** система автоматического управления **менее совершенна**.
- Возможно **ограничение физической реализуемости** системы управления.

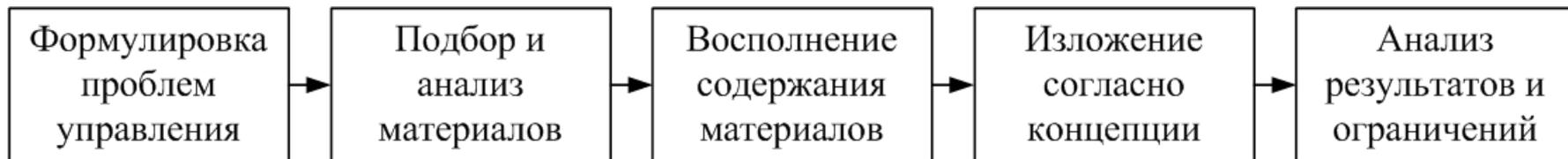


Противоречие между
точностью и качеством
управления и достижение
компромисса между ними

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ



Содержательность, актуальность и значимость учебного пособия



Последовательность написания главы учебного пособия

КОНЦЕПЦИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

СОДЕРЖАНИЕ			
Введение.....	4		
Глава 1. Электромеханическая система как объект управления.....	6		
Глава 2. Динамика разомкнутой двухмассовой упругой электромеханической системы.....	24		
Глава 3. Демпфирование упругих колебаний в разомкнутой электромеханической системе.....	40		
Глава 4. Последовательная коррекция упругой электромеханической системы.....	51		
Глава 5. Последовательная коррекция упругой электромеханической системы при астатическом регулировании.....	64		
Глава 6. Параллельная коррекция упругой электромеханической системы.....	73		
Глава 7. Упругая электромеханическая система с модалым управлением.....	84		
Глава 8. Двухдвигательная электромеханическая система с модалым управлением.....	97		
Заключение.....	119		
Приложение 1.....	121		
Приложение 2.....	122		
Литература.....	127		

3	<p>ГЛАВА 2. ДИНАМИКА РАЗОМКНУТОЙ ДВУХМАССОВОЙ УПРУГОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</p> <p>В упругой электромеханической системе также как и в одновмассовой ЭМС существует взаимное влияние её механической и электрической частей, что может быть использовано для демпфирования колебательных процессов. На рис.2.1 показана функциональная схема двухмассовой ЭМС, содержащая упругий элемент. Управление электрическим двигателем осуществляется по второй цепи путём использования управляемого преобразователя и регулятора Р с коэффициентом усиления, равным единице.</p> <p>Рисунок 2.1 – Функциональная схема двухмассовой электромеханической системы</p> <p>В качестве математического описания ЭМС будет использована структурная схема, приведенная на рис.2.2. Такая модель отражает динамические свойства ЭМС и при анализе методов теории автоматического управления позволяет выявить основные закономерности.</p> <p>Рисунок 2.2 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы</p> <p>Электромеханическая система на рис.2.2 является разомкнутой, так как не имеет обратной связи, позволяющей стабилизировать скорость движения второй инерционной массы. Потоки электрической энергии считаются постоянными.</p> <p>Считается, что управляемый преобразователь УП имеет большую полосу пропускания по сравнению с другим элементом ЭМС и поэтому описывается безынерционным звеном с коэффициентом усиления k_p. Момент инерции второй массы J_2 и жесткость механической связи c_1 привнесены к скорости вращения электрического двигателя. Сигнал задания скорости U_c является управляющим воздействием.</p> <p style="text-align: center;">24</p>	<p>$\gamma=2.0$ динамические нагрузки меньше по величине, чем при $\gamma=2.5$, во избежана длительность переходных процессов и колебательность ЭМС.</p> <p>Рисунок 2.6 – Графики переходных процессов при обработке сигнала задания скорости упругой электромеханической системой при различных коэффициентах распределения инерционных масс: 1) $\gamma=2.0$; 2) $\gamma=2.5$; 3) $\gamma=3.0$</p> <p>В соответствии с задачами, поставленными в начале главы 2, могут быть сделаны следующие выводы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Параметры ЭМС находятся во взаимной связи, но предельная степень демпфирования упругих колебаний и показатель колебательности зависят только от коэффициента распределения инерционных масс. Демпфирующая способность ЭМС снижается при увеличении привнесённого момента инерции нагрузкой, а ее колебательность при этом возрастает. 2. При любой величине коэффициента γ необходимо условием максимального демпфирующего действия электромеханической системы <p style="text-align: center;">37</p>	<p>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</p> <p>Рисунок П.2.1 – Модель ДПП НВ при управлении по второй цепи</p> <p>Рисунок П.2.2 – Модель двухмассовой механической части ЭМС с упругой связью</p> <p>Рисунок П.2.3 – Модель разомкнутой упругой электромеханической системы</p> <p>Рисунок П.2.4 – Модель упругой электромеханической системы с обратной связью по моменту электрического двигателя</p> <p style="text-align: center;">122</p>
---	--	--	---

Характеристика учебного пособия:

- 128 страниц, введение, 8 глав, 2 приложения, заключение.
- Качественное оформление и иллюстрации.
- Подробное математическое описание и формулировки.
- Самостоятельность каждой из глав при изложении материала.
- Примеры применения компьютерного моделирования.

Патент №2655723 Российская Федерация. Кл. Н02Р5/46, Н02Р5/50.
Полющенко И.С. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Способ автоматического регулирования координат взаимосвязанных электроприводов. Опубл. 30.05.2018. Бюл. №16.



ОЖИДАЕМЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Ожидаемые образовательные, практические и ментальные результаты:

1. Умение сформулировать и решить задачи анализа и синтеза систем автоматического управления движением.
2. Осознание, что задача либо имеет математическое решение с учётом физических свойств технических средств, либо имеет доказательство отсутствия решения при некотором сочетании параметров и показателей, требуемых для достижения.
3. Понимание взаимосвязей количественных и качественных показателей и характеристик систем управления движением.
4. Для нетривиальных результатов требуются нетривиальные решения.
5. Мотивация к самообучению и повышению профессионального уровня.
6. Повышение уровня подготовки и восполнение пробелов в ней.
7. Ознакомление с полезными техническими решениями и методиками их осуществления.
8. Перед тем, как решать задачу, определиться с тем, зачем её решать и как её решать, чтобы избежать многократного переделывания работы.
9. Формирование компетенций инженеров-электромехаников, как наиболее универсальных специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ключев В.И.** Теория электропривода: Учебник для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. **Задорожний Н.А.** Элементы теории электромеханического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими связями: Учебное пособие. – Часть 1. – Краматорск: – ДГМА, 2006. – 58 с.
3. **Терехов В.М.** Системы управления электроприводов: Учебник для вузов/В.М. Терехов, О.И. Осипов; Под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
4. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. – 392 с.
5. **Бургин Б.Ш.** Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем: Монография/Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1992. – 199 с.
6. **Тарарькин С.В.** Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами. – Иваново: ИГЭУ, 2000. – 212 с.
7. **Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А.** Синтез систем автоматического управления методом модального управления. – С-Пб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
8. **Терёхин В.Б.** Моделирование систем электропривода в *Simulink (Matlab 7.0.1)*: учебное пособие. Национальный исследовательский томский политехнический университет. – Томск: Издательство ТПУ, 2010. – 292 с.
9. **Патент №2655723** Российская Федерация. Кл. H02P5/46, H02P5/50. Полющенко И.С. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Способ автоматического регулирования координат взаимосвязанных электроприводов. опубл. 30.05.2018. Бюл. №16.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ