Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электропривод и автоматизация
промышленных установок и технологических комплексов»

Н.Н. Михеев

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Учебно-методическое пособие

Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов»

Н.Н. Михеев

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Учебно-методическое пособие
к курсовому проектированию

Минск 2009

УДК 621.-83:681.51
ББК 31.291
М 69

Р е ц е н з е н т ы :
П.П. Шардыко, Ю.Е. Ливщиц

Михеев, Н.Н.
М 69 Системы управления электроприводами: учебно-методическое пособие к курсовому проектированию / Н.Н. Михеев. – Минск: БНТУ, 2009. – 54 с.

ISBN 978-985-525-235-2.

В учебно-методическом пособии приводятся задание на курсовой проект, его содержание, пояснения к выполнению разделов и рекомендуемые этапы работы над проектом, требования к оформлению.

Предназначено для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы».

УДК 621.-83:681.51
ББК 31.291

ISBN 978-985-525-235-2

© Михеев Н.Н., 2009
© БНТУ, 2009

1. ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по дисциплине «Системы управления электроприводами» (СУЭП) является неотъемлемой частью в непрерывной подготовке специалистов по инженерному проектированию. Умение проектировать – важнейший практический выход приобретенных знаний в процессе обучения.

В соответствии с учебными планами и программами специальности предполагается, что студенты освоили общую методологию инженерного проектирования как сложного творческого процесса создания объекта, отличающегося новизной, полезностью и улучшенными техническими показателями. Для этого требуется достаточная широта знаний. Поэтому проектированием объекта, соответствующего специальности, можно заниматься только на заключительном этапе обучения: на старших курсах. Однако для умения проектировать требуется не только достаточный объем знаний, но и определенный опыт, который в известной мере может быть приобретен многократными упражнениями, выполняемыми последовательно на разных этапах обучения. Навыки проектирования осваиваются постепенно, от самых простых и общих объектов к более конкретным: конструктивным узлам механизмов, электрическим аппаратам и машинам и, наконец, к объекту специальности – электроприводу.

Особенность данного вида работы – ее самостоятельный и творческий характер, многовариантность решаемой задачи, необходимость преодолевать технические противоречия при отыскании наилучших решений.

Преподаватель, консультирующий проект, выступает в роли потенциального заказчика на объект проектирования. Очевидно, что данный курсовой проект, рассчитанный на семестр, может быть успешно выполнен только при непрерывной работе и регулярном общении с консультантом, начиная со дня выдачи задания.

Цель учебно-методического пособия – помочь студентам понять исходное задание на курсовой проект, выделить главные этапы работы над ним, учесть особенности такого объекта проектирования, каким является система управления электроприводом.

2. ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В курсовом проекте необходимо спроектировать СУЭП, которая при заданном типе и мощности двигателя, характере момента нагрузки и особенностях установки должна обеспечить требуемый технологический режим движения рабочего органа, дистанционное включение–отключение и защиту электропривода.

Исходные данные – тип и мощность двигателя, характер момента нагрузки, технологический режим и особенности установки – задает преподаватель-консультант.

Примеры технологических режимов движения рабочего органа:

– длительные режимы с произвольной скоростью в диапазоне D, с определенным коэффициентом использования по времени разных скоростей, с редкими пусками и торможениями;

– повторно-кратковременные режимы в диапазоне скоростей D с заданным временем использования низших скоростей, с частыми пусками и торможениями;

– многопозиционные перемещения рабочего органа с заданными скоростью перемещения и точностью остановок в каждой позиции;

– режимы слежения с заданными максимальными значениями скорости, ускорения и допустимой ошибки.

Момент нагрузки может быть активным или реактивным, неизменным или изменяющимся резко или плавно.

Установка может быть массового применения или специального назначения. Так как с конкретными типовыми промышленными установками и их электроприводами студенты знакомятся в последующих за СУЭП дисциплинах, то в данном курсовом проекте рабочая установка, для электропривода которой проектируется система управления, сознательно задается в абстрагированной форме, однако с техническими и технологическими характеристиками, соответствующими определенным классам реальных установок.

Выделим основные этапы проектирования СУЭП.

1. Уяснение цели разработки СУЭП на основе исходного задания.

2. Формулирование уточненного и согласованного с преподавателем (заказчиком) технического задания (ТЗ) на проектирование или требований, предъявляемых к данной СУЭП.

3. Выбор возможных решений, соответствующих предъявляемым требованиям.

4. Определение параметров объекта управления.

5. Принятие решения по выбору варианта СУЭП.

6. Расчет параметров, статистических и динамических характеристик для принятого варианта СУЭП.

7. Выбор элементов, разработка принципиальной схемы СУЭП и конструктивного исполнения ее отдельных узлов.

8. Оценка правильности принятых решений на основе анализа выполненных расчетов, схемных и конструктивных предложений.

Серьезное внимание следует уделить этапам *1* и *2*, пусть и кажущимся весьма простыми и очевидными. Без глубокого понимания этапа *1* теряет смысл само проектирование и его целенаправленность. В этапе *2* составляется ТЗ, которое является весьма важной частью проекта. По словам опытных проектировщиков, хорошо составленное ТЗ – это половина успеха в проекте. Сформулированное ТЗ или предъявляемые требования согласовываются с заказчиком. Техническое задание, с одной стороны, должно наилучшим образом обеспечивать исходные требования заказчика, а с другой стороны, быть выполнимым. Поэтому в процессе проектирования ТЗ может корректироваться, например, после этапа *5*.

СУЭП – сложное комплексное устройство, которое может различаться и по структуре, и по элементам (силовым и управляющим), и по конструктивному исполнению. Такое различие обусловливает огромное количество вариантов возможных решений, которые трудно обработать в рамках учебного курсового проектирования. Поэтому преподаватель-консультант может вводить ограничения на структурный, элементный или конструктивный уровни СУЭП с целью сужения задачи проектирования.

Объектом проектирования является сложное комплексное устройство – СУЭП, в состав которого входит устройство управления, аппаратно или программно вырабатывающее алгоритм управления, и устройство исполнения сформированного управляющего воздействия, называемое также силовой исполнительной частью СУЭП. Таким образом, СУЭП – это, с данной стороны, объединение электротехнических элементов, различных в функциональном и конструктивном отношениях. Функциональные свойства и способ объединения элементов определяют структуру СУЭП, от которой

зависят свойства электропривода в целом. С другой стороны, объединение элементов может быть различным и в конструктивном отношении. Одни и те же функциональные задачи могут выполняться элементами различных типов.

Итак, в составе СУЭП как объекте проектирования выделяют три стороны: структуру, элементную базу и конструкцию. Процесс проектирования СУЭП охватывает все ее три стороны. При этом большая взаимосвязь существует между структурой и элементной базой, между элементной базой и конструкцией, меньшая – между структурой и конструкцией.

Смысл проектирования состоит в создании объекта проектирования, в нашем случае СУЭП, превосходящего по качеству известные образцы. Поэтому понятие «качество» и его количественная оценка «показатель качества» приобретают первостепенное значение. Выбор того или иного одного качества или нескольких качеств для оценки объекта проектирования – важная задача, т. к. именно показатели качества наполняют смыслом выражения «хорошая СУЭП», «плохая СУЭП», «эта СУЭП лучше, чем та СУЭП». Таким образом, показатели качества служат для сопоставления вариантов и выбора из них лучших. В табл. 2.1 приведены примеры качества для СУЭП.

Таблица 2.1

Примеры качества для СУЭП

Качество	Показатели качества ПК
1	2
Быстродействие	$t_{пп1}$ – время переходного процесса, с; $\omega_п$ – обратная величина полосы пропускания, с
Степень демпфирования (плавность движения)	σ – перерегулирование выходной координаты; M – показатель колебательности
Регулируемость скорости	D^{-1} – обратная величина диапазона скоростей
Точность регулирования	δ – ошибка регулирования скорости или положения, рад/с или рад
Простота структуры СУЭП	n_K – число контуров; $n_Д$ – число датчиков

Окончание табл. 2.1

1	2
Простота элементной базы	$n_Э$ – число элементов силовых и управляющих
Надежность	λ – интенсивность отказов
Экономичность	ΔP, ΔW – потери мощности, энергии, Вт, Вт·с; $\cos^{-1}\varphi$ – обратная величина коэффициента мощности
Компактность конструкции	Масса, объем, габариты
Быстрота введения в эксплуатацию	t_Σ – суммарное время проектирования, изготовления, монтажа и наладки, ч
Стоимость	ц – результирующая цена

Элементы СУЭП могут характеризоваться не только конкретными параметрами и техническими показателями, но и свойствами, которые количественно можно условно оценить двумя логическими величинами «да» или «нет». В табл. 2.2 приведены примеры структур, силовых и управляющих элементов, конструктивного исполнения СУЭП и их технических показателей и свойств. Другие показатели СУЭП приведены в табл. 2.3, 2.4, 2.5.

Таблица 2.2

Примеры структур СУЭП с регулированием скорости двигателей

Тип структур		Технические показатели				Свойства	
		Число контуров	Число регуляторов	Диапазон регулирования	Полоса пропускания частот, $с^{-1}$	Наличие ограничений тока	Полная управляемость в малом
1	2	3	4	5	6	7	8
Структуры подчиненного регулирования	П-РС	2–3	2–3			Да	Нет
	ПИ-РС	2–3	2–3	∞		Да	Нет

Окончание табл. 2.2

1		2	3	4	5	6	7
Структуры модального управления		3	1			Нет	Да
Структуры с отсечками		2	2			Да	Нет
Структуры модального управления с отсечками		4	2			Да	Да
Структуры одноконтурные	ПД-РС						
	ПИД-РС	1	1	∞		Нет	Нет

Таблица 2.3

Примеры трехконтурных структур подчиненного регулирования следящего электропривода

Варианты регуляторов в контурах СУЭП			Точность и частотные показатели		
РП	РС	РТ	Ошибка по каналу управления	Ошибка по каналу момента нагрузки	Полоса пропускания СЭП, $с^{-1}$
П	П	ПИ			
ПИ	П	ПИ			
ПИД	П	ПИ			
П	ПИ	ПИ			
ПИ	ПИ	ПИ			
П	П	ПИ			
+дополнительное задание по скорости (комбинированное управление)					

Таблица 2.4

Примеры силовых управляемых преобразователей

Тип преобразователя		Технические показатели				Свойства	
		Полоса пропускания частот	КПД	Max коэф. мощности cos l	Время монтажа и включения	Наличие режима прерывания тока	Возможность регулирования энергии
Электромашинный (МГ)		$1/T_Г$	$\eta_М\eta_Г$	1	1–2 нед.	Нет	Да
Тиристорный постоянного тока (ТП)		$1/T_\mu$	$\eta_{ТР}\eta_В$	$\approx\cos\alpha$	1–2 раб. смены	Да	Да
Широтно-импульсный (ШИП)		$3/\pi\ f_Ш$	$\eta_{ТР}\eta_В^2$	≈ 1	Одна раб. смена	Да	Нет
Тиристорный переменного тока (ТПН)		$1/T_\mu$	$\eta_В$	$<\cos\alpha$	1–2 раб. смены	Да	Нет
Частотный с автономным инвертором		$1/T_d$	$\eta_{ТР}\eta_В^2$		1–2 раб. смены	Да	Да
Непосредственный частотный		$1/T_\mu$	$\eta_{ТР}\eta_В$		1–2 раб. смены	Да	Да
Комму-таторы	кон-тактный	1200 вкл./ч	1	1	Одна раб. смена	Нет	Да
	бескон-тактный	>60000 вкл./ч	1	1	1–2 раб. смены	Нет	Да

Примечание:
$T_Г > 0{,}5$ с – электромагнитная постоянная времени генератора;
$T_\mu = 7$–10 мс – малая постоянная времени;
$\eta_М$ – КПД мотора генератора;
$\eta_Г$ – КПД генератора;
$\eta_В$ – КПД вентильной группы;
$\eta_{ТР}$ – КПД трансформатора;
$f_Ш$ – частота модулятора ШИП, Гц;
T_d – постоянная времени выпрямленной цепи автономного инвертора, с.

Таблица 2.5

Примеры управляющих элементов

Тип элементов		Технико-экономические показатели		
		Наработка на отказ, ч	Время срабатывания*	Стоимость, тыс. руб.
Датчики скорости	аналоговые (ТГ)	3000	T = 1–5 мс	
	импульсные	8000	2π/N	
Датчики угла	аналоговые (сельсины, СКВТ)	3000		
	цифровые	10000	T > 0,1 мс	
Типовые	аналоговые (УБСР-АИ)	10000		
регуляторы	цифровые (УБСР-ДИ)	10000	100–800 нс	
Операционные усилители		20000		
Логические элементы		15000	10–70 нс	
Реле		1–8·10	1–100 мс	
Программируемые контроллеры			5 мс	

* Время срабатывания оценивается различно, как собственно время срабатывания для логических и релейных элементов, как период съема выходной информации T в цифровых датчиках или $2\pi/(N_{ДН}\omega_{min})$ в импульсных датчиках скорости, где $N_{ДН}$ – число импульсов на оборот, а ω_{min} – минимальная угловая частота вращения датчика. Для аналоговых датчиков время срабатывания можно оценить как постоянную времени фильтра $T_{Ф}$.

Следует подчеркнуть, что приведенные данные в строках и столбцах таблиц не претендуют на достаточную широту и должны рассматриваться как возможные, но незаконченные варианты, которые могут дополняться и корректироваться самим проектантом.

Конструктивное исполнение СУЭП зависит от типа выбранной элементной базы. Так, если в качестве регуляторов используются серийные, например, типа УБСР-АИ, УБСР-ДИ, то их конструктив определен в виде ячейки-платы, вдвигаемой также в известный конструктив-

ящик-кассету. Если используются регуляторы и блоки тиристорных электроприводов, например, серии БТУ, БС, то они выполнены в виде определенных плат, входящих в состав объединенной конструкции для всей системы управления. Однако типовые регуляторы строятся на элементах определенной серии, которые могут не устраивать проектанта по условиям, например, надежности, повышенного дрейфа нуля, необходимости использования дополнительных корректирующих средств и т.д. Кроме того, конструктивное исполнение блоков может не отвечать массогабаритным требованиям, а также требованиям эстетического вкуса проектанта. В этом случае для регуляторов предлагается свое конструктивное исполнение с использованием выбранных операционных усилителей. Полностью самостоятельно должно быть предложено конструктивное исполнение задающего технологический режим устройства.

Следует отметить, что конструкторская часть в проекте реального проектирования СУЭП может быть весьма значительной. При отыскании не худших решений по конструкции в настоящее время учитываются не только технические показатели качества, но и дизайн. Учитывая ограниченные возможности по объему курсового проектирования СУЭП, конструкторская часть может быть упрощена и представлена по усмотрению консультанта разработкой или выбором задающего устройства, защитной панели со схемой внешних соединений элементов платы и т.п.

3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Содержание проекта излагается в расчетно-пояснительной записке и графическом материале.

Расчетно-пояснительная записка состоит из восьми глав.

Введение. Постановка задачи.

1. **Требования к системе управления электроприводом.** Технические данные электродвигателя. Анализ исходного задания.Требования к системе управления электроприводом. Выбор принципиальной схемы главных цепей и структурной электрической схемы системы.

2. **Выбор системы электропривода.** Определение параметров главных цепей.

3. **Проектирование системы управления электроприводом.** Сравнение возможных вариантов и выбор структуры СУЭП. Математическое описание объекта управления. Определение передаточных функций и коэффициентов звеньев объекта управления. Выбор принципов реализации структуры СУЭП, выбор датчиков. Линеаризация системы управления. Синтез системы управления, ограничение координат. Выбор задающего устройства. Реализация управляющего устройства. Функциональная схема СУЭП.

4. **Анализ динамических и статических характеристик СУЭП.** Структурная схема системы управления. Статические характеристики системы, рабочие режимы СУЭП на статических характеристиках. Моделирование основных режимов СУЭП. Оценка динамических и статических показателей системы.

5. **Проектирование дискретной части системы управления, защиты и сигнализации.** Краткое описание работы схемы.

Заключение. Технические показатели СУЭП.

Литература. Список использованных литературных источников.

4. **ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТА**

Пояснительная записка оформляется на листах А4 формата. Графики в тексте, как правило, выполняются с масштабной сеткой. Параграфы, пункты, рисунки, таблицы, формулы нумеруются последовательно в пределах главы. Так, номер пункта состоит из порядковых номеров главы, параграфа и собственно пункта, разделенных точкой; номер рисунка (таблицы, формулы) состоит из порядкового номера главы и номера рисунка (таблицы, формулы) в пределах данной главы, также разделенных точкой. Например, «Рисунок 4.2 – Название», «Таблица 4.2 – Название», (4.2) – второй рисунок, вторая таблица, вторая формула четвертой главы. Под рисунком и над таблицей должно быть название рисунка (таблицы). Название главы записывается прописными («большими») буквами. Нумерация страниц сквозная: первой страницей является титульный лист, второй – задание на проектирование, третьей – оглавление («Содержание»). Номер страницы проставляется арабскими цифрами в правом верхнем углу. На титульном листе и задании номер страницы не указывается. В оглавление необходимо включить названия всех глав и параграфов.

Расчеты выполняются в Международной системе единиц СИ /1/, схемы – в соответствии с действующими нормативными документами, ГОСТами /2/.

Графический материал выполняется на 2 листах А1 формата:

– лист 1: принципиальная и функциональная схемы системы автоматического управления (САУ) электроприводом;

– лист 2: расчетные чертежи и графики (функциональная и структурная схемы, промежуточные характеристики, схема модели САУ, переходные процессы, статические характеристики).

5. УКАЗАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

В данном разделе указаны названия глав расчетно-пояснительной записки, параграфы и необходимая информация, которая должна быть изложена в этих разделах.

5.1. **Требования к системе управления электроприводом**

5.1.1. Технические данные электродвигателя

Приводятся полные технические данные двигателя, отмечаются его особенности с указанием источника информации. Технические данные двигателя необходимо представить в виде таблицы с указанием наименований параметров, их обозначений, единиц измерения и численных значений.

Недостающие данные необходимо рассчитать. По параметрам двигателя строятся естественные механические и электромеханические характеристики, при необходимости в четырех квадрантах. Для асинхронного двигателя расчет характеристик выполняется по параметрическим уравнениям.

На построенных характеристиках отмечаются характерные расчетные точки и точки, соответствующие каталожным данным.

5.1.2. Анализ исходного задания

Составляется кинематическая схема электропривода, на которой показываются основные элементы его механической части (электродвигатель, соединительные муфты, передаточный механизм, исполнительный механизм) и указываются их параметры в соответствии с заданием на проектирование (моменты, передаточные отношения, моменты инерции и инерционные массы, коэффициенты жесткости, скорости).

Выполняется анализ кинематической схемы и определяются приведенный статический момент, приведенный момент инерции, приведенная жесткость механической части электропривода. Составляется расчетная схема механической части электропривода. Выполняется оценка упругости механической части электропривода

и обосновывается рассмотрение системы как одномассовой или двухмассовой.

Определяются приведенные моменты нагрузки на валу электродвигателя в различных режимах работы и строятся области работы в статическом режиме в четырех квадрантах в осях – угловая скорость-момент.

В соответствии с основным уравнением электропривода определяются

динамические моменты электропривода в различных режимах и строятся области работы электропривода в динамике в четырех квадрантах в осях угловая скорость-момент, указываются пределы изменения скорости и момента.

По построенным графикам областей работы электропривода предварительно определяются требуемый динамический момент, угловое ускорение, время пуска и торможения или время отработки заданного перемещения.

5.1.3. Требования к системе управления электроприводом

Формулируются требования к САУ электроприводом на основании задания на проектирование, данных электродвигателя и анализа ТЗ (диапазон регулирования скорости, закон управления, реверсивность скорости и момента, точность поддержания скорости в статике и динамике, требования к ускорениям при пуске и торможении, ограничение упругих колебаний и т.д.).

Указываются другие требования (простота и надежность, гибкость и удобство управления, простота контроля неисправностей, четкость действия в нормальных и аварийных режимах, удобство монтажа, эксплуатации и ремонта, минимальные размеры и стоимость, безопасность обслуживания, пожарная безопасность, устранение радиопомех и т.д.) и намечаются решения для выполнения этих требований.

5.1.4. Выбор принципиальной схемы главных цепей и структурной электрической схемы системы

Выбор принципиальной схемы главных цепей осуществляется на основании сформулированных требований, предъявляемых к системе

управления, необходимости обеспечения требуемых режимов работы, информации из литературных источников. Необходимо обратить внимание на обеспечение тормозных режимов и обосновать выбор способов торможения.

Структурная электрическая схема системы отражает: объект управления (преобразователь, двигатель, механическая часть привода), управляющее устройство, датчики обратных связей, устройства управления, устройства питания, устройства защиты.

Исходная функциональная схема САУ электроприводом составляется на основании анализа задания на проектирование, требований к САУ электроприводом и информации из литературных источников. Функциональная схема на этом этапе работы отражает только те решения, которые вытекают из анализа задания на проектирование, и одновременно указывает на все те вопросы, которые еще требуют своего решения. На этом этапе во всех случаях система рассматривается как одномассовая. Однако, намечается при необходимости в дальнейшем переход к двухмассовой модели. На функциональной схеме должно быть отражено дистанционное управление электроприводом, необходимые типы защиты и блокировок в том виде, в котором они могут быть сейчас указаны. Уточняются дальнейшие задачи проектирования.

5.2. **Выбор системы электропривода**

На основании составленной функциональной схемы рассчитываются и выбираются элементы преобразователя (трансформаторы, анодные реакторы, фильтры, силовые вентили, система управления преобразователем, необходимые элементы, обеспечивающие торможение, например, тормозной резистор).

При выбранных элементах и известных их параметрах определяются параметры главных цепей: электромеханическая постоянная времени электропривода, электромагнитная постоянная времени главной цепи, электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения, постоянная времени преобразователя, характеристика «вход-выход» преобразователя, коэффициент усиления преобразователя, имеющиеся нелинейности.

5.3. **Проектирование системы управления электроприводом**

*5.3.1. **Сравнение возможных вариантов и выбор структуры СУЭП***

Выбор структуры СУЭП выполняется на основании требований к системе управления: диапазона регулирования, точности поддержания скорости в статических и динамических режимах, с учетом характера изменения нагрузки и параметров системы (например, изменение момента инерции электропривода).

При этом предполагается и выбор необходимых звеньев, обеспечивающих компенсацию нелинейностей системы или адаптацию к изменяющимся условиям работы.

*5.3.2. **Математическое описание объекта управления***

Составляется полная система дифференциальных уравнений объекта управления с отражением нелинейностей и изменения параметров. Система дифференциальных уравнений преобразуется в операторные уравнения. Операторные уравнения приводятся к виду, соответствующему последовательности формирования управления.

*5.3.3.**Определение передаточных функций и коэффициентов звеньев объекта управления***

По операторным уравнениям составляются передаточные функции динамических звеньев объекта управления, определяются коэффициенты и постоянные времени звеньев объекта управления.

Строится структурная схема системы управления без указания численных значений настроек и ограничений управляющего устройства.

*5.3.4. **Выбор принципов реализации структуры СУЭП, выбор датчиков***

Принимается и обосновывается решение по реализации управляющего устройства – аппаратная на операционных усилителях и других устройствах, реализация программная, цифровая аппаратная и т.д.

5.3.5. Линеаризация системы управления

Обосновывается и выбирается режим при котором необходимо выполнить линеаризацию системы управления. Система дифференциальных и операторных уравнений преобразуется в системы линейных дифференциальных и операторных уравнений. Определяются параметры линеаризованной системы управления. Строится структурная схема линеаризованной системы управления.

5.3.6. Синтез системы управления, ограничение координат

Синтез системы управления выполняется по задающему воздействию, а в случае необходимости и по возмущающему по линеаризованной структурной схеме. В случае многоконтурной системы подчиненного управления синтез выполняется поконтурно с изображением каждого контура и обоснованием допущений и упрощений в структурной схеме. Определяются уставки ограничений регуляторов и предусматриваются возможности настройки ограничений в требуемом диапазоне.

Составляется полная структурная схема с указанием передаточных функций всех динамических звеньев, нелинейнейностей, параметров системы.

5.3.7. Выбор задающего устройства

Обосновывается и выбирается способ задания регулируемой координаты (аналоговое потенциометрическое, цифровое, программное и т.д.), а также устройство задания (потенциометр, сельсинное устройство и т.д.). Обязательно принимается решение по фиксации и контролю за задаваемым сигналом.

5.3.8. Реализация управляющего устройства

Выбираются элементы, реализующие синтезированные регуляторы, элементы компенсации нелинейностей и устройств ограничения (резисторы, конденсаторы, операционные усилители и т.д.). Коэффициенты и постоянные времени определяются в соответствии с выбранными номиналами элементов.

5.3.9. Функциональная схема СУЭП

На основании выполненного синтеза системы и ранее составленной предварительной функциональной или структурной электрической схемы составляется полная функциональная схема, отражающая все принятые решения и разъясняющая работу спроектированной системы. Дается описание работы функциональной схемы системы управления.

5.4. **Анализ динамических и статических характеристик СУЭП**

Анализ статических и динамических характеристик выполняется по полной структурной схеме системы управления.

5.4.1. Статические характеристики

Записывается система уравнений в установившемся режиме, из которой получают уравнения, в частности, статических механических и электромеханических характеристик системы. Выполняется расчет и построение характеристик во всех используемых квадрантах в заданном диапазоне скоростей. На статические характеристики наносятся все характерные рабочие режимы СУЭП (пуск, торможение и т.д.). Точность поддержания заданной скорости в заданном диапазоне показывается на графиках в увеличенном масштабе с указанием численных значений.

5.4.2.Моделирование основных режимов работы СУЭП

Моделирование основных режимов работы СУЭП проводится с помощью программы *Matlab*, а именно пакета *Simulink*. В соответствии с полной структурной схемой системы управления составляется имитационная модель в программе *Matlab*.

Обозначение звеньев, параметры, ограничения на структурной схеме модели должны соответствовать обозначениям и значениям на полной структурной схеме системы. Отдельные узлы системы могут быть представлены подсистемами. При этом приводятся структурные схемы моделей подсистем. При необходимости даются

пояснения к реализации модели системы. Указываются полностью моделируемый режим, условия моделирования и приводятся графики изменения переменных в логической последовательности в одинаковом масштабе времени.

Приводятся в увеличенном масштабе графики переходных процессов по выходной координате с указанием численных показателей переходного процесса. Дается оценка динамических и статических показателей системы.

Проводится анализ работы системы, т.е. описание работы системы по выполненным графикам.

Делается заключение о показателях переходных процессов системы, их соответствия заданию.

5.5. **Проектирование дискретной части системы управления, защиты и сигнализации**

Полная функциональная схема дополняется дискретной частью системы управления (коммутирующие аппараты, кнопки управления и другие аппараты, осуществляющие подачу команд на включение, отключение, изменения направления движения системы управления электроприводом). Вводятся устройства защиты и определяются их уставки.

Дается полное краткое описание работы схемы.

5.6. **Заключение**

Дается характеристика спроектированной системы управления электроприводом и приводятся основные технические данные системы: диапазон регулирования, точность поддержания скорости в статических и динамических режимах, показатели, характеризующие пуско-тормозные режимы, массогабаритные показатели, показатели надежности и т.д.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

6.1. Определение параметров электродвигателя постоянного тока

Номинальный ток двигателя постоянного тока независимого возбуждения

$$I_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}\eta} - I_{\text{ВН}},$$

где $P_{\text{Н}}$ – номинальная мощность двигателя;

$U_{\text{Н}}$ – номинальное напряжение двигателя;

η – КПД двигателя;

$I_{\text{ВН}}$ – номинальный ток возбуждения двигателя.

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{Н}}}{\omega_{\text{Н}}},$$

где $\omega_{\text{Н}}$ – номинальная частота вращения двигателя.

Сопротивление якоря двигателя

$$R_{\text{ДВ}} = \frac{U_{\text{Н}}(1-\eta)0{,}5}{I_{\text{Н}}}.$$

Если в справочной литературе приводится сопротивление якоря двигателя при пониженной температуре t°, например, при 15 ºС, то сопротивление приводится к температуре, соответствующей рабочему режиму (как правило к 75 ºС):

$$R_{\text{ДВ } 75^{\circ}\text{C}} = [1+\alpha_t(75^{\circ} - t^{\circ})]R_{\text{ДВ } 15^{\circ}\text{C}},$$

где α_t – температурный коэффициент сопротивления, для меди α_{ρ} = = 4,3·10 град$^{-1}$.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{XX} = I_{Н}(1-\eta)05 - \frac{U_{ВН}}{U_{Н}} I_{ВН},$$

где $U_{ВН}$ – номинальное напряжение возбуждения двигателя;

$I_{ВН}$ – номинальный ток возбуждения.

Конструктивная постоянная двигателя

$$c_e = \frac{U_{Н} - I_{Н} R_{ДВ}}{\omega_{Н}} = \frac{e_{Н}}{\omega_{Н}},$$

где c_e – номинальная ЭДС двигателя.

Индуктивность якоря двигателя

$$L_{ДВ} = \frac{kU_{Н}}{p\omega_{Н} I_{Н}},$$

где k = 0,5 – 0,6 – для некомпенсированных машин;

k = 0,1 – для компенсированных машин;

p – число пар полюсов.

Электромагнитная постоянная якоря двигателя

$$T_{ДВ} = \frac{L_{ДВ}}{R_{ДВ}}.$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя

$$T_{М\,ДВ} = \frac{J_{ДВ} R_{ДВ}}{c_e^2},$$

где $J_{ДВ}$ – момент инерции двигателя.

Электромагнитная постоянная времени возбуждения

$$T_{В} = \frac{L_{В}}{r_{В}},$$

где $L_{В} = 2pW_{В}^2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta I_{В} W_{В}}$ – индуктивность обмотки возбуждения;

$W_В$ – число витков обмотки возбуждения на полюс;

$\Delta I_В W_В$ – приращение магнитодвижущих сил обмотки возбуждения на полюс, соответствующее приращению потока на $\Delta Ф$;

$r_В$ – сопротивление обмотки возмущения.

6.2. **Выбор системы электропривода**

При выборе схемы двухкомплектного реверсивного преобразователя и способа управления группами вентилей необходимо обратиться к результатам анализа областей работы системы управления электроприводом в статических и динамических режимах. Если система управления электроприводом работает при малых значениях тока нагрузки или в режиме холостого хода, то система управления должна уменьшить влияние режима прерывистого тока на качество управления. При этом возможно или применение одного из вариантов системы совместного управления группами вентилей или применение преобразователя с раздельным управлением группами вентилей и с применением средств линеаризации или адаптации системы в режиме прерывистого тока.

6.3. Определение параметров главных цепей

*6.3.1. **Краткая характеристика преобразователя***

Для выбранной схемы и способа управления преобразователем необходимо

указать особенности, которые необходимо учитывать при дальнейшем проектировании.

Определяется ЭДС условного холостого хода тиристорного преобразователя

$$E_{d0} = (U_Н + \Delta U_{СД} + \Delta U_{УР} + \Delta U_Т + \Delta U_К + \Delta U_{Тр} + \Delta U_{СП})k_c,$$

где $U_Н$ – номинальное напряжение двигателя;

$\Delta U_{СД} = (0{,}005 \div 0{,}01)U_Н$ – падение напряжения на активном сопротивлении сглаживающего дросселя;

$\Delta U_{УР} = (0{,}005 \div 0{,}01) U_Н$ – падение напряжения на активном сопротивлении уравнительных реакторов;

$\Delta U_Т = 2(U_0 + r_Д I_Н)$ – падение напряжения на двух тиристорах (для мостовой схемы):

$\Delta U_0 = (1{,}35 \div 1{,}55) U_{кл}$ – напряжение спрямления характеристики тиристора ($U_{КЛ}$ = 1 В – классификационное падение напряжения средней группы);

$r_Д = \dfrac{(0{,}2 \div 0{,}3) U_{кл}}{I_Н}$ – динамическое сопротивление тиристора;

$\Delta U_к$ – коммутационное падение напряжения;

$\Delta U_{Тр}$ – падение напряжения на активном сопротивлении силового трансформатора;

$\Delta U_{СП}$ – падение напряжения на соединительных проводах и контактах;

k_c = (1,05÷1,1) – коэффициент, учитывающий колебания напряжения сети на 5–10 %.

*6.3.2. **Расчет и выбор силового трансформатора***

Определение напряжения вторичной обмотки трансформатора. Вторичное напряжение трансформатора определяется из соотношений связывающих ЭДС условного холостого хода и анодное напряжение.

Для трехфазной мостовой схемы (вторичная обмотка включена по схеме *звезда*):

$$E_{d0} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_{m\Phi 2} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{6\sqrt{3}}{2\pi} U_{m\Phi 2}.$$

Откуда

$$U_{\Phi 2} = E_{d0} \frac{2\pi}{6\sqrt{6}}.$$

При соединении вторичной обмотки по схеме *зигзаг* соотношения сохраняются.

Для однофазной мостовой схемы

$$E'_{d0} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_{m\Phi 2}\sin\vartheta d\vartheta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 .$$

Откуда

$$U_2 = E'_{d0}\frac{\pi}{2\sqrt{2}},$$

где $U_{m\Phi 2}$, $U_{\Phi 2}$ – амплитуда и действующее значение фазного напряжения;

U_2 – действующее значение линейного напряжения;

$\vartheta = \omega t$ – текущее значение угла открытого состояния вентиля.

Для однофазных схем выпрямления при определении необходимого значения ЭДС условного холостого хода преобразователя необходимо учитывать также условие управляемости выпрямителя, из которого следует:

$$\sqrt{2}U_2\sin\vartheta_{0\min} = E_{d0}\cos\vartheta_{0\min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2\cos\vartheta_{0\min} = E_{d0} .$$

Откуда

$$\mathrm{tg}\vartheta_{0\min} = \frac{2}{\pi}; \qquad \vartheta_{0\min} = \mathrm{arctg}\frac{2}{\pi} .$$

Тогда

$$U_2 = \frac{E_{d0}}{\sqrt{2}\sin\vartheta_{0\min}} = \frac{E'_{d0}\cos\vartheta_{0\min}}{\sqrt{2}\sin\vartheta_{0\min}} = \frac{E'_{d0}}{\sqrt{2}\mathrm{tg}\vartheta_{0\min}},$$

где $\vartheta_{0\min} = \alpha_{0\min}$ – минимальный угол открывания вентилей, при котором сохраняется управляемость выпрямителя в режиме прерывистого тока;

E'_{d0} – ЭДС условного холостого хода однофазного мостового выпрямителя при $\vartheta_0 = \alpha = 0^\circ$.

Действующее значение вторичного тока трансформатора

$$I_{\Phi 2} = K_{\text{СХ}} K_i I_{\text{Н}},$$

где $K_{\text{СХ}} = \dfrac{I_2^{/}}{I_{\text{Н}}}$ – коэффициент, учитывающий отношение действующего значения вторичного тока к среднему значению тока нагрузки при идеальном сглаживании;

K_i = 1,1 – коэффициент, учитывающий неидеальное сглаживание тока нагрузки.

Для трехфазной мостовой схемы

$$K_{\text{СХ}} = \frac{I_{\Phi 2}^{/}}{I_{\text{Н}}} = \sqrt{\frac{2}{3}},$$

где
$$I_2^{/} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} I_{\text{Н}}^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_{\text{Н}}^2 2\frac{2\pi}{3}} = I_{\text{Н}}\sqrt{\frac{2}{3}}.$$

$$I_1 = \frac{I_2}{K_{\text{ТР}}} = \frac{1}{K_{\text{ТР}}}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left[\left(\frac{2}{3}I_{\text{Н}}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}I_{\text{Н}}\right)^2\right]d\vartheta} =$$

$$= \frac{1}{K_{\text{ТР}}}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left[\left(\frac{2}{3}I_{\text{Н}}\right)^2\frac{2\pi}{3} + \left(\frac{1}{3}I_{\text{Н}}\right)^2\frac{4\pi}{3}\right]}.$$

Для трехфазной нулевой схемы

$$K_{\text{СХ}} = \frac{I_2^{/}}{I_{\text{Н}}} = \sqrt{\frac{1}{3}},$$

где

$$I_2^{/} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} I_{\text{Н}}^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_{\text{Н}}^2 \frac{2\pi}{3}} = I_{\text{Н}}\sqrt{\frac{1}{3}}.$$

Для однофазной мостовой схемы $K_{СХ} = 1$,

где

$$I_2^{/} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} I_Н^2 d\vartheta} = I_Н .$$

Действующее значение первичного тока

Для трехфазной мостовой и однофазной мостовой схем:

$$I_1 = \frac{I_2}{K_{ТР}} ,$$

где $K_{ТР} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{E_2}$ – коэффициент трансформации.

Определение мощности трансформатора. Мощность вторичных обмоток трансформатора

$$S_2 = mU_{2Ф} I_{2Ф} .$$

Мощность первичных обмоток трансформатора

$$S_1 = mU_{1Ф} I_{1Ф} .$$

Типовая мощность трансформатора

$$S_Т = \frac{S_1 + S_2}{2} .$$

Выбор трансформатора осуществляется по первичному напряжению, вторичному напряжению и типовой мощности. Выбранный трансформатор проверяется по вторичному току. Приводятся полные технические данные трансформатора. Выполняется расчет недостающих данных трансформатора.

Активное сопротивление фазы трансформатора

$$R_{\text{ТФ}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}}}{m I_{2\text{Н}}^2} \quad \text{или} \quad R_{\text{ТФ}} = \frac{U_{\text{Ф}2} e_a^{\%}}{I_{2\text{Н}} 100\%},$$

где $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания трансформатора;

$I_{2\text{Н}}$ – номинальный вторичный фазный ток трансформатора;

$e_a^{\%}$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора (можно считать $e_a^{\%} = \frac{1}{3} e_{\text{КЗ}}^{\%}$; $e_{\text{КЗ}}^{\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора).

Полное сопротивление фазы трансформатора

$$Z_{\text{ТФ}} = \frac{U_{2\text{Ф}}}{I_{2\text{Н}}} \frac{e_{\text{КЗ}}^{\%}}{100\%}.$$

Индуктивное сопротивление фазы трансформатора

$$X_{\text{ТФ}} = \sqrt{Z_{\text{ТФ}}^2 - R_{\text{ТФ}}^2}.$$

Индуктивность фазы трансформатора

$$L_{\text{ТФ}} = \frac{X_{\text{ТФ}}}{\omega}.$$

При выборе трансформатора необходимо учитывать величину уравнительного тока ($I_{\text{УР}} \approx 0{,}1 I_{\text{Н}}$), т.е. мощность трансформатора должна быть увеличена.

Питание тиристорных преобразователей, выполненных по мостовым схемам выпрямления, может осуществляться без индивидуального трансформатора. Возможны также случаи группового питания тиристорных преобразователей от одного трансформатора. В таких преобразователях применяют анодные реакторы. Анодные реакторы уменьшают взаимное влияние преобразователей при коммутации вентилей, а также ограничивают аварийные токи, которые выполняются воздушными, т.к. они не должны насыщаться при токах короткого замыкания.

Реакторы выбираются по номинальному току $I_{РН} > I_{Ф2}$ и должны иметь индуктивное сопротивление Ха такое же, как у силового трансформатора с e_a = 5–10 %.

6.3.3. **Выбор силовых вентилей**

Выбор вентилей осуществляется по току и напряжению. Нагрузочная способность вентилей определяется максимально допустимой температурой полупроводниковой структуры, которая не должна превышаться в любых режимах работы. Нагрев вентиля зависит от значения и формы тока, а также от условий охлаждения.

В паспортных данных на тиристоры указывается максимально допустимое среднее за период значение тока $I_П$, длительно протекающего через прибор в классификационной схеме – однофазной однопериодной с активной нагрузкой при частоте 50 Гц, синусоидальной форме тока, угле проводимости 180º и максимально допустимой температуре полупроводниковой структуры, при заданном охладителе и условиях охлаждения. В реальных преобразователях угол проводимости отличается от классификационного и форма тока близка к прямоугольной. В табл. 6.1 даны значения коэффициентов $K_Ф = I_Д / I_{СР}$ и $K_А = I_{МАХ}/I_{СР}$, для синусоидальной и прямоугольной форм тока, где $I_Д$ – действующее значение тока, $I_{МАХ}$ – максимальное значение тока, $I_{СР}$ – среднее значение тока через прибор.

Таблица 6.1

Синусоидальная форма тока			Прямоугольная форма тока		
λ, º	$K_Ф$	$K_А$	λ, º	$K_Ф$	$K_А$
180	1,57	3,14	180	1,41	2
120	1,87	4,19	120	1,73	3
90	2,22	6,28	90	2,0	4
60	2,77	10,7	60	2,45	6
30	3,99	23,3	30	3,46	12

Можно считать, что тиристор будет иметь максимально допустимую температуру, если действующее значение тока, протекающего через тиристор, будет равно действующему значению тока в классификационной схеме

$$I_{СР} K_{ФСХ} = I_{П} K_{ФКЛ},$$

где $K_{ФСХ}$ – коэффициент формы тока для рассматриваемой схемы;

$K_{ФСХ}$ – классификационный коэффициент формы тока;

$I_{П} = I_{НАГР} / m$ – среднее значение тока вентиля;

$I_{НАГР}$ – расчетный ток нагрузки (при частых пусках принимается равным $I_{НАГР} = 2I$), в расчетный ток нагрузки при выборе тиристоров включается дополнительно уравнительный ток $I_{УР} = 0{,}1 I_{Н}$.

При выборе тиристора необходимо определить значение предельного тока в приборе для заданной схемы, соответствующее классификационной схеме с учетом условий охлаждения

$$I_{П} = \frac{K_{ФСХ}}{K_{ФКЛ}} K_{ОХЛ} I_{СР},$$

где $K_{ОХЛ}$ – коэффициент, учитывающий изменение допустимого тока в зависимости от условий охлаждения.

Определяется максимально допустимое мгновенное значение напряжения, прикладываемого к тиристору:

$$U_{П} = U_{МЛ} K_{Н},$$

где $U_{МЛ}$ – максимальное значение вторичного линейного напряжения (ЭДС) трансформатора;

$K_{Н}$ = (1,3–1,5) – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможность возникновения перенапряжения на тиристорах.

По предельному значению тока и максимально допустимому напряжению выбираются тиристоры при условиях охлаждения, соответствующих расчету:

$$I_{П} \geq I_{ПРАС}; \qquad U_{П} \geq U_{ПРАС}.$$

Приводим все необходимые технические данные тиристора.

Проверяются выбранные тиристоры по допустимой величине потерь в тиристоре при расчетных условиях охлаждения

$$\Delta P_{СХ} \le \Delta P_{КЛ} ,$$

где $\Delta P_{СХ} = U_0 I_{СР} + K_{Ф}^2 I_{СР}^2 r_{Д}$ – величина потерь в тиристоре рассматриваемой схемы;

$\Delta P_{КЛ} = U_0 I_{П} + K_{Ф}^2 I_{П}^2 r_{Д}$ – величина потерь в тиристоре в классификационной схеме при расчетных условиях охлаждения.

6.3.4. ***Расчет и выбор уравнительных реакторов***

Эффективное значение уравнительного тока

$$I_{УР} = \frac{U_{maxД}}{\omega L_{УРК}} K_{Д} ,$$

где $L_{УК} = L_{УРК} + L_{ТРК}$ – индуктивность уравнительного контура;

$L_{УРК}$ – индуктивность уравнительных реакторов, включенных в уравнительный контур;

$L_{ТРК}$ – индуктивность фаз трансформатора, включенных в уравнительный контур;

$К_{Д}$ – коэффициент, определяемый видом преобразования и углом регулирования, задается величиной уравнительного тока, учитывая запас по току тиристоров и трансформатора (обычно $I_{УР} \approx 0{,}1 I_{Н}$).

Для заданной схемы преобразователя определяется количество уравнительных реакторов, тип реакторов – насыщающегося или ненасыщающиеся, количество фаз трансформатора, входящих в контур уравнительного тока.

Определяем коэффициент $K_{Д}$ в зависимости от схемы преобразователя и диапазона регулирования.

Определяем требуемую индуктивность уравнительного контура

$$L_{УК} = \frac{U_{maxД}}{\omega I_{УР}} K_{Д} .$$

Определяется требуемая индуктивность уравнительных реакторов в контуре

$$L_{\text{УР К}} = L_{\text{УК}} - L_{\text{УР}}.$$

При использовании насыщающихся реакторов индуктивность реактора, по которому протекает ток нагрузки, принимается равной нулю. При использовании частично насыщающихся реакторов индуктивность реактора принимается $L'_{\text{УР}} = 0{,}7L_{\text{УР}}$.

Выбирается тип реактора по току $I_{\text{РЕАК}} \geq I_{\text{РЕАК_РАСЧ}}$ и величины индуктивности $L_{УР} \geq L_{\text{УЗ}_{\text{РАС}}}$, где $I_{\text{РЕАКЗ}_{\text{РАС}}} = I_{\text{Н}} + I_{\text{УК}}$.

Выписываются технические данные реактора.

Определяется величина уравнительного тока при использовании выбранных уравнительных реакторов

$$I_{\text{УР}} = \frac{U_{max\,\text{Д}}}{\omega L_{\text{УК}}} K_{\text{Д}}.$$

Определяются величины токов через тиристоры и фазы трансформатора с учетом уравнительного тока.

*6.3.5. **Выбор сглаживающего дросселя***

Пульсации выпрямленного тока увеличивают действующее значение тока якоря и вызывают в связи с этим повышенные тепловые потери; являются причиной пульсаций поперечного поля якоря и приводят к повышенным потерям на перемагничивание железа; ухудшают коммутацию двигателя, т.к. даже в установившемся режиме $dI/dt = 0$; пульсации поперечного тока якоря приводят к повышенному шуму при работе двигателя; являются причиной режима прерывистого тока, в котором электропривод имеет существенные нелинейности.

Для уменьшения пульсаций применяют дополнительный сглаживающий дроссель. Однако с целью экономии стремятся обойтись без сглаживающего дросселя, применяя многофункциональные схемы выпрямления и двигатели, предназначенные для работы от вентильных преобразователей. При этом двигатели должны иметь достаточно большую индуктивность якоря (избегают применения

компенсационных обмоток), полюсы или статор в целом выполняются шихтованными.

Считается приемлемым коэффициент формы тока

$$K_{\text{Ф}} = I_{\text{ДЕЙСТВ}} / I_{\text{Н}} < 1{,}2 .$$

Определяется требуемую постоянную времени электрической цепи из условий ограничения зоны прерывистого тока

$$T = \frac{K_{\text{ГР}}}{i^{*}_{\text{ГРmax}}},$$

где $K_{\text{ГР}}^{*} = i_{\text{ГРmax}}\, T = \text{const}$ – постоянный коэффициент схемы выпрямления:

$K_{\text{ГР}} = 2{,}9 \cdot 10^{-4}$с – для трехфазной мостовой схемы;

$K_{\text{ГР}} = 12{,}5 \cdot 10^{-4}$с – трехфазной нулевой схемы;

$K_{\text{ГР}} = 7{,}5 \cdot 10^{-4}$с – для трехфазной мостовой полууправляемой;

$K_{\text{ГР}} = 32{,}0 \cdot 10^{-4}$с – для однофазной мостовой полууправляемой;

$K_{\text{ГР}} = 55{,}0 \cdot 10^{-4}$с – для однофазной мостовой симметричной.

$$i^{*}_{\text{ГРmax}} = \frac{I_{\text{ГРmax}}}{I_{\text{б}}},$$

где $I_{\text{ГР max}}$ – абсолютное наибольшее значение граничного тока;

$I_{\text{б}} = U_m / R_{\text{П}}$ – базовое значение тока;

U_m – максимальное значение анодного напряжения;

$R_{\text{П}} = R_{\text{ДВ}} + 2R_{\text{ФТР}} + R_{\text{СП}} + R_{\text{ДР}}$ – активное сопротивление якорной цепи в граничном режиме (в режиме прерывистого тока).

Определяется требуемая индуктивность якорной цепи

$$L_{\text{П}} = T\text{R}_{\text{П}}$$

и требуемая индуктивность сглаживающего дросселя

$$L_{\text{ДР}} = L - L_{\text{Я}} - 2L_{\text{ТР}} - L_{\text{УР}}$$

Выбирается сглаживающий дроссель по величине индуктивности и току. Приводим технические данные дросселя. При необходимости уточняем активное сопротивление дросселя.

Индуктивность якорной цепи определится

$$L = L_{ДР} + 2L_{ТР} + L_{Я}.$$

Определяем активное сопротивление якорной цепи в режиме непрерывного тока

$$R = R_{ДВ} + 2R_{ФТР} + R_{ДР} + R_{СП} + R_{К},$$

где $R_{К} = X_a m / 2\pi$ – коммутационное сопротивление.

Определяем активное сопротивление якорной цепи в режиме прерывистого тока

$$R_{П} = R - R_{К}.$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи в режиме непрерывного тока

$$T = L/R.$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи в режим прерывистого тока (граничный режим)

$$T_{П} = L / R_{П}.$$

Действующее значение переменной составляющей тока нагрузки при номинальном моменте двигателя

$$I_{f\,ПР} = \frac{E_{d0}}{R_{П}} \frac{1}{\omega T} \sqrt{\sigma},$$

где $E_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{Л2}$ – условная ЭДС холостого тока преобразователя;

$\sigma = \sum_{k} \frac{U_{km}^2}{2k^2}$ – удельная относительная величина дополнительных потерь от переменной составляющей тока:

U_{km} – амплитуда k-й гармоники выпрямленного напряжения;

k – номер гармоники.

Определяем коэффициент пульсаций тока

$$K_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{Н}}} = \frac{22 I_{f\,\text{ПР}}}{I_{\text{Н}}},$$

где $I_{\max}$ – максимальное значение пульсирующего тока нагрузки;

$I_{\min}$ – минимальное значение пульсирующего тока нагрузки.

Определяем коэффициент формы тока нагрузки

$$K_{\Phi} = \sqrt{1 + \frac{I_{f\,\text{ПР}}^2}{I_{\text{Н}}^2}} = \sqrt{1 + \frac{K_i^2}{8}}.$$

Определяется коэффициент использования двигателя по току

$$K_i = \sqrt{1 - \frac{I_{f\,\text{ПР}}^2}{I_{\text{Н}}^2}} = \sqrt{1 - \frac{K_i^2}{8}} = \sqrt{2 - K_{\Phi}^2}.$$

Определяем электромеханическую постоянную времени привода в режиме непрерывного тока

$$T_{\text{М}} = \frac{J_{\text{ПР}} R}{c^2},$$

где $J_{\text{ПР}}$ – момент инерции привода.

Определяем электромеханическую постоянную времени привода в режиме прерывистого тока

$$T_{\text{М}\Pi} = \frac{J_{\text{ПР}} R_{\Pi}}{c^2}.$$

*6.3.6. **Определение параметров преобразователя***

При выборе системы импульсно-фазового управления с линейным опорным напряжением

$$U_{\text{ОП}} = U_{\Pi} \frac{t}{T_{\text{И}}} = U_{\Pi} \frac{\omega t}{\omega T_{\text{И}}} = U_{\Pi} \frac{1}{\omega T_{\text{И}}} \alpha.$$

где U_{Π} – напряжение на входе интегратора;

$T_{\text{И}}$ – постоянная времени интегрирования.

Формирование угла открывания определяется соотношением

$$U_{\text{ОП}} = \frac{U_{\text{П}}}{\omega T_{\text{И}}}\alpha = U_{\text{У}}^{/} = 3{,}18\alpha ,$$

тогда

$$\alpha = \frac{1}{3{,}18}U_{\text{У}}^{/} = 0{,}31(U_{\text{У}} + U_{\text{СМ}}) .$$

При выборе начального угла согласования характеристик в выпрямительном режиме $\alpha_{\text{Н}} = \pi / 2$, что соответствует $U_{\text{У}} = 0$, тогда

$$U_{\text{СМ}} = \frac{\alpha_{\text{Н}}}{0{,}31} .$$

Строим регулировочную характеристику $\alpha = f(U_{\text{У}})$.

$$\alpha = 0{,}31(U_{\text{У}} + U_{\text{СМ}}) .$$

Опорное напряжение синхронизированно с точкой естественного отрывания вентиля.

Принимаем $U_{\text{П}}$ = 10 В, диапазон изменения угла открывания $\alpha = 0 \div \pi$.

Тогда

$$U_{\text{ОП}} = \frac{U_{\text{П}}}{\omega T_{\text{И}}}\pi .$$

Откуда

$$T_{\text{П}} = \frac{U_{\text{П}}\pi}{U_{\text{ОП}max}\omega} .$$

Принимаем $C_{\text{И}} = 1 \cdot 10^{-6}$ Ф,

тогда $$R_{\text{И}} = \frac{T_{\text{И}}}{C_{\text{И}}} .$$

Регулировочная характеристика выпрямителя

$$E_d = E_{d0}\cos\alpha$$

Регулировочные характеристики преобразователя $E_d = f(U_{\text{У}})$

$$E_d = E_{d0}\cos\alpha = E_{d0}\cos[0{,}31(U_{\text{У}} + U_{\text{СМ}})]\,.$$

Строим зависимость статического коэффициента усиления в функции $U_{\text{У}}$

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{E_{di}}{U_{\text{У}}}\,.$$

α, °	30	60	90	120	150	180	210	240	270
E_d, В									
$U_{\text{У}}$, В									
$\beta_{\text{ст}}$									

Строим зависимость динамического коэффициента усиления в функции $\Delta U_{\text{У}}$

$$\beta_{\text{дпр}} = \frac{\Delta E_d}{\Delta U_{\text{У}}}\,.$$

Определяем зависимость статического коэффициента усиления в функции $U_{\text{У}}$

$$\beta_{ст} = \frac{E_d}{U_{\text{У}}}\,,$$

Принимаем суммарную малую нескомпенсированную постоянную времени τ = 0,01 с.

6.4. **Проектирование системы управления электроприводом**

*6.4.1. **Сравнение возможных вариантов и выбор структуры СУЭП***

Наиболее применяемой в приводах постоянного тока является система подчиненного управления. При заданном диапазоне регулирования D и статизме характеристики $S_{\text{хзад}}$ необходимо выбрать астатическую, статическую или комбинированную систему подчиненного регулирования. Если по ТЗ требуется регулировать скорость выше номинальной, применяют двухзонную двухканальную структуру СУЭП, с каналом регулирования скорости и магнитного потока.

*6.4.2. **Математическое описание объекта управления***

Описание объекта управления при двухзонном подчиненном управлении имеет следующий вид:

$$\begin{cases} M - M_{\text{ст}} = J_{\Sigma}\dfrac{d\omega}{dt}, \\ E = iR + L\dfrac{di}{dt} + e, \\ M = ki\Phi, \\ e = k\Phi\omega, \\ E_{\text{в}} = i_{\text{в}}r_{\text{в}} + 2p_{\text{п}}w_{\text{в}}\xi\dfrac{d\Phi}{dt}, \\ 0 = i_{\text{вт}}r_{\text{вт}} + 2p_{\text{п}}w_{\text{вт}}\xi\dfrac{d\Phi}{dt}, \\ \Phi = f_{\Phi F}(F), \\ F = i_{\text{в}}w_{\text{в}} + i_{\text{вт}}w_{\text{вт}}, \\ E = E_{\text{о}}\cos\alpha, \\ \alpha = \dfrac{\pi}{U_{\text{пм}}}\left(U_{\text{у}} + U_{\text{см}}\right). \end{cases}$$

где M – электромагнитный вращающий момент двигателя, Нм;

$M_{ст}$ – статический момент нагрузки, Нм;

J_{Σ} – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг · м^2;

ω – угловая скорость вращения двигателя, рад/с;

E – напряжение преобразователя, В;

i – ток якоря двигателя, А;

R – сопротивление якорной цепи, Ом;

L – индуктивность якорной цепи, Гн;

e – ЭДС двигателя, В;

k – конструктивный коэффициент двигателя;

Ф – магнитный поток, Вб;

$U_{в}$ – напряжение преобразователя возбуждения, В;

$i_{в}$ – ток возбуждения, А;

$R_{в}$ – активное сопротивление цепи возбуждения, Ом;

$p_{п}$ – число пар полюсов машины;

$w_{в}$ – число витков обмотки возбуждения;

ξ – коэффициент неполного сцепления;

$i_{вт}$ – вихревые токи, А;

$r_{вт}$ – сопротивление цепи вихревых токов, Ом;

$w_{вт}$ – число витков обмотки вихревых токов (если условно ее изобразить для моделирования вихревых токов в магнитной цепи машины);

Φ_1 – магнитный поток вихревых токов, Вб;

F – магнитодвижущая сила, А;

α – угол открывания тиристоров преобразователя, ^{o};

$U_{пм}$ – амплитуда пилообразного опорного напряжения, В ($U_{пм}$ = = –10 В);

$U_{у}$ – напряжение управления преобразователем, В;

$U_{см}$ – напряжение смещения, В ($U_{см}$ = –5 В).

Перейдя от оригиналов к изображениям математических величин и преобразовав систему, получаем

$$
\begin{cases}
\overline{\omega} = \dfrac{\overline{M} - \overline{M}_{\text{ст}}}{J_{\Sigma} p}, \\
\overline{i} = \dfrac{\overline{E} - \overline{e}}{R(1 + Tp)}, \\
\overline{M} = k\overline{\Phi}\overline{i}, \\
\overline{e} = k\overline{\Phi}\overline{\omega}, \\
\overline{\Phi} = \dfrac{\overline{E}_{\text{в}} - \overline{i}_{\text{в}} r_{\text{в}}}{2 p_{\text{п}} w_{\text{в}} \xi p}, \\
\overline{i}_{\text{вт}} w_{\text{вт}} = -2 p_{\text{п}} \dfrac{w^2_{\text{вт}}}{r_{\text{вт}}} \xi \overline{\Phi} p = -T_{\text{вт}} \overline{\Phi} p, \\
\overline{F} = f_{F\Phi}(\overline{\Phi}), \\
\overline{i}_{\text{в}} w_{\text{в}} = \overline{F} + \overline{i}_{\text{вт}} w_{\text{вт}}, \\
\overline{E} = E_0 \cos\overline{\alpha}, \\
\overline{\alpha} = \dfrac{\pi}{U_{\text{пм}}}\left(\overline{U}_{\text{у}} + U_{\text{см}}\right), \\
\overline{E}_{\text{в}} = E_{\text{ов}} \cos\overline{\alpha}_{\text{в}}, \\
\overline{\alpha}_{\text{в}} = \dfrac{\pi}{U_{\text{пм}}}\left(\overline{U}_{\text{ув}} + U_{\text{см}}\right).
\end{cases}
$$

где T – электромагнитная постоянная времени машины, с;

p – символ дифференцирования;

$k_{\Phi F}$ – переменный коэффициент наклона кривой намагничивания.

Приближенно постоянная времени цепи возбуждения определяется по эмпирической формуле

$$\text{Т}_{\text{в}} = (0{,}1 \div 0{,}23) \cdot \sqrt[3]{\frac{\text{P}_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}}$$

Постоянная времени вихревых токов

$$T_{\text{вт}} = 0{,}15 \cdot T_{\text{в}}.$$

По полученным уравнениям строится структура двухзонной системы управления электроприводом.

Канал регулирования скорости состоит из контуров: регулирования тока и регулирования скорости.

Канал регулирования потока возбуждения содержит контур регулирования тока возбуждения и контур регулирования ЭДС.

Статическую систему подчиненного регулирования применяют, если при этом $S_{\text{х}} \le S_{\text{хзад}}$. В противном случае необходимо рассмотреть другие варианты системы: астатическую, комбинированную, системы с адаптивным регулятором скорости.

При синтезе регулятора тока выбирается вариант управляющего устройства: ПИ-регулятор, ПИ$_2$-регулятор, ПИ-регулятор и дополнительная компенсирующая обратная связь.

Принимая реализацию регуляторов на операционных усилителях, определяют коэффициенты обратных связей.

Коэффициент обратной связи по току

$$K = \frac{U_{\text{З}m\max}}{(IR)_{\max}},$$

где $(IR)_{\max} = 2I_{\text{Н}}R$ – максимальное значение тока якоря двигателя в статическом режиме;

$U_{\text{З}m\max}$ = 10 В – максимальное значение задания тока (максимальный выходной сигнал на выходе регулятора скорости).

Принимаем номинальное значение задания скорости $U_{\text{ЗН}}$ = 10 В.

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ЗН}}}{e_{\text{Н}}}.$$

Выбираем задатчик интенсивности с передаточной функцией

$$K_{\text{ЗИ}} = \frac{1 - e^{-t_{\text{П}i}p}}{t_{\text{П}i}p}.$$

Определяем время пуска двигателя на номинальную скорость

$$t_{\text{ПН}} = \frac{T_{\text{М}} e_{\text{Н}}}{(I_{\max\text{ПУСК}} R - I_{\text{СТ ПУСК}} R)},$$

где $I_{\max\text{ ПУСК}}$ – максимальное значение пускового тока двигателя;

$I_{\text{СТ ПУСК}}$ – статическая составляющая тока при пуске ($I_{\text{СТ ПУСК}} = 0{,}8 I_{\text{Н}}$).

Определяем изображение задающего сигнала на выходе зада-ка интенсивности

$$U_{\text{З}}^{/} = \frac{U_{\text{З}i}}{t_{\text{П}i}} \frac{1 - e^{-t_{\text{П}i} p}}{p},$$

где $\frac{U_{\text{З}i}}{t_{\text{П}i}} = \frac{U_{\text{ЗН}}}{t_{\text{ПН}}} = \varepsilon_{\text{З}}$.

Приближенно оценим величину постоянной времени цепи возбуждения по эмпирической формуле

$$\text{Т}_{\text{в}} = (0{,}1 \div 0{,}23) \cdot \sqrt[3]{\frac{\text{P}_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}}$$

Можно определить постоянную времени вихревых токов

$$T_{\text{вт}} = 0{,}15 \cdot T_{\text{в}} = 0{,}15 \cdot 0{,}726 = 0{,}11 \text{ с}.$$

*6.4.3. **Синтез системы позиционирования***

Задача оптимизации систем воспроизведения, прежде всего, состоит в нахождении оптимальной передаточной функции системы, обеспечивающей наилучшее протекание переходных процессов. Для систем воспроизведения цель управления – воспроизведение рабочим органом задающего сигнала. Между задающим сигналом $U_{\text{з}}$ и желаемым (задаваемым) значением выходной величины $S_{\text{зад}}$ имеет место соотношение

$$S_{зад} = LU_з ,$$

где L – оператор цели управления.

Вследствие инерционности системы, изменения параметров и наличия возмущений действительная выходная величина S отличается от заданного значения. Разность между этими величинами составляет ошибку, или рассогласование, системы

$$\Delta S = S_з - S .$$

Наибольшая ошибка имеет место в переходных процессах. При этом она может быть представлена в виде суммы двух составляющих

$$\Delta S = \Delta S_{зад} + \Delta S_{возм} ,$$

где $\Delta S_{зад}$ – ошибка от задающего воздействия;

$\Delta S_{возм}$ – ошибка от возмущающего воздействия.

В зависимости от величины заданного перемещения предельные диаграммы позиционного электропривода, описываемого уравнениями третьего порядка, могут иметь различный вид:

1) При малых перемещениях фактически оказываются ограничены только производные момента (тока). Другие координаты (ток и скорость) не успевают достичь предельно допустимых значений.

2) При средних перемещениях достигаются ограничения по моменту (току). При этом ограничение может иметь односторонний или двусторонний характер.

3) При больших перемещениях достигаются ограничения по моменту (току) и скорости.

При отработке средних величин перемещений всегда имеется интервал отработки малого перемещения.

При отработке больших перемещений имеются интервалы средних и малых перемещений.

Далее, мы рассмотрим повышение качества работы систем воспроизведения движения за счет рационального построения управляющего устройства с учетом тех преимуществ, которые дает применение систем ПЧ-АД.

За основу для синтеза системы воспроизведения движения берется структура подчиненного управления (рис. 1).

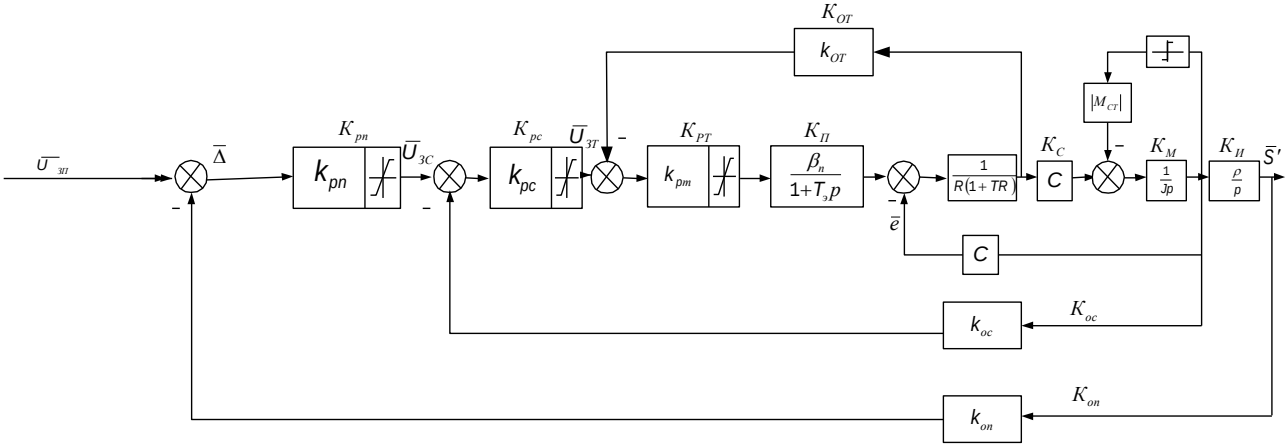

Рис. 1. Полная структурная схема системы позиционирования

Так как основным динамическим звеном объекта управления является интегрирующее звено $\frac{\rho}{p}$ (рис. 2), то для оптимизации контура по модульному оптимуму необходимо применить П-регулятор положения $K_{\text{рп}} = k_{\text{рпл}}$. Предпочтительно выбрать статическую систему позиционирования, т.е. выбрать П-регулятор скорости и П-регулятор положения. Однако, в этом случае возможно появление статической ошибки позиционирования $\Delta S_{\text{ст}}$, величина которой будет превышать допустимую погрешность.

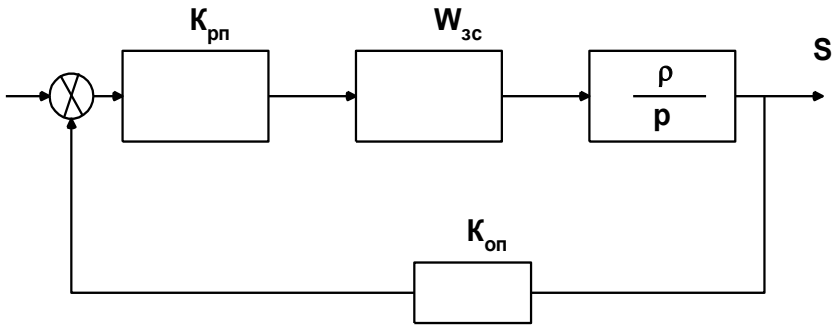

Рис. 2.Структурная схема контура регулирования положения

Передаточная функция замкнутого контура положения

$$W_{\text{зп}} = \frac{\rho k_{\text{рпл}} k_{\text{оп}}}{\left(1 + 2\tau_{\text{э}} p + 2\tau_{\text{э}}^2 p^2\right) k_{\text{ос}} p + k_{\text{рпл}} \rho k_{\text{оп}}} \frac{1}{k_{\text{оп}}} \cong \frac{b_0}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2} \frac{1}{k_{\text{оп}}},$$

где $k_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{ЗП}\max}}{S_{\max}}$ – коэффициент обратной связи по положению.

Обеспечить высокое быстродействие и высокую точность позиционирования можно применяя нелинейный (параболический) регулятор положения. При отработке больших и средних рассогласований по положению задача регулятора – определить точку начала

торможения и задать скорость V в зависимости от рассогласования с максимальным расчетным замедлением a. В этом случае тормозной путь определяется как

$$\Delta S = \frac{at_{\text{Т}}^2}{2} = \frac{V^2}{2a}.$$

Откуда требуемая скорость

$$V = \sqrt{2a\Delta S}$$

или необходимое задание скорости

$$U_{\text{Зсн}} = U_{\text{вых рпн}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{пр т}} k_{\text{ОС}}^2}{\rho k_{\text{оп}}}} \cdot \sqrt{\Delta} = k_{\text{рпн}} \sqrt{\Delta}.$$

При уменьшении рассогласования по положению коэффициент усиления регулятора возрастает и стремится к бесконечности

$$K_{\text{рпндин}} = \frac{U_{\text{вых рпн}}}{\Delta}.$$

Поэтому при малых рассогласованиях необходимо перейти к линейному регулятору с коэффициентом

$$k_{\text{рпл}} = \frac{1}{\rho \cdot 4\tau_{\text{Э}}} \cdot \frac{k_{\text{ос}}}{k_{\text{оп}}}.$$

Переход к линейному регулятору можно определить из условия равенства задания скорости от нелинейного и линейного регуляторов при некотором рассогласовании $\Delta_{\text{с}}$:

$$U_{\text{зсн}} = U_{\text{зсл}}.$$

Таким образом, из равенства определяем $\Delta_{\text{с}}$, т. е.

$$\Delta S_{\text{с}} = \frac{\Delta_{\text{с}}}{K_{\text{оп}}}.$$

Требуемая характеристика «вход-выход» регулятора положения представлена на рис. 3.

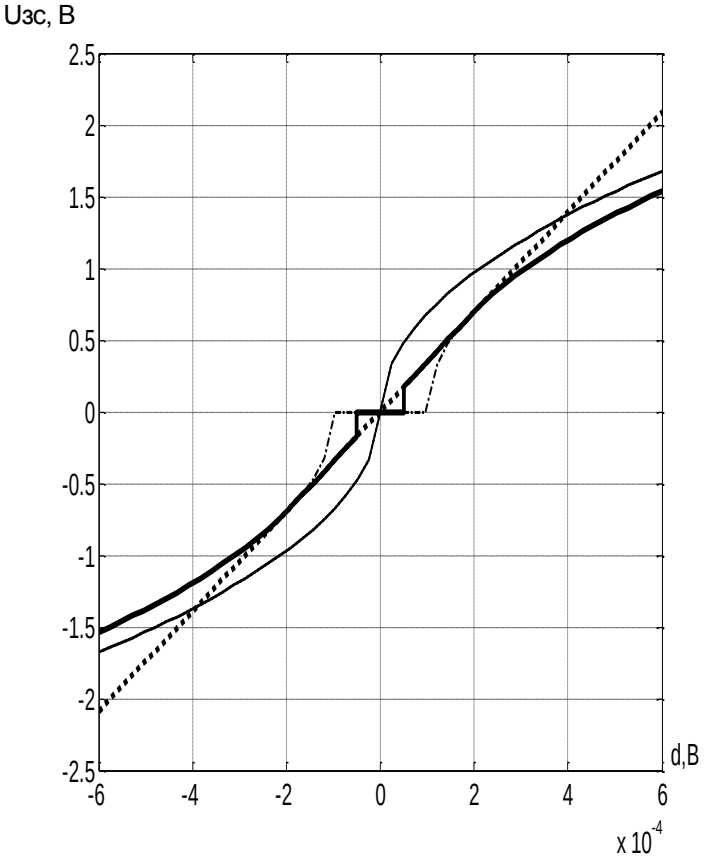

Рис. 3. Сформированная характеристика «вход-выход» регулятора положения с переменной структурой и ее составляющие

Выбранные характеристики вход-выход регулятора положения с переменной структурой имеют достаточно простую настройку, но при переходе на линейный участок характеристики будет задаваться первоначально большее значение ускорения, чем на нелинейном участке, что приведет к нарушению плавности позиционирования и приведет к переходу через точку позиционирования со всеми вытекающими последствиями. Поэтому согласование линейного и нелинейного участков характеристики следует произвести из условия

$$k_{\text{рп л}} = k_{\text{рпн дин}},$$

где $k_{\text{рпн дин}} = \dfrac{dU_{\text{зс}}}{d\Delta}$ – динамический коэффициент усиления регулятора положения на нелинейном участке характеристики.

Сопряжение характеристик необходимо выполнить на основании вышеуказанной формулы

при $$\Delta = \Delta_c = \left(\frac{k_{\text{рпн}}}{2k_{\text{рпл}}}\right)^2.$$

При этом рассогласованию Δ_c будет соответствовать выходной сигнал задания скорости

$$U_{\text{зсс}} = k_{\text{рпн}}\sqrt{\Delta_c} = \frac{k_{\text{рпн}}^2}{2k_{\text{рпл}}},$$

Характеристика линейного регулятора вынуждено будет иметь вид

$$U_{\text{зсл}} = U_{\text{зсло}} + \Delta k_{\text{рпл}},$$

т.е. не будет идти в точку начала координат, а будет смещена вверх на величину $U_{\text{зсло}}$.Так как нам необходимо, чтобы характеристика линейного регулятора приходила в начало координат, то определим

смещение этой характеристики по оси абсцисс, т.е. определим $\Delta_{см}$ характеристики линейного регулятора при $U_{зсл} = 0$.

При $\Delta = \Delta_c$ получаем

$$U_{зсло} = k_{рпн}\sqrt{\Delta_с} - k_{рпл}\Delta_с .$$

Тогда

$$U_{зсло} = 0{,}5U_{зсс} .$$

Тогда при $U_{зсл} = 0$

$$\Delta_{см} = -\frac{U_{зсло}}{k_{рпл}} = -\frac{0{,}5U_{зсс}}{k_{рпл}} = \frac{k_н^2}{4k^2{}_{рпл}} = -\Delta_с .$$

Таким образом, характеристика «вход-выход» результирующего регулятора с переменной структурой должна быть смещена на $\Delta_{см}$ (рис. 3) в зависимости от выбранного значения $k_{рпл}$. При этом сопряжение линейной и параболической характеристик будет происходить со смещением на $\Delta_с$, т.е. в точке с координатами ($2\Delta_с, U_{зсс}$). После смещения результирующей характеристики линейная составляющая будет проходить через начало координат, а начало параболической составляющей окажется смещенным на $\Delta_с$. Сформированная регулировочная характеристика регулятора положения с переменной структурой представлена на рис. 3 и может быть описана уравнениями

$$\begin{cases} U_{зсн} = k_{рпн}\sqrt{\Delta - \Delta_с}, & \text{при } \Delta \geq 2\Delta_с, \\ U_{зсл} = k_{рпл}\Delta, & \text{при } \Delta \leq 2\Delta_с, \\ U_{зс} = 0, & \text{при } \Delta \leq \delta/2. \end{cases}$$

Основная трудность применения регулятора с переменной структурой заключается в трудности его настройки, т.е. качественного

сопряжения отдельных участков его характеристики «вход-выход», которая описывается системой уравнений

$$\begin{cases} U_{\text{зсн}} = k_{\text{рпн}}\sqrt{\Delta - \Delta_{\text{с}}}, & \text{при } \Delta \geq 2\Delta_{\text{с}}, \\ U_{\text{зсл}} = k_{\text{рпл}}\Delta, & \text{при } \Delta \leq 2\Delta_{\text{с}}, \\ U_{\text{зс}} = 0, & \text{при } \Delta \leq \delta/2, \\ k_{\text{рпл}} = \dfrac{1}{\rho \cdot 4\tau_{\text{Э}}} \cdot \dfrac{k_{\text{ос}}}{k_{\text{оп}}}, \\ k_{\text{рпн}} = \sqrt{\dfrac{2\varepsilon_{\text{пр т}} k_{\text{ос}}^2}{\rho k_{\text{оп}}}}, \\ \Delta_{\text{с}} = \left(\dfrac{k_{\text{рпн}}}{2k_{\text{рпл}}}\right)^2. \end{cases}$$

Конкретный вид характеристики «вход-выход» зависит от многих параметров, многие из которых в процессе работы могут изменяться. Поэтому целесообразно ввести устройства, обеспечивающие выполнение функций:

– автоматического определения основных параметров регулятора $k_{\text{рпл}}, k_{\text{рпн}}, \Delta_{\text{с}}, \delta/2$ – блок автоматической наладки и диагностики регулятора положения;

– формирование $U_{\text{зс}}$ в зависимости от рассогласования по положению Δ и его соотношением с $\Delta_{\text{с}}$ – регулятор положения.

Регулятор положения реализует функции и проверку соотношений:

$$\begin{cases} U_{\text{зсн}} = k_{\text{рпн}}\sqrt{\Delta - \Delta_{c}}, & \text{при } \Delta \geq 2\Delta_{\text{с}}, \\ U_{\text{зсл}} = k_{\text{рпл}}\Delta, & \text{при } \Delta \leq 2\Delta_{\text{с}}, \\ U_{\text{зс}} = 0, & \text{при } \Delta \leq \delta/2. \end{cases}$$

Блок автоматической наладки реализует вычисления

$$\begin{cases} k_{\text{рпл}} = \dfrac{1}{\rho \cdot 4\tau_{\text{Э}}} \cdot \dfrac{k_{\text{ос}}}{k_{\text{оп}}}, \\ k_{\text{рпн}} = \sqrt{\dfrac{2\varepsilon_{\text{пр т}} k_{\text{ОС}}^2}{\rho k_{\text{оп}}}}, \\ \Delta_{\text{с}} = \left(\dfrac{k_{\text{рпн}}}{2k_{\text{рпл}}} \right)^2 \end{cases}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Фираго, Б.И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» / Б.И. Фираго. – Минск: БГПА, 1993. – 127 с.

2. Фираго, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.

3. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под ред. Копылова И.П., Клокова Б.К. – Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 456 с.: ил.

4. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общей ред. В.Г. Герасимова. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 696 с.: ил.

5. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

6. Ковчин, С.А. Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – Спб.: Энергоатомиздат, 2000 – 496 с.

7. Башарин, А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1982. – 392 с.

8. Анхимюк, В.Л. Системы управления электроприводами: методическое пособие: в 5 ч. / В.Л. Анхимюк, Н.Н. Михеев, О.Ф. Опейко. – Минск, 1994. – Ч. 3. – 64 с.

9. Анхимюк, В.Л. Теория автоматического управления / В.Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко, Н.Н. Михеев. – Минск: Дизайн ПРО, 2002. – 352 с.

10. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г.И. Гульков [и др.]; под общ. ред. Ю.Н. Петренко. – Минск: Новое знание, 2004. – 384 с.

11. Перельмутер, В.М. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В.М. Перельмутер, В.А. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1988. –304 с.

12. Комплектные тиристорные электроприводы: справочник / И.Х. Евзеров [и др.]; под ред. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

13. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.

14. Сабинин, Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздзт, 1985. – 128 с.

15. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ. 3
2. ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ. 4
3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА. 12
4. ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЕКТА. 13
5. УКАЗАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ. 14
6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ. 21
6.1. Определение параметров электродвигателя постоянного тока 21
6.2. Выбор системы электропривода. 23
6.3. Определение параметров главных цепей. 23
6.3.1. Краткая характеристика преобразователя. 23
6.3.2. Расчет и выбор силового трансформатора. 24
6.3.3. Выбор силовых вентилей. 29
6.3.4. Расчет и выбор уравнительных реакторов. 31
6.3.5. Выбор сглаживающего дросселя. 32
6.3.6. Определение параметров преобразователя. 35
6.4. Проектирование системы управления электроприводом. 38
6.4.1. Сравнение возможных вариантов и выбор структуры СУЭП. 38
6.4.2. Математическое описание объекта управления. . . . 38
6.4.3. Синтез системы позиционирования. 42
ЛИТЕРАТУРА. 52

Учебное издание

МИХЕЕВ Николай Николаевич

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Учебно-методическое пособие
к курсовому проектированию

Редактор Е.О. Коржуева
Технический редактор О.В. Дубовик
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

Подписано в печать 04.12.2009.
Формат $60\times84^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 3,14. Уч.-изд. л. 2,45. Тираж 200. Заказ 1094.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.