Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автоматизированного электропривода

П.А. Воронин

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Методические указания

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ
2010

УДК 62-83(07)
ББК 31.291я 7
В 75

Рецензент – кандидат технических наук Э. Л. Греков

Воронин, П.А.
В75 Системы управления электроприводов: методические указания по курсу «Системы управления электроприводов» / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. - 91 с.

Методические указания предназначены для студентов специальности 050501 – Профессиональное обучение очной формы обучения, выполняющих курсовой проект по дисциплине «Системы управления электроприводов».

УДК 62-83(07)
ББК 31.291я 7

В $\frac{2202090100}{}$

© Воронин П.А. 2010
© ГОУ ОГУ, 2010

Содержание

Введение ...…….5
1 Цель курсового проекта и организация работы над ним ……...6
2 Содержание и объем курсового проекта ……7
3 Роль автоматизированного электропривода в технологическом процессе обработки металлов на металлорежущих станках ……9
3.1 Классификация станков и виды их электроприводов ……9
3.2 Технологический процесс точения заготовок. Силовые параметры режимов резания ……10
3.3 Задачи автоматизированных электроприводов станков ……..13
4Требования к электроприводам металлорежущих станков ……. 15
4.1 Общие требования ……15
4.2 Требования к приводам подач ……16
4.3 Требования к приводам главных движений ……..17
4.4 Требования к системам управления электроприводов ……..19
5 Выбор конструктивных элементов силового канала электропривода ……21
6 Выбор структуры системы управления привода ……..22
7 Разработка математической модели силового канала электропривода как объекта управления и расчет основных параметров элементов ……..26
8 Разработка структурной схемы замкнутой системы регулирования скорости ….27
9 Анализ статического режима работы электромеханической системы электропривода ……...28
9.1 Механические характеристики электропривода ……29
9.2 Расчет требуемого коэффициента усиления регулятора скорости …….....32
10 Расчет динамических характеристик системы электропривода ……35
10.1 Общие положения ……...35
10.2 Настройка на технический оптимум ……37
10.3 Настройка на симметричный оптимум …… 38
10.4 Особенности настройки контура скорости системы электропривода с подчиненным регулированием координат ……40

10.5 Рекомендации по расчету параметров контуров регулирования ..……42
11 Расчет переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям “в малом” в регулируемом электроприводе …….…44
12 Разработка принципиальной схемы, выбор элементов и конструктивного исполнения регуляторов (частоты вращения, тока якоря) ……..……..52
13 Описание работы серийно выпускаемого электропривода, структурно схожего с проектируемым ……55
14 Заключение ……55
Список использованных источников ……56
Приложение А Задание на курсовое проектирование ……58
Приложение Б Справочные данные высокомоментных электродвигателей ……60
Приложение В Принципиальная, функциональная схемы и описание работы серийно выпускаемых электроприводов ……62
Приложение Г Пример расчета параметров элементов силового канала электропривода как объекта управления ……..……..78
Приложение Д Справочные данные трансформаторов …….……..88

Введение

Системы управления, придающие необходимые свойства электроприводам производственных механизмов и выполняющие задачи автоматизации, представляют собой часть автоматизированного электропривода, который является конечным объектом изучения в дисциплине «Системы управления электроприводов». Эта дисциплина рассматривается как продолжение дисциплин «Теория электропривода» и «Теория автоматического управления».

Освоение методики и техники проектирования систем электропривода и систем автоматизации является неотъемлемой частью профессиональной подготовки студентов по специальности 050501 – Профессиональное обучение.

В методических указаниях приводятся варианты технического задания на курсовое проектирование, требования к оформлению и защите курсового проекта, содержание и объем проекта, теоретические положения изучаемой дисциплины и рекомендации по выполнению разделов курсового проекта.

1 Цель курсового проекта и организация работы над ним

Целью курсового проектирования является закрепление практических навыков самостоятельного решения инженерных задач, развитие творческих способностей и умения пользоваться технической, нормативной и справочной литературой.

В качестве рабочего механизма в курсовом проекте рассматривается механизм подачи металлорежущего станка. Для формирования требований к системе управления электропривода подачи в методических указаниях кратко описан технологический процесс точения заготовок на токарных станках, позволяющий связать силовые параметры режимов резания с алгоритмами управления координатами электропривода.

Методы решения задач проектирования рассматриваются на практических занятиях и еженедельных консультациях, проводимых руководителем курсового проектирования. При работе над курсовым проектом рекомендуется использовать примеры расчетов узлов электропривода, приведенные в методических указаниях.

Пояснительная записка и графическая часть проекта должны быть оформлены в соответствии с требованиями ЕСКД и внутривузовского стандарта СТО 02069024.110-2008.

Выполненный студентом курсовой проект после проверки руководителем проектирования и исправления выявленных ошибок и недостатков должен быть защищен в комиссии, состоящей из преподавателей кафедры. Защита проекта предусматривает краткое сообщение (доклад) исполнителя и его ответы на вопросы членов комиссии.

Оценка курсового проекта учитывает правильность и обоснованность принятых решений и проведенных расчетов, качество оформления курсового проекта и качество ответов исполнителя на вопросы членов комиссии.

2 Содержание и объем курсового проекта

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка включает в себя следующие разделы:

1 Введение. Современные тенденции развития электроприводов технологических установок и комплексов.

2 Выбор технологической установки и описание технологического процесса. Роль автоматизированного электропривода в технологическом процессе. Требования, предъявляемые к электроприводу технологической установки.

3 Выбор конструктивных элементов силового канала электропривода. Выбор структуры системы управления электропривода. Обзор структур современных СУЭП постоянного тока. Выбор оптимального варианта системы управления тиристорного электропривода постоянного тока для выбранного производственного механизма.

4 Разработка математической модели силового канала электропривода как объекта управления и расчет основных параметров элементов

5 Разработка структурной схемы замкнутой системы регулирования скорости.

6 Анализ статического режима работы разомкнутой электромеханической системы электропривода. Расчет требуемого коэффициента усиления регулятора скорости при наличии внешних возмущающих воздействий. Построение механических характеристик производственного механизма, механических характеристик разомкнутой и замкнутой системы электропривода.

7 Расчет динамических характеристик системы электропривода, настроенной на технический оптимум.

8 Расчет переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям “в малом” в регулируемом электроприводе.

9 Разработка принципиальной схемы, выбор элементов и конструктивного исполнения регуляторов (частоты вращения, тока якоря).

10 Описание работы серийно выпускаемого электропривода, структурно схожего с проектируемым.

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

12 Список использованных источников.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4. В записке приводятся сведения о производственном механизме, для электропривода которого проектируется система управления, и описывается технологический процесс с участием автоматизированного электропривода. Должны быть даны обоснования выбранных технических решений, приведены расчетные формулы и сами расчеты, изображены структурные схемы, поясняющие выбранные решения. Однотипные и повторяющие расчеты приводятся в табличной форме, графики – в виде распечаток.

Графическая часть проекта выполняется на листах формата А4 или А3. В ней должны быть представлены:

1 Механические характеристики электропривода для разомкнутой и замкнутой систем, механические характеристики механизма подачи станка при холостом ходе и резании с постоянным усилием резания.

2 Структурные схемы замкнутой системы электропривода для расчета статических и динамических характеристик.

3 Кривые переходного процесса по управлению и возмущению при единичном ступенчатом воздействии.

4 Пример принципиальной схемы серийно выпускаемого электропривода постоянного тока, содержащего СУЭП, структурно схожую с проектируемой (допустима качественная ксерокопия схемы формата А3 или А4).

В случае необходимости исходные данные варианта, объем и содержание курсового проекта по согласованию с руководителем курсового проекта могут быть изменены.

3 Роль автоматизированного электропривода в технологическом процессе обработки металлов на металлорежущих станках

3.1 Классификация станков и виды их электроприводов

Металлорежущий станок предназначен для придания обрабатываемой заготовке требуемой формы с заданной точностью путем снятия стружки.

Станки классифицируются по различным признакам [4].

1 По универсальности:

- станки универсальные, предназначенные для выполнения различных операций на деталях, разнообразных по размерам и форме;
- специализированные – для обработки однотипных деталей;
- специальные – для обработки лишь для одного вида деталей.

2 По степени автоматизации:

- с ручным управлением;
- автоматические;
- полуавтоматические.

3 По точности:

- нормальной точности – класс Н;
- повышенной точности – класс П;
- высокой точности – класс В;
- особо высокой точности – класс А;
- особо точные – класс С.

4 По массе:

- легкие – массой до 1 т;
- средние – до 10 т;
- тяжелые – свыше 10 т.

5 По видам обработки:

- токарные;
- фрезерные;

- сверлильные;
- шлифовальные;
- строгальные;
- зубо- и резьбообрабатывающие и другие.

Относительные движения заготовки и режущего инструмента, в результате которых осуществляется процесс резания, называются основными. Основные движения разделяются на главное, при котором инструмент производит резание металла, и движение подачи, которое обусловливает перемещение инструмента или обрабатываемой заготовки для снятия нового слоя металла. Например, в станках токарной группы главным движением является вращение заготовки, а движением подачи является перемещение инструмента относительно заготовки.

Кроме основных движений в станках имеются вспомогательные движения, непосредственно не участвующие в процессе резания, но способствующие ему или выполняющие вспомогательные операции, обеспечивающие работу станка. Они осуществляют подачу охлаждающей смазочной жидкости, зажим и отжим заготовки, автоматический подвод и отвод инструментов и т.д.

Все приводы в металлорежущих станках классифицируются по видам движения: приводы главного движения; приводы подачи; приводы вспомогательных движений.

3.2 Технологический процесс точения заготовок. Силовые параметры режимов резания

Резание металлов большинством исследований в основном определяется как процесс последовательного сдвига элементов стружки, сопровождаемый пластическим сжатием, изгибом или вязким трением металла. При этом резание металлов сопровождается деформацией, температурными изменениями и действием сил трения в самой стружке, на режущем инструменте и на поверхности обрабатываемой заготовки. На все эти явления весьма существенное влияние оказывают скорость и сила резания.

При увеличении размеров срезаемого слоя металла силы, действующие в процессе резания, возрастут. Возрастут и соответствующие им работа резания и температура. При этом производительность оборудования в единицу времени увеличится.

Для преодоления давления стружки и обрабатываемой поверхности заготовки на резец необходимо приложить к нему определенную силу. Поэтому основой изучения процесса резания является определение сил необходимых для осуществления резания.

В механизмах главного движения металлорежущих станков процесс резания обеспечивается усилием резания. Оно зависит от режимов резания (глубины, оборотной подачи, скорости резания), материала обрабатываемого изделия и свойств инструмента. При расчёте силовых параметров режимов резания исходят из группы обрабатываемого изделия (например, 11-я группа – сталь Ст20), инструмента (например, резцы с твёрдосплавными пластинами марки Т5К10), глубины резания t, мм, оборотной подачи s, мм/об и оптимальной рекомендуемой скорости резания V, м/мин. Сочетание этих условий [13] приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Режимы резания при черновом точении

Группа обрабатываемого материала	s, мм/об	t=5 мм		t=8 мм		t=10 мм		Марка инструмента
		V, м/мин	Fz, Н	V, м/мин	Fz, Н	V, м/мин	Fz, Н	
11	0,5	105	5200	95	6630	90	10950	Т5К10
	0,6	95	6020	85	8290	82	12550	
	0,7	85	6980	80	10210	75	14050	
	0,8	80	8100	75	11820	70	15650	

Точение заготовки (рисунок1) осуществляется на токарных станках в результате вращения обрабатываемого изделия 1 (главное движение) и перемещения резца 2 (движения подач) по осям x - s_1 и y - s_2.

Окружная скорость изделия в точке соприкосновения резца с обрабатываемой деталью называется скоростью резания V (м/мин):

$$V = 9.55\pi d_и \omega_и = 30 d_и \omega_и,$$

где $d_и$, — диаметр обработки, м;

$\omega_и$ — угловая скорость изделия, рад/с.

Подача определяется перемещением резца, приходящимся на один оборот изделия. Глубина резания представляет собой разность радиусов обрабатываемой и обработанной поверхностей. Быстрое перемещение суппорта, зажим и отжатие обрабатываемого изделия, перемещение люнета, задней бабки и другие движения относятся к вспомогательным.

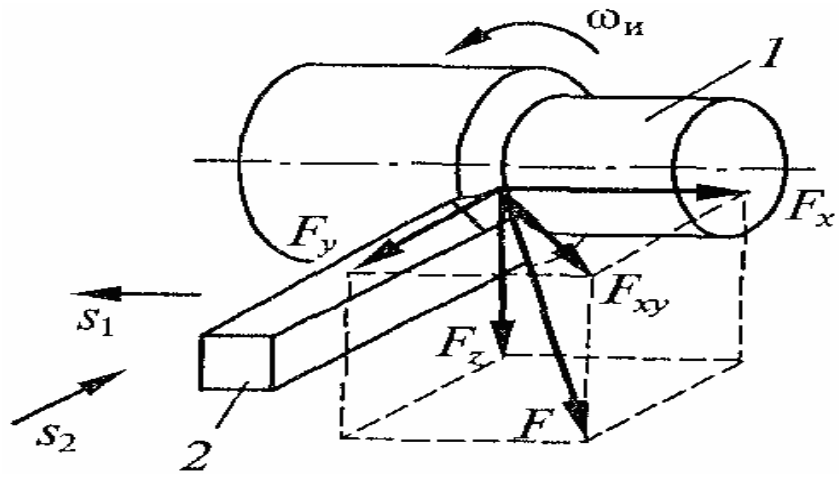


Рисунок 1 – Обработка заготовки на токарном станке

В процессе обработки происходит износ инструмента. При достижении оптимального износа инструмент перетачивают. Время работы инструмента между двумя переточками определяет его стойкость T, мин.

При снятии стружки резцом возникает усилие F, приложенное к режущей кромке инструмента (рисунок1).

$$F = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2},$$

где F_z— главная касательная сила, действующая в направлении траектории главного движения, преодолеваемая шпинделем станка и называемая усилием резания;

F_y — радиальная сила, действующая нормально к обработанной поверхности и создающая давление на суппорт;

F_x — осевая сила, действующая в направлении подачи.

Приближенно можно принять $F_z \approx F$, $Fx \approx 0{,}4\ Fz$ и $Fy \approx 0{,}3\ Fz$.

Для преодоления усилия F_x предназначен привод продольной подачи станка, для преодоления усилия F_y предназначен привод поперечной подачи. Для создания усилия резания F_z используется привод главного движения – привод шпинделя.

3.3 Задачи автоматизированных электроприводов станков

К современным металлорежущим станкам предъявляются следующие основные требования:

- возможно большая производительность при соблюдении достаточной точности формы и размеров, а также чистоты обрабатываемой поверхности;
- простота и легкость обслуживания;
- сравнительно низкая первоначальная стоимость;
- возможно малый вес и габариты;
- простота изготовления и сборки отдельных узлов станка.

Выполнение этих требований возможно при современном использовании средств механики, электротехники, гидравлики, а в некоторых случаях также и пневматики.

Можно без преувеличения утверждать, что все прогрессивные мероприятия по созданию современных металлорежущих станков в той или иной степени связаны с развитием автоматизированного электропривода.

Автоматизация управления электроприводами весьма эффективно решает задачи комплексной автоматизации в виде автоматических линий станков, отдельных цехов и даже заводов. Развитие электропривода сейчас идет по весьма эффективному пути - внедрению преобразовательных устройств с полупроводниковыми управляемыми вентилями-тиристорами. Тиристорные преобразователи позволяют создавать высокоэкономичные регулируемые электроприводы постоянного тока. Развитие элементной базы силовых статических преобразователей (в том числе на транзисторах) позволило использовать на станках регулируемые электроприводы переменного тока на основе асинхронных и вентильных двигателей.

Развитие техники привело к созданию технологических процессов, управление которыми должно осуществляться по многим параметрам, а обработка информации выполняться в кратчайшее время. Решающим шагом в совершенствовании управления сложными технологическими процессами стало применение цифровых ЭВМ и автоматических систем управления статическими преобразователями.

Основная задача управления состоит в том, чтобы, исходя из параметров исходных материалов и требований к готовой продукции, воздействовать на технологическое оборудование для получения продукции соответствующего качества за минимальное время. Эта задача возлагается на систему управления электроприводом, формирующую управляющее воздействие для функционирования электроприводов станка. Такая система обрабатывает информацию о ходе технологического процесса согласно заданным алгоритмам и выдаёт управляющие воздействия регулируемым по скорости или положению электроприводам.

Задача системы управления электропривода (система низшего уровня) - формировать характеристики самого привода, обеспечивая требуемый темп разгона, торможения двигателя, ограничивая ток, момент на допустимом уровне.

Системы управления отдельных электроприводов строятся с применением аналоговых и цифровых П -, ПИ - и ПИД - регуляторов, позволяющих существенно снизить статические и динамические ошибки поддержания заданных технологических параметров. Получение продукции высокого качества и обеспечение максимальной производительности оборудования возможны только при точном поддержа-

нии технологических параметров, электроприводы при этом выполняют двоякую роль. Во-первых, электропривод обеспечивает воздействие технологического оборудования на вышеуказанную продукцию, во-вторых, параметры его используются для вычисления технологических величин (усилий резания, скоростей резания, стойкости инструмента, мощности резания станков).

4 Требования к электроприводам металлорежущих станков

4.1 Общие требования

Электропривод осуществляет не только преобразование электрической энергии в механическую, необходимую для совершения полезной работы, но и управление рабочим процессом приводимого в движение механизма.

Технологические требования определяют необходимость на отдельных этапах работы задавать и с требуемой точностью поддерживать на заданном уровне те или иные механические переменные (скорость, ускорение, момент двигателя, нагрузку и так далее), принудительно изменять эти переменные в процессе управления технологическим процессом, ограничивать переменные уровнем, допустимым по условиям технологии или прочности механического оборудования, а также по нагреву и перегрузочной способности двигателя.

К современным электроприводам станков предъявляются следующие основные требования:

— простота управления и обслуживания;

— возможно большая производительность, а также качество изготавливаемой продукции при соблюдении требований технологического процесса;

— небольшие габариты и вес;

— сравнительно низкая первоначальная стоимость и невысокие эксплуатационные расходы.

Выполнение указанных требований возможно при использовании современных средств механики, электротехники и гидравлики.

4.2 Требования к приводам подач

К приводам подач станков (продольная и поперечная подача стола фрезерного станка, суппорта токарного станка) предъявляются следующие требования:

-минимальные габариты электродвигателя при высоком вращающем моменте;

-высокая максимальная скорость;

-значительная перегрузочная способность привода в режимах кратковременной и повторно-кратковременной нагрузки;

-высокая стабильность характеристик и в первую очередь усилителя и тахогенератора;

-высокое быстродействие при апериодическом характере переходных процессов разгона и торможения;

-высокое быстродействие при набросе и сбросе нагрузки и при реверсе под нагрузкой на самых малых частотах вращения;

-высокая равномерность движения при различной нагрузке на всех скоростях вплоть до самых малых;

-высокая надежность и ремонтопригодность;

-удобство конструктивной установки двигателя на станке и встройки статических преобразователей в шкафы и ниши станков;

-малые габариты и расход активных материалов;

-небольшой расход дефицитных материалов;

-простота наладки, ремонта и эксплуатации;

-высокая унификация узлов и отдельных элементов;

-высокая экономичность и малая стоимость.

Характерная особенность механической характеристики механизма подачи с постоянным усилием резания – регулирование скорости при постоянном моменте сопротивления. Поэтому в приводах постоянного тока рациональным

является регулирование скорости двигателя изменением напряжения якоря. Диапазон регулирования скорости подачи достигает значения 10 000 и более.

4.3 Требования к приводам главных движений

Для приводов главного движения наиболее рациональным является способ регулирования скорости с постоянной мощностью, так как большим скоростям резания соответствуют меньшие усилия резания, а меньшим скоростям - большие усилия. В связи с этим в приводах главного движения используют двухзонное регулирование скорости, т.е. регулирование скорости как изменением напряжения якоря, так и магнитного потока двигателя.

Диапазон регулирования частоты вращения определяется пределами скоростей резания и диаметров обрабатываемых изделий. Это определяется тем, что на универсальных станках могут обрабатываться детали из различных материалов и разных размеров, в частности разных диаметров. Для обработки изделий одинакового диаметра из различных материалов необходимо обеспечить определенный диапазон регулирования скорости резания.

В высоко автоматизированных станках с числовым программным управлением функции, выполняемые электроприводом главного движения, значительно усложнены. Помимо основных задач по стабилизации частоты вращения при силовых режимах резания с обеспечением необходимых энергетических характеристик, электропривод главного движения должен обеспечивать режимы позиционирования шпинделя при автоматической смене инструмента, а также режимы нарезания резьбы как метчиками, так и резцами. Это неизбежно ведет к увеличению требуемого диапазона регулирования частоты вращения. Так, при требуемой точности позиционирования шпинделя 0,1 и максимальной частоте вращения двигателя 3000 - 5000 об/мин суммарный диапазон изменения частоты вращения должен быть не менее 10 000.

Стабильность работы привода характеризуется перепадом частоты вращения при изменении нагрузки, напряжения питающей сети, температуры окружающего

воздуха и т.п. Погрешность регулирования определяется суммированием следующих отклонений: отклонение частоты вращения при изменении нагрузки при номинальном напряжении питания и постоянной температуре окружающей среды $(20 \pm 5)^{\circ}C$, изменение частоты вращения при изменении температуры окружающей среды от $(20 \pm 5)^{\circ}C$ до $45\ ^{\circ}C$ при питании номинальным напряжением при номинальной нагрузке; изменение частоты вращения при изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ к номинальному при холостом ходе и постоянной температуре. Погрешность частоты вращения при изменении направления вращения определяется при холостом ходе привода, номинальном напряжении питания и температуре окружающей среды $(20 \pm 5)\ ^{\circ}C$.

Значения допустимых погрешностей частоты вращения и коэффициента неравномерности в различных диапазонах регулирования приведены в таблице 4.1. Коэффициент неравномерности рассчитывается как отношение разности максимальной n_1 и минимальной n_2 мгновенных частот вращения к средней частоте вращения при холостом ходе привода:

$$k_н = 2\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}.$$

Таблица 4.1 - Допустимые значения погрешности частоты вращения главного привода.

Диапазон изменения частоты вращения	Погрешность частоты вращения, % установленной частоты, не более			Коэффициент неравномерности $k_н$ не более
	Суммарная погрешность Δ	Погрешность при изменении нагрузки $\Delta_н$	Погрешность при изменении направления вращения $\Delta_р$	
От n_{max} до $0{,}1n_{max}$	5	2	2	0,1
От $0{,}1n_{max}$ до $0{,}01n_{max}$	15	5	5	0,15
От $0{,}01n_{max}$ до $0{,}001n_{max}$	–	–	–	0,4

В современных станках с ЧПУ динамические характеристики приводов главного движения по управлению прямым образом определяют производительность. Цикл смены инструмента происходит за 5 - 10 с, при этом время позиционирования шпинделя и, следовательно, время пуска и торможения с любой частоты вращения не должны превышать 2-4 с. При наличии зазоров в кинематической цепи главного привода перерегулирование приводит к дополнительным затратам времени на позиционирование, поэтому появляется необходимость обеспечения монотонного апериодического характера изменения скорости.

Динамические характеристики электропривода по нагрузке практически определяют точность и чистоту обработки изделия, а также стойкость инструмента. Устойчивый процесс резания при необходимой точности и чистоте поверхности возможен, если параметры настройки привода обеспечивают при набросе номинального момента нагрузки максимальный провал скорости не более 40 % при времени восстановления, не превышающем 0,25 с.

Отличительной особенностью главного привода для высокоавтоматизированных станков с ЧПУ является необходимость применения реверсивного привода даже в тех случаях, когда по технологии обработки не требуется реверс. Требование обеспечения эффективного торможения и подтормажевания при снижении частоты вращения и режимов поддержания постоянной скорости резания приводит к необходимости применения реверсивного привода с целью получения нужного качества переходных процессов.

4.4 Требования к системам управления электроприводов

В соответствии с [14] «система управления электропривода – совокупность управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения электропривода, предназначенных для управления электромеханическим преобразованием энергии с целью обеспечения заданного движения исполнительного органа рабочей машины». Объектом управления является силовой канал электропривода, состоящий

из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей.

В зависимости от задач управления электродвигателем может осуществляться:

- поддержание заданного уровня переменной электропривода (например, выходной переменной - скорости);
- изменение переменной по требуемому закону;
- ограничение переменной допустимым значением;
- отработка произвольных законов, задаваемых на входе системы.

Возможные способы управления переменными электропривода подразделяются на две большие группы:

- параметрические способы управления, используемые в разомкнутых системах;
- автоматическое управление с помощью обратных связей в замкнутых системах.

Точность регулирования переменной определяется возможными отклонениями ее от заданного значения под действием возмущающих факторов, например изменение нагрузки при регулировании скорости, изменение скорости при регулировании момента двигателя, колебание напряжения сети и так далее. Диапазон регулирования характеризует пределы изменения значений переменных.

Возможные пределы регулирования переменной ограничиваются сверху максимально допустимыми или максимально реализуемыми значениями переменной, а снизу требуемой точностью или минимально реализуемыми значениями переменной.

Важным показателем регулируемого электропривода является его экономичность. Применение регулируемого электропривода связано с определенными дополнительными первоначальными затратами и эксплуатационными расходами, которые должны окупаться повышением производительности и надежности работы установки, а также улучшением качества продукции.

При автоматическом управлении электроприводом важное значение имеют динамические показатели качества регулирования:

- быстродействие;
- колебательность;
- перерегулирование.

Динамические показатели качества регулирования, оцениваются по характеру переходного процесса.

Все показатели, характеризующие статический и динамический режимы работы электропривода должны быть реализованы системой управления электропривода.

5 Выбор конструктивных элементов силового канала электропривода

В соответствии с заданием на проектирование в качестве электрического преобразователя используем тиристорный преобразователь постоянного тока.

Как известно, из всех способов регулирования и изменения направления скорости, использование реверсивного тиристорного преобразователя (РТП) является одним из самых экономочных способов создания быстродействующего регулируемого электропривода постоянного тока. Реверсивным тиристорным преобразователем называется преобразователь, через который ток может протекать в обоих направлениях. Поскольку тиристоры пропускают ток только в одном направлении, то для изменения направления тока нагрузки необходимо использовать две группы вентилей, каждая из которых проводит ток в своем направлении. Эти группы вентилей чаще всего собираются по трехфазной мостовой, трехфазной нулевой, шестифазной (шестипульсной) нулевой схемам.

К преобразовательной части относят также сетевой трансформатор, автоматические выключатели на стороне постоянного и переменного тока, сглаживающий реактор, уравнительные реакторы. Сетевые трансформаторы по своим номинальным параметрам - напряжению и току - согласуются с номинальными параметрами электропривода. Автоматические выключатели применяют для защиты преобразователя

и электродвигателя в аварийных режимах. Назначение сглаживающих реакторов - уменьшать пульсации тока якоря электродвигателя, ухудшающие его коммутацию, зону прерывистых токов и скорость нарастания аварийного тока. Уравнительные реакторы ограничивают величину уравнительного тока при совместном управлении группами тиристоров в реверсивном преобразователе.

Трехфазная нулевая схема отличается простотой, меньшим числом вентилей, применяемых в схеме. Трехфазная мостовая схема обладает рядом преимуществ по сравнению с трехфазной нулевой: типовая мощность трансформатора меньше, частота пульсаций выпрямленного напряжения выше. Применение шестифазной нулевой схемы для приводов подач мощностью от 0,5 кВт до 5 кВт и с напряжением двигателя не выше 220 В позволяет использовать преимущества как нулевой, так и мостовой схем.

В Приложении В приведена электрическая принципиальная схема серийно выпускаемого электропривода ЭТ6, выполненного по шестипульсной нулевой схеме выпрямления с совместным управлением группами тиристоров, и функциональная схема электропривода серии ЭТУ 3601, выполненного по мостовой схеме с раздельным управлением группами тиристоров. Обе серии приводов позволяют регулировать скорость двигателя в широких пределах изменением напряжения якоря, что удовлетворяет требованиям приводов механизмов подачи станков.

6 Выбор структуры системы управления привода

Системы управления обеспечивают требуемые характеристики электропривода. Они состоят из аналоговых или цифровых регуляторов, изменяющих с необходимой точностью по заданному закону основную и промежуточные координаты привода и ограничивающих допустимые значения промежуточных координат до допустимых, а также из логических устройств, служащих для управления режимами электропривода, сигнализации и защиты.

В зависимости от использованной элементной базы системы управления выполняются аналоговыми, цифровыми и цифро-аналоговыми. Наибольшее распространение в настоящее время получили аналоговые системы.

Составляя обзор существующих структур систем управления приводов, можно отметить, что преимущественное распространение получили системы управления, построенные на принципах подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией (примеры – привода серий ЭТ6, ЭТУ 3601). Структура таких систем изображена на рисунке 6.1. В таких системах автоматически происходит ограничение тока якоря за счет ограничения выходного напряжения регулятора скорости.

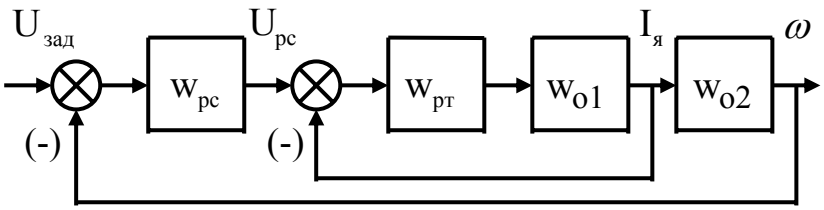


Рисунок 6.1 –Структурная схема с подчиненным регулированием координат

Известны серийно выпускаемые тиристорные электроприводы, имеющие одноконтурные системы регулирования скорости с упреждающим токоограничением (пример – привод серии ЭТ3Р) или токовой отсечкой (пример – привод серии БУ 3509). Упрощенная структурная схема одноконтурной системы приведена на рисунке 6.2.

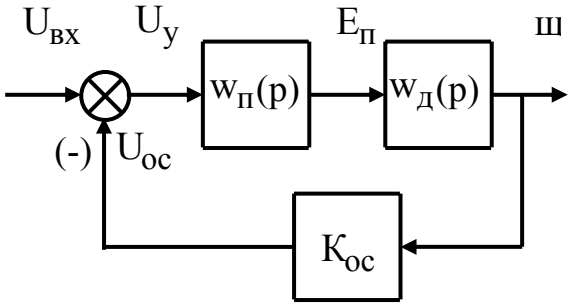


Рисунок 6.2 – Структурная схема с обратной связью по скорости

Ряд современных регулируемых электроприводов даже в линейном приближении представляют собой электромеханические системы, которым трудно придать устойчивость, тем более требуемые высокие динамические показатели движения

рабочего органа. Для такого типа приводов может оказаться эффективным способ управления, называемый модальным управлением. Достоинством модального управления является возможность придать электроприводу наперед заданную динамику «в малом» при любой степени сложности структуры электропривода. Структура модального регулятора МР изображена на рисунке 6.3. Система замыкается по переменным состояния с помощью линейных обратных связей.

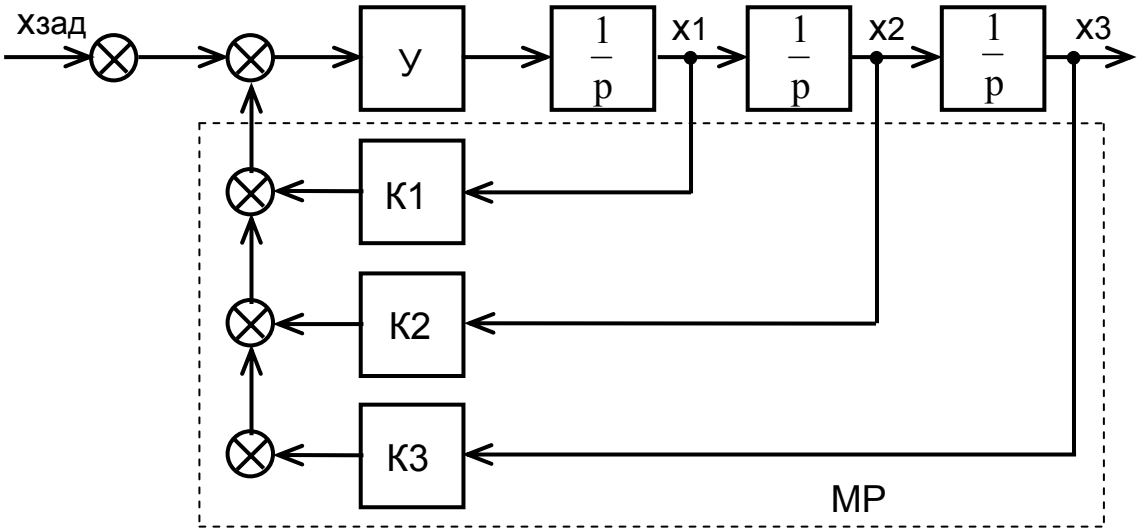


Рисунок 6.3 – Структура модального регулятора

Для тиристорного привода, питающегося напряжением промышленной частоты, использование модального регулятора малоэффективно из-за невысокой полосы пропускания тиристорного преобразователя и значительной пульсации выходного напряжения.

Системы управления приводов строятся из аналоговых элементов, которые объединяются в функциональные узлы, решающие определенные задачи, многие из которых повторяются в различных по своему назначению системах управления и реализуются на типовых элементах унифицированной блочной системы регуляторов УБСР-АИ аналогового действия и УБСР-ДИ дискретного действия, объединенных по принципу единства конструкции, вида входных и выходных сигналов, напряжений питания. Системы управления выполняются в виде двусторонних печатных плат

с широким применением полупроводниковых и гибридных интегральных микросхем (ГИС) и являются наименьшими сменными модулями системы управления.

Применяются два основных метода управления комплектами тиристоров: совместное и раздельное. При совместном управлении импульсы подаются на тиристоры обеих групп одновременно. При этом одна группа работает в выпрямительном режиме с углом регулирования $\alpha_В$, развивает среднее значение выпрямленного напряжения $U\alpha_В$ и обеспечивает протекание тока через нагрузку. В это же время вторая группа переводится в инверторный режим с углом регулирования $\alpha_И$ и среднее значение выпрямленного напряжения $U\alpha_И$. При таком управлении в реверсивном преобразователе образуется замкнутый контур, по которому может протекать уравнительный ток. Для уменьшения этого тока углы регулирования должны быть в определенном соотношении. При совместном согласованном управлении соотношение углов устанавливается таким образом, чтобы выполнялось соотношение: $U\alpha_В = U\alpha_И$. Это равенство выполняется при условии $\alpha_В + \alpha_И = 180^O$. При этом способе управления в уравнительном контуре протекает прерывистый ток, среднее значение которого называют статическим уравнительным током и ограничивают до допустимого значения уравнительными реакторами. Для уменьшения уравнительного тока применяют несогласованное управление группами тиристоров в РТП. При этом соотношение углов управления: $\alpha_В + \alpha_И > 180^O$. При этом в уравнительном контуре всегда имеется постоянная составляющая напряжения, направленная против проводимости тиристоров, поскольку инверторная группа развивает большее напряжение, чем выпрямительная. Это приводит к резкому уменьшению статического уравнительного тока, хотя динамический уравнительный ток уменьшается незначительно. Необходимо отметить также то, что протекание небольшого уравнительного тока благоприятно сказывается на статических характеристиках ТП.

Преимущества совместного управления:

- отсутствие необходимости в переключениях силовой цепи;
- высокое быстродействие при переходе с одного режима в другой и постоянная готовность к этому переходу;

- однозначность в статических характеристиках тиристорного преобразователя.

В курсовом проекте рекомендуется выбрать систему управления, построенную на принципах подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией с совместным управлением группами тиристоров.

7 Разработка математической модели силового канала электропривода как объекта управления и расчет основных параметров элементов

Для того, чтобы исследовать автоматическую систему управления, и в частности систему управления электропривода, необходимо располагать ее математическим описанием, то есть системой дифференциальных уравнений, характеризующих зависимости координат системы от внешних воздействий и друг от друга. В частном случае, когда производные по времени от координат равны нулю, эти уравнения обращаются в алгебраические, описывающие статический режим работы системы.

Если при анализе системы регулирования требуется выявить зависимость выходной (основной) координаты от одного внешнего (входного) воздействия, удобно пользоваться передаточной функцией системы или элемента системы.

Наиболее распространенным способом математического описания, используемым при проектировании и исследовании динамических и статических характеристик системы регулирования координат, является структурная схема системы.

Перспективным является исследование динамических свойств электромеханических систем, в том числе систем электропривода со статическими вентильными преобразователями постоянного и переменного тока, в среде MatLab – Simulink. Сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления – с помощью

обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход позволяет упростить всю модель и, следовательно, повысить ее устойчивость и скорость работы.

В [1, 4] представлена математическая модель двигателя постоянного тока при регулировании скорости напряжением якоря в виде структурной схемы. Там же изображена структурная схема замкнутой системы регулирования скорости. Математическая модель тиристорного преобразователя при проектировании электропривода представляется передаточной функцией инерционного звена. Пример расчета параметров элементов силового канала электропривода как объекта управления приведен в Приложении Г. Основные технические данные трехфазных трансформаторов малой и средней мощности приведены в Приложении Д, таблица 1. Недостающие данные трансформаторов определяются по Приложению Д, таблице 2.

8 Разработка структурной схемы замкнутой системы регулирования скорости

Разработка структурной схемы выполняется при следующих допущениях:

- регулировочная характеристика управляемого преобразователя линейна;
- ток якорной цепи двигателя непрерывный;
- отсутствует реакция якоря двигателя;
- момент инерции, приведенный к валу двигателя, постоянен;
- инерционность датчиков тока и скорости не учитывается ввиду ее малости.

Структурная схема электропривода представлена на рисунке 8.1.

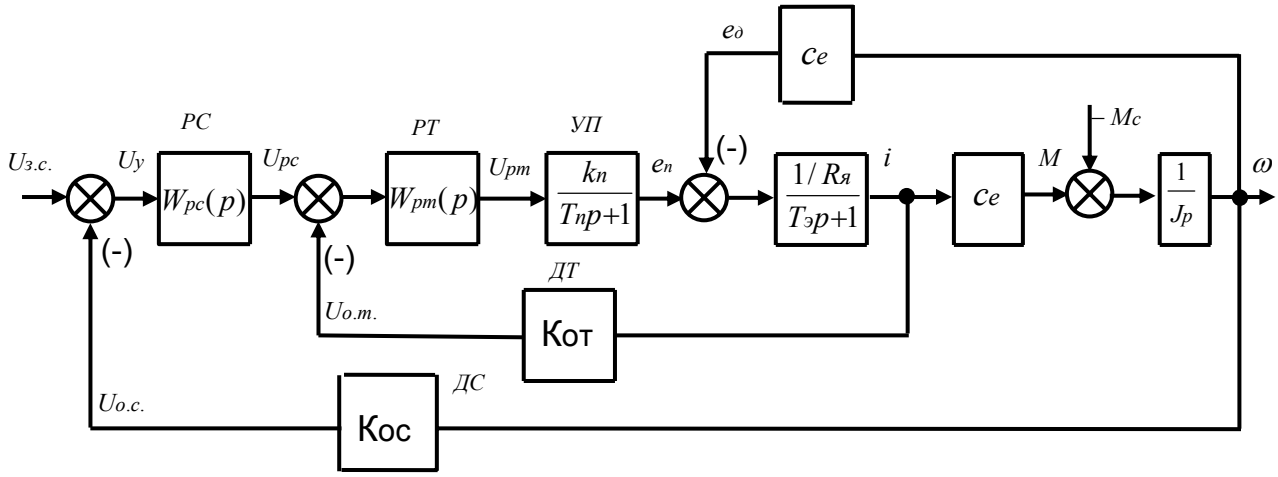


Рисунок 8.1 – Структурная схема электропривода

Обозначения, принятые на схеме:

РС – регулятор скорости;

РТ – регулятор тока;

УП – управляемый преобразователь;

ДТ – датчик тока;

ДС – датчик скорости.

Преобразованная структурная схема системы электропривода для анализа системы по управлению и возмущению приведена в [1].

9 Анализ статического режима работы электромеханической системы электропривода

Согласно [14] статический режим работы электропривода – это режим, в котором значение основной координаты электропривода, обычно скорости, неизменно. Значение скорости должно быть пропорционально значению входного аналогового сигнала; направление вращения должно определяться полярностью входного сигнала. Напряжению 10 В соответствует максимальное значение скорости. Статический режим достаточно полно характеризуется механической характеристикой электропривода.

9.1 Механические характеристики электропривода

9.1.1 Жесткость механических характеристик.

Статическая жесткость механической характеристики двигателя считается по формуле:

$$\beta_{ст.дв} = \frac{Се \cdot См}{R_{я.дв}}, \qquad (9.1)$$

где $Се = \frac{U_{дном} - I_{дном} \cdot R_{я.ном}}{\omega_{ном}}$ – конструктивный коэффициент;

$См = \frac{Мдвном}{Iдвном}$ – конструктивный коэффициент;

$R_{я.дв}$ – сопротивление якоря двигателя;

$U_{дном}$, $I_{дном}$, $\omega_{ном}$ – соответственно номинальные значения напряжения, тока, частоты вращения двигателя.

Для двигателя ПБВ 112L имеем:

$$Се = \frac{47 - 29 \cdot 0{,}123}{62{,}8} = 0{,}69 \ \frac{Вс}{рад};$$

$$См = \frac{17{,}5}{29} = 0{,}603 \ \frac{Нм}{А}.$$

Получаем:

$$\beta_{ст.дв} = \frac{0{,}69 \cdot 0{,}603}{0{,}123} = 3{,}3.$$

Статическая жесткость механической характеристики разомкнутой системы электропривода считается по формуле:

$$\beta_{ст.раз} = \frac{Се \cdot См}{R_{я.ц}},$$

где $R_{я.ц}$ – расчетное сопротивление якорной цепи системы электропривода (в примере расчета $R_{я.ц}$ = 1,05 Ом).

$$\beta_{ст.раз} = \frac{0{,}69 \cdot 0{,}603}{1{,}05} = 0{,}39.$$

Статическая жесткость механической характеристики замкнутой системы электропривода со статическим регулированием скорости:

$$\beta_{ст.замкн} = \beta_{ст.раз}\,(1 + К_{раз}), \qquad (9.2)$$

где $К_{раз}$ - коэффициент передачи (усиления) разомкнутого контура регулирования скорости.

9.1. 2 Электромеханическая постоянная времени электропривода:

$$Т_м = \frac{J_\Sigma}{\beta_{ст.раз}}, \qquad (9.3)$$

где $J\Sigma$ - суммарный момент инерции двигателя и механизма, приведенные к валу двигателя.

$$Т_м = \frac{0.142}{0{,}39} = 0{,}36 \text{ с}.$$

9.1.3 Механические характеристики двигателя, разомкнутой и замкнутой системы электропривода строятся по уравнению:

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_{ст}}, \qquad (9.4)$$

где M_c – статический момент сопротивления на валу двигателя,

$\beta_{ст}$ – жесткость механической характеристики соответственно двигателя, разомкнутой и замкнутой системы электропривода;

ω_0 - скорость идеального холостого хода.

9.1.4 Механические характеристики механизма подач станков описываются выражением:

$$M_c = const. \qquad (9.5)$$

В соответствии с заданием принять:

$$M_{c\,min} = 0{,}1\ M_{ном},\ \ M_{c.max} = M_{ном},$$

где $M_{ном}$ – номинальный момент двигателя привода подачи.

9.1.5 Для достижения заданного диапазона регулирования Д жесткость механических характеристик замкнутой системы нужно повысить до значения [11]:

$$\beta_{ст.зам.треб} = \frac{Д(M_{c.\max} - M_{c.\min}) + \varepsilon_{ст}(M_{c.\max} + M_{c.\min})}{2\omega_0 \varepsilon_{ст}}. \qquad (9.6)$$

Величина статической ошибки $\varepsilon_{ст}$ соответствует допустимому значению ошибки для привода подачи станков при работе на нижнем пределе диапазона регулирования и приведена в таблице 9.1 [4,7]:

Таблица 9.1 - Допустимая погрешность скорости привода подач

Скорость, об/мин	Суммарная погрешность скорости, %
n_{max}	0,5
$0,1n_{max}$	2,0
$0,01n_{max}$	5,0
$0,001n_{max}$	10,0
$0,0001n_{max}$	25,0

Примечание: Значения погрешности скорости в пределах поддиапазона изменяются линейно.

9.2 Расчет требуемого коэффициента усиления регулятора скорости

Увеличение жесткости механических характеристик замкнутой системы можно добиться, повысив общий коэффициент передачи разомкнутой системы. Требуемое значение коэффициента передачи разомкнутой системы при статическом регулировании скорости при изменяющейся нагрузке определяют по формуле:

$$К_{раз.треб} \geq \frac{\beta_{ст.зам.треб}}{\beta_{ст.раз}} - 1. \qquad (9.7)$$

В общем случае при действии внешних возмущающих воздействий (помех) в статической системе регулирования требуемое значение коэффициента передачи разомкнутой системы для обеспечения статической ошибки $\varepsilon_{ст}$ % определяется по формуле:

$$К_{раз.треб} = \frac{(1 + H_c + H_н)Д100\%}{\varepsilon_{ст}\%} - 1, \qquad (9.8)$$

где $H_c = \frac{h_c K_{дв}}{\omega_{ном}}$ - относительная величина помехи астатической системы регулирования от колебания напряжения сети;

$H_н = \frac{h_н K_{дв}}{\omega_{ном}}$ - относительная величина помехи астатической системы регулирования от изменения нагрузки;

$h_c = 0{,}15U_{дв.ном}$ – абсолютное предельное значение помехи от колебания напряжения сети;

$h_н = I_{дв.ном}R_{яц}$ - абсолютное значение помехи от изменении нагрузки;

$K_{дв} = 1 / C_e$ – коэффициент передачи двигателя.

При астатическом регулировании скорости отклонение регулируемой координаты стремится к нулю в статическом режиме при неизменных возмущающих воздействиях. Для астатической системы характерно наличие интегрирующего звена (например, в составе ПИ-регулятора скорости).

Требуемое значение коэффициента передачи разомкнутой системы при астатическом регулировании скорости при действии помех от изменения нагрузки и колебании напряжения питающей сети определяется по формуле:

$$K_{раз.треб} = \frac{(H_c^{/} + H_н^{/})Д100\%}{\varepsilon_{ст}\%}, \qquad (9.9)$$

где $H_c^{/} = \frac{h_c^{/} K_{дв}}{\omega_{ном}}$ - относительная величина производной помехи астатической системы регулирования от колебания напряжения сети;

$H_н^{/} = \frac{h_н^{/} K_{дв}}{\omega_{ном}}$ - относительная величина производной помехи астатической системы регулирования от изменения нагрузки.

Характер и пределы колебания питающего напряжения определяются мощностью источника питания цеховой сети, типом производственного оборудования, частотой пуска электродвигателей оборудования. Характер изменения нагрузки приводов подач при черновой обработке заготовок определяется типом станка. Для

цехов механической обработки для приводов подачи токарных станков можно принять: $h_c^{/}$= 0,005 В/с, $h_н^{/}$= 0; для приводов подачи фрезерных станков $h_c^{/}$= 0,005 В/с, $h_н^{/}$= (1-5) В/с.

Структурную схему для расчета статических характеристик замкнутого по скорости контура регулирования и определения значения требуемого коэффициента усиления регулятора скорости можно получить, положив для исходной структурной схемы в передаточных функциях всех звеньев, кроме регулятора, оператор p = 0. Пример расчетной структурной схемы для одноконтурной астатической системы регулирования скорости приведена на рисунках 9.1.

На рисунке 9.1 фильтр на входе регулятора скорости с коэффициентом передачи $К_ф \cong 0{,}9$ учитывает снижение сигнала от согласующих устройств. Управляемый преобразователь с коэффициентом передачи $К_{уп}$ представляет собой идеальный выпрямитель с линейной характеристикой.

Из структурной схемы определяется требуемое значение коэффициента усиления регулятора скорости, обеспечивающее заданную статическую точность контура регулирования скорости:

$$К_{рс\ треб} = \frac{K_{раз.треб}}{K_ф K_{уп} K_{дв} K_{осс}}. \qquad (9.10)$$

При расчете характеристик системы с подчиненным регулированием координат в структурной схеме необходимо учесть внутренний контур регулирования тока с коэффициентом передачи $К_{зам.т} = 1/ К_{ост}$.

В курсовом проекте по результатам расчета механических характеристик двигателя, замкнутой системы электропривода и механизма подачи станка построить графики $\omega = f(M)$, $M_c = f(\omega)$.

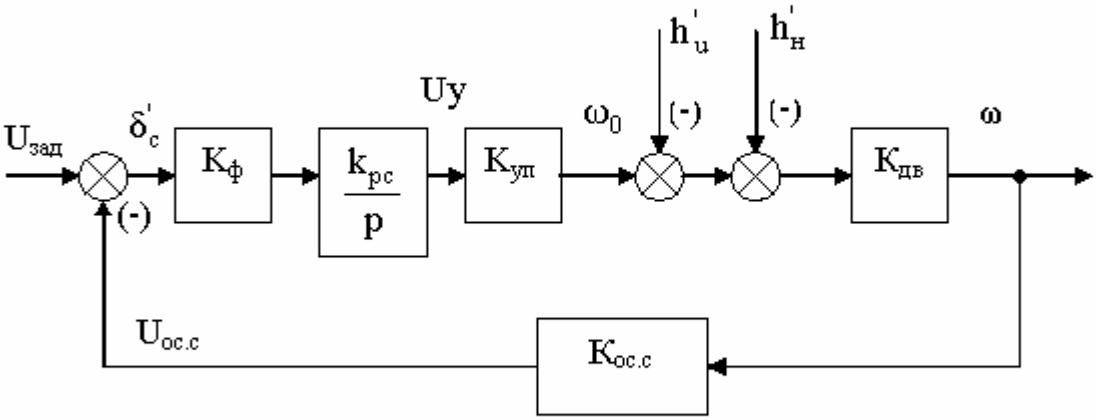


Рисунок 9.1 - Структурная схема астатической системы регулирования для расчета статических характеристик.

10 Расчет динамических характеристик системы электропривода

10.1 Общие положения

В соответствии с ГОСТ Р 50369-92 динамический режим работы электропривода – режим, в котором значение основной координаты электропривода изменяется. В одних приводах динамические режимы редки и представляют собой процессы пуска и торможения при продолжительных по времени статических режимах работы с мало изменяющейся нагрузкой и постоянной скоростью. Другие привода характеризуются частыми изменениями скорости двигателей при отработке сложных траекторий движения рабочего органа и изменением нагрузки в широких пределах (например, следящие привода). В практике инженерных расчетов используют оценки точности в установившихся режимах и оценки качества переходных процессов. Последние разделяют на прямые и косвенные. Применение тех или иных оценок при

анализе и синтезе систем определяется не только объективными факторами, но и личным опытом проектировщика.

Среди возможных режимов систем регулирования важное значение имеет переходный процесс, возникающий при быстром (в пределе мгновенном) изменении задающего или возмущающего воздействия от одного значения до другого. Прямой оценкой качества регулирования служит оценка качества переходной характеристики при единичном ступенчатом воздействии. Приближенно динамические свойства замкнутой системы можно оценить по частотным характеристикам разомкнутой системы – косвенная оценка качества. Оптимизация по быстродействию замкнутого контура сводится к оптимизации на максимум полосы пропускания контура. В соответствии с ГОСТ 27803-88 [7] под полосой пропускания частот замкнутого контура регулирования понимается диапазон частот, в котором сдвиг по фазе первых гармоник сигналов обратной связи по скорости и управляющего сигнала не превышает 90 эл.град., или в котором снижение амплитуды выходного сигнала не более 3 дБ.

Согласно принципам оптимизации систем с подчиненным регулированием координат [1] в каждом инерционном контуре регулирования можно выделить две части – с большой инерционностью T_0 и с весьма малой инерционностью, обусловленной фильтрами датчиков и преобразователей сигналов и характеризуемой некоторой суммой малых постоянных времени $T\mu$. Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W_{oy}(p) = \frac{K_{oy}}{(T_0 p + 1)(T_\mu p + 1)}. \qquad (10.1)$$

В каждый контур вводится регулятор координаты, компенсирующий большие инерционности объекта управления, кроме малых фильтровых, имеющий интегральную составляющую и обеспечивающий максимальное быстродействие замкнутому контуру. При таком подборе параметров регулятора длительность переходного процесса не зависит от большой (или больших) постоянной времени объекта T_0 и определяется только малой постоянной времени $T\mu$.

За критерий качества процессов в системах с астатической последовательной коррекцией может быть принят минимум линейного или квадратичного поля ошибок. При таком подходе к оптимизации в системе могут быть получены либо слишком сильно, либо слишком слабо задемпфированные процессы. Известны [1] стандартные настройки контуров регулирования: настройка на технический оптимум (ТО) и настройка на симметричный оптимум (СО), дающие лучшие в определенном смысле результаты.

10.2 Настройка на технический оптимум

После введения регулятора передаточная функция разомкнутого контура регулирования имеет вид:

$$W_{раз.ТО}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}. \qquad (10.2)$$

Для реализации настройки на технический оптимум необходимо ввести в контур с коэффициентом передачи цепи обратной связи $K_{ос}$ регулятор с передаточной функцией:

$$W_{рег}(p) = \frac{T_0 p+1}{2K_{оу}K_{ос}T_{\mu}p}, \qquad (10.3)$$

что соответствует структуре ПИ-регулятора.

Передаточная функция замкнутого контура имеет вид:

$$W_{зам.ТО}(p) = \frac{1/K_{ос}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1}. \qquad (10.4)$$

Этой передаточной функции соответствует переходная характеристика с перерегулированием σ_{TO} = 4,3 %, временем нарастания выходной координаты t_1 = 4,7 Тμ, коэффициентом демпфирования ξ = 0,707, частотой среза разомкнутого контура $\omega_c = \frac{1}{2T_\mu}$. Настройка на технический оптимум предпочтительнее в системах с частыми пусками и реверсами, в которых переходный процесс при набросе нагрузки не является существенным.

Примечание: если объект управления содержит две большие постоянные времени T_{01} и T_{02}, то регулятор соответствует структуре ПИД-регулятора с передаточной функцией :

$$W_{рег}(p) = \frac{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}{2K_{оу}K_{ос}T_\mu p}. \qquad (10.5)$$

10.3 Настройка на симметричный оптимум

Настройке на симметричный оптимум (СО) соответствует передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{раз.СО}(p) = \frac{4T_\mu p+1}{8T_\mu^2 p^2(T_\mu p+1)}. \qquad (10.6)$$

Для получения такой настройки необходимо придать передаточной функции регулятора вид:

$$W_{рег}(p) = \frac{4T_\mu p+1}{T_и p}, \qquad (10.7)$$

где $T_и = \frac{8K_{оу}K_{ос}T_\mu^2}{T_0}$.

Настройка выполняется с допустимой погрешностью при выполнении условия: $\frac{T_0}{T_\mu} \geq 4$, что соответствует для средних частот : $(T_0 p + 1) \approx T_0 p$.

Передаточная функция замкнутого контура имеет вид:

$$W_{зам.СО}(p) = \frac{1}{K_{ос}} \frac{4T_\mu p + 1}{8T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1) + 4T_\mu p + 1}. \qquad (10.8)$$

Этой передаточной функции соответствует переходная характеристика с перерегулированием σ_{TO} = 43 %, временем нарастания выходной координаты $t_1 = 3{,}1\ T\mu$, коэффициентом демпфирования $\xi = 0{,}707$, частотой среза разомкнутого контура $\omega_c = \frac{1}{2T_\mu}$. Настройка на симметричный оптимум предпочтительнее в системах, в которых определяющими являются наброcы нагрузки и динамический выброс, причем количество регуляторов должно быть минимальным.

Если ко входу контура подключить фильтр (инерционное звено) с передаточной функцией:

$$W_ф(p) = \frac{1}{4T_\mu + 1}, \qquad (10.9)$$

то перерегулирование по управлению снизится до 8 % при времени нарастания $t_1 = 7{,}6\ T\mu$.

Примечание: если объект управления содержит две большие постоянные времени T_{01} и T_{02}, то регулятор соответствует структуре ПИД-регулятора с передаточной функцией :

$$W_{рег}(p) = \frac{(8T_\mu p + 1)(8T_\mu p + 1)}{T_и p}, \qquad (10.10)$$

где $T_и = \frac{128 T_\mu^3 K_{оу} K_{ос}}{T_{01} T_{02}}$.

Передаточная функция замкнутой системы в этом случае примет вид:

$$W_{зам.СО}(p) = \frac{1}{K_{ос}} \frac{(8T_{\mu}p+1)^2}{128T_{\mu}^3p^3(T_{\mu}p+1)+64T_{\mu}^2p^2+16T_{\mu}p+1}. \qquad (10.11)$$

Примечания:

- в области частот, где применима настройка на технический оптимум, настройка на симметричный оптимум дает повышение динамического усиления и тем самым точности регулирования в диапазоне низких частот;

- при оптимизировании внутреннего контура по условиям технического оптимума, настройка по симметричному оптимуму во внешнем контуре может потерять свои преимущества, если для внешнего контура выполняется условие: $\frac{T_0}{T_{\mu}} \leq 4$.

10.4 Особенности настройки контура скорости системы электропривода с подчиненным регулированием координат

При учете влияния обратной связи по противоЭДС двигателя на регулирование тока якоря следует знать [1], что оптимизированный без учета этого действия контур тока не является астатическим, и в установившемся режиме присутствует ошибка регулирования по току, пропорциональная величине статической нагрузки. Требуемая передаточная функция регулятора тока, оптимизирующая контур тока по условию технического оптимума с учетом обратной связи по ЭДС двигателя должна имеет вид:

$$W_{рт}(p) = \frac{R_{яц}(T_{м}T_{яц}p^2+T_{м}p+1)}{2T_{тп}T_{м}K_{тп}K_{ост}p^2}. \qquad (10.12)$$

Реализовать такую передаточную функцию регулятора затруднительно. В практических расчетах действием обратной связи по ЭДС двигателя пренебрегают.

Как следует из преобразованной структурной схемы электропривода [1], контур тока входит в состав объекта управления контура скорости, в котором уже имеется интегрирующее звено с электромеханической постоянной времени $T_м = \frac{R_{яц} J_\Sigma}{C_e^2}$. Для настройки контура скорости на технический оптимум требуется П-регулятор скорости, реализуемый как усилитель с насыщением и коэффициентом усиления:

$$К_{рс} = \frac{C_e K_{ост}}{K_{оос} R_{яц}} \frac{T_м}{4T_\mu}, \qquad (10.13)$$

где $K_{оот}$ и $K_{осс}$ - коэффициенты обратной связи, соответственно, по току и скорости.

Реакция оптимизированного контура скорости на возмущение по моменту сопротивления (нагрузке) при неизменном задании по управлению определяется передаточной функцией по данному воздействию [1]:

$$W_м(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = - \frac{2T_\mu p(T_\mu p+1)+1}{4T_\mu p[(2T_\mu p(T_\mu p+1)+1]+1} \frac{M_c}{\beta_{зам}}, \qquad (10.14)$$

где $\beta_{зам} = \frac{J_\Sigma}{4T_м}$ - жесткость механической характеристики электропривода.

Регулирование скорости пропорциональным регулятором оказывается статическим. В зависимости от соотношения $T_м / 4T\mu$ жесткость механической характеристики замкнутого электропривода может быть больше или меньше жесткости механической характеристики разомкнутого контура скорости.

Для получения астатического регулирования скорости может быть использован симметричный оптимум на основе ПИ-регулятора скорости с передаточной функцией:

$$W_{рс}(p) = \frac{8T_\mu p+1}{8T_\mu p} К_{рс}. \qquad (10.15)$$

Реакция оптимизированного по СО контура скорости на возмущение по моменту нагрузки при неизменном задании по скорости определяется передаточной функцией [1]:

$$W_м(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{2T_\mu p(T_\mu p+1)+1}{8T_\mu p\{4T_\mu p[(2T_\mu p(T_\mu p+1)+1]+1\}+1}\frac{8T_\mu pM_c}{\beta_{зам}}. \qquad (10.16)$$

Механическая характеристика электропривода вне действия токоограничения имеет в установившихся режимах (р = 0) бесконечно большую жесткость.

10.5 Рекомендации по расчету параметров контуров регулирования

В курсовом проекте требуется применить настройку контуров регулирования на технический оптимум. В качестве малой некомпенсируемой постоянной времени контура тока $T\mu$ рекомендуется взять меньшее из постоянных времени - тиристорного преобразователя $T_{тп}$ или якорной цепи $T_{яц}$. Обоснованный выбор величины $T\mu$ внешнего контура скорости выполнить самостоятельно. При расчете параметров регуляторов использовать пример расчета [1, с. 134 - 136].

Пример 10.1. Определить параметры передаточной функции по управлению контура регулирования тока и контура регулирования скорости тиристорного привода с двигателем ПБВ112L.

Исходные данные:

- система построена по принципам подчиненного регулирования координат;
- электромагнитная постоянная времени якорной цепи $T_{яц}$ = 0,0103 с;
- электромеханическая постоянная привода $T_м$ = 0,36 с;
- постоянная времени тиристорного преобразователя $T_{тп}$ = 0,01 с;
- коэффициент передачи цепи обратной связи по току $K_{ост}$ = 0,046 В/А;
- коэффициент передачи цепи обратной связи по скорости $K_{осс}$ = 0,05 Вс/рад.

Для контура тока без учета влияния ЭДС двигателя используется пропорционально-интегральный тип регулятора. В качестве некомпенсируемой постоянной времени принимаем постоянную времени тиристорного преобразователя: $T\mu = T_{тп}$.

Передаточная функция замкнутого контура тока, настроенного на технический оптимум, имеет вид:

$$W_{зам.токаТО}(p) = \frac{1/K_{ост}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1}.$$

Представляя ее в виде типового колебательного звена, получим:

$$W_{зам.токаТО}(p) = \frac{1}{K_{ост}}\,\frac{1}{T_m^2p^2+2\xi T_m p+1},$$

где $T_m = \sqrt{2}\,T_{\mu}$, $\xi = 0.707$.

В итоге получаем:

$$W_{зам.токаТО}(p) = \frac{21{,}74}{0{,}0141^2p^2+2\cdot 0{,}707\cdot 0{,}0141p+1}.$$

Для контура скорости для обеспечения астатического регулирования по нагрузке используется пропорционально-интегральный тип регулятора. Настройку контура скорости осуществляется на симметричный оптимум. Для уменьшения перерегулирования в контуре по управлению используем входной фильтр в виде инерционного звена.

Так как электромеханическая постоянная времени привода $T_м$ значительно больше постоянной времени контура тока T_m, замкнутый контур тока с допустимой точностью можно описать передаточной функцией инерционного звена с передаточной функцией:

$$W_{зам.токаТО}(p) = \frac{1/K_{ост}}{2T_{\mu}p+1}.$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости имеет вид:

$$W_{зам.}(p) = \frac{1}{K_{осс}} \frac{1}{8T_{\mu c}^2 p^2 (T_{\mu c}p+1) + 4T_{\mu c}p + 1}.$$

В качестве некомпенсируемой постоянной времени $T_{\mu c}$ принимается постоянная времени замкнутого контура тока $T_{\mu c} = 2T_{\mu} = 0{,}02$ с.

Представляя передаточную функцию замкнутого контура скорости в виде набора типовых звеньев с помощью известных методов [8, Приложение 2], получим:

$$W_{зам.с}(p) \cong \frac{K_{зам.с}}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где $K_{зам.с} = \frac{1}{K_{осс}}$, $T_1 = 1{,}68T_{\mu c}$, $T_2 = 3{,}41T_{\mu c}$, $\xi = 0{,}6$.

В итоге получаем:

$$W_{зам.с}(p) \cong \frac{20}{(0{,}0316^2 p^2 + 2 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}0316p + 1)(0{,}0682p + 1)}.$$

11 Расчет переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям “в малом” в регулируемом электроприводе

Наглядное представление о динамических свойствах системы автоматического управления электропривода даёт временная характеристика регулируемой

величины или временная характеристика рассогласования по управляющему и возмущающему воздействиям.

В большинстве случаев получить решение $X_{вых}$ (t) практически не удаётся, т.к. функция $X_{зад}$ (t) известна лишь в системах стабилизации и системах программного регулирования, а функция возмущающего воздействия $X_{возм}$ (t) за редким исключением неизвестна. При проектировании систем управления за типовое задающее или возмущающее воздействие принимается единичная ступенчатая функция:

$$1(t) = \{0 \quad при \quad t \lhd 0\} \qquad (11.1а)$$

$$1(t) = \{1 \quad при \quad t \geq 0\} \qquad (11.1б)$$

Всякая временная характеристика может быть вычислена по дифференциальному уравнению операционным методом. С появлением микроЭВМ существенно повысилась продуктивность расчёта, при высокой точности вычислений. Применение метода расчёта временных характеристик с использованием микроЭВМ в инженерной практике становится целесообразным.

Сущность операционного метода расчёта временной характеристики выходной переменной состоит в том, что прежде всего уравнения замкнутой системы преобразуют по Лапласу с учётом начальных условий. Из полученного алгебраического уравнения определяют изображение по Лапласу искомой функции времени , а затем находят оригинал, т.е. искомую функцию времени.

Переходная характеристика h(t) = ω(t) есть реакция системы управления на входное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях. В этом случае изображение ступенчатого воздействия:

$$X_{вх}(p) = \frac{1}{p}. \qquad (11.2)$$

Изображение переходной характеристики системы электропривода (контур регулирования скорости) относительно входного воздействия:

$$H(p) = \Omega(p) = W_{зам\,кс}(p) \cdot \frac{1}{p}. \qquad (11.3)$$

Пример 11.1. Передаточная функция замкнутого контура скорости, настроенного на технический оптимум, соответствует передаточной функции колебательного звена:

$$W_{зам\,кс}(p) = \frac{1}{K_{ooc}} \cdot \frac{1}{T_{э2}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_{э2} \cdot p + 1}, \qquad (11.4)$$

где $T_{э2} = \sqrt{2}\, T_{\mu} = 0{,}0141$ с, $\xi = 0{,}707$, $K_{occ} = 0{,}0955$ Вс / рад.

Найти оригинал переходной функции.

Для отыскания оригиналов h(t) по рациональным изображениям H(p) используем [8, таблица 4.1]. Знаменатели изображений предварительно должны быть разложены на элементарные множители.

Изображение переходной характеристики по управляющему воздействию:

$$H(p) = \Omega_1(p) = \frac{1}{K_{occ} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{э2}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_{э2} p + 1}, \qquad (11.5)$$

$$\Omega_1(p) = \frac{1}{K_{occ} \cdot p} \cdot \frac{1}{0{,}0141^2 p^2 + 2 \cdot 0{,}707 \cdot 0{,}0141 \cdot p + 1}.$$

Оригинал переходной функции ω(t) в соответствии с [8, таблица 4.1, n. 54] имеет вид:

$$\omega_1(t) = \frac{1}{0{,}0955} \cdot \left(1 + C \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot \sin(\gamma \cdot t + \Theta)\right), \qquad (11.6)$$

где: $\gamma = \frac{\xi}{T_{э2}} = \frac{0{,}707}{0{,}0141} = 50{,}14$;

$$\lambda = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_{э2}} = \frac{\sqrt{1-0{,}707^2}}{0{,}0141} = 50{,}14\,;$$

$$C = -\frac{1}{\lambda \cdot T_{э2}} = -\frac{1}{50{,}14 \cdot 0{,}0141} = -1{,}41\,;$$

$$\Theta = \arg tg\frac{\lambda}{\gamma} = arctg\frac{50{,}14}{50{,}14} = 0{,}79\,рад\,.$$

Временная функция выходной координаты описывается выражением:

$$\omega_1(t) = 10{,}47 \cdot \left(1 - 1{,}4 \cdot e^{-50{,}14 \cdot t} \cdot \sin(50{,}14 \cdot t + 0{,}79)\right).$$

По уравнению строится кривая переходного процесса при ступенчатом управляющем воздействии.

Пример 11.2. При настройке контура на симметричный оптимум была принята передаточная функция замкнутой системы по управлению:

$$W_{зам}(p) = \frac{1}{Косс} \cdot \frac{(8 \cdot T_\mu p + 1)}{8 \cdot T_\mu p\left[4 \cdot T_\mu p(2T_\mu p + 1) + 1\right] + 1}\,. \qquad (11.7)$$

Построить кривую переходного процесса по управлению $\Omega_2(t)$. Значения $К_{осс}$ и T_μ взять из Примера 11.1. Заданное значение перерегулирования $\sigma_{зад} = 5\%$.

Изображение переходной функции:

$$W_{зам}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{Косс} \cdot \frac{(8 \cdot T_\mu p + 1)}{8 \cdot T_\mu p\left[4 \cdot T_\mu p(2T_\mu p + 1) + 1\right] + 1}\,. \qquad (11.8)$$

Расчет переходного процесса ведем с помощью системы MathCAD.

$T\mu := 0.01$

$$N(p) := \frac{1}{0.0955}\cdot(8\cdot T\mu\cdot p + 1)$$

$$M(p) := p\cdot[8\cdot T\mu\cdot p\cdot[4\cdot T\mu\cdot p\cdot(2\cdot T\mu\cdot p + 1) + 1] + 1]$$

$$p\cdot[8\cdot T\mu\cdot p\cdot[4\cdot T\mu\cdot p\cdot(2\cdot T\mu\cdot p + 1) + 1] + 1] \text{ solve}, p \rightarrow \begin{bmatrix} p4 := -25 & 0 \\ & -25. \\ (-12.500000000000000000 & - 21.650635094610966169i \\ (-12.500000000000000000 & + 21.650635094610966169i \end{bmatrix}$$

$$M'(p) := \frac{d}{dp}M(p)$$

$t := 0, 0.001 .. 0.5$

$$w1(t) := \mathrm{Re}\left(\frac{N(p1)}{M'(p1)}\cdot e^{p1\cdot t} + \frac{N(p2)}{M'(p2)}\cdot e^{p2\cdot t} + \frac{N(p3)}{M'(p3)}\cdot e^{p3\cdot t} + \frac{N(p4)}{M'(p4)}\cdot e^{p4\cdot t}\right)$$

Кривая переходного процесса по управлению $\Omega_2(t)$ представлена на рисунке 11.1.

Характеристики переходного процесса:

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{X_{\max} - X_{уст}}{X_{уст}}\cdot 100\% = \frac{15 - 10.5}{10.5}\cdot 100\% = 42.8\% > \sigma_{зад}.$$

Время регулирования оцениваем по графику переходного процесса, при отклонении выходной величины от установившегося значения не более чем на 2%:

$t_p = 0.33$ с.

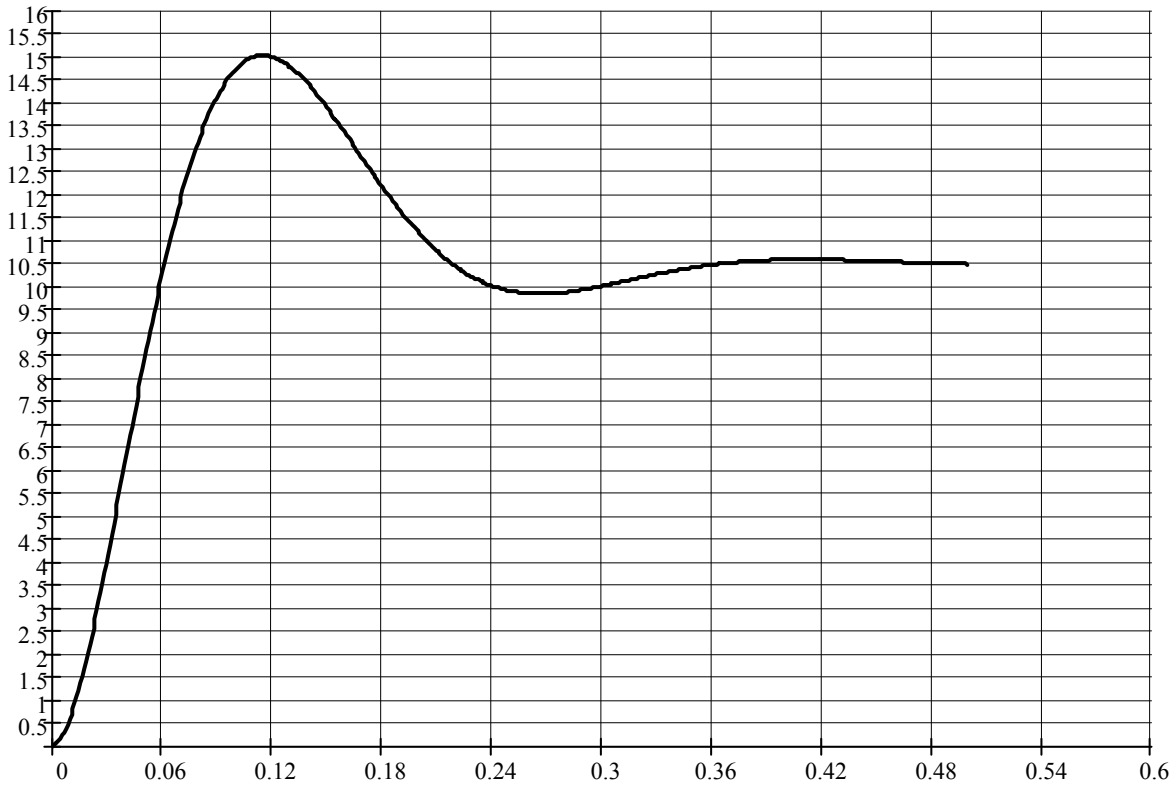


Рисунок 11.1 – Переходный процесс контура скорости по задающему воздействию

Для обеспечения плавного переходного процесса с перерегулированием, не превышающем заданного, необходимо поставить перед системой фильтр низких частот с передаточной функцией:

$$W_{ф}(p)=\frac{1}{T_{ф}p+1}.$$

В результате мы получим менее колебательный переходный процесс (рисунок 11.2).

Характеристики переходного процесса:

Перерегулирование:

$$\sigma=\frac{X_{\max}-X_{уст}}{X_{уст}}\cdot 100\%=\frac{10.54-10.5}{10.5}\cdot 100\%=0.38\%<\sigma_{зад}.$$

Лис

Время регулирования t_p оцениваем по графику переходного процесса при

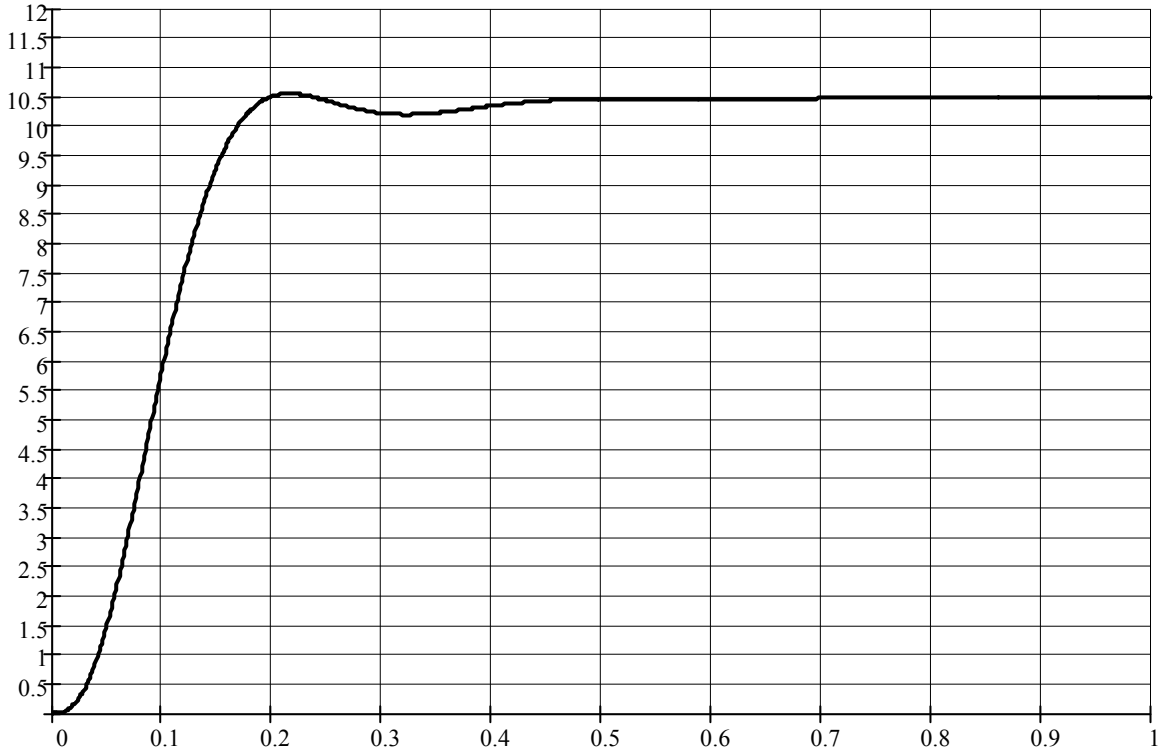


Рисунок 11.2 – Переходный процесс контура скорости по задающему воздействию при значении постоянной времени фильтра $T_ф$ = 0.10 с.

отклонении выходной величины от установившегося значения не более чем на 2%:

$t_p = 0.36$ с .

Пример 11.3. При настройке контура регулирования с ПИ-регулятором скорости на симметричный оптимум была получена упрощенная передаточная функция замкнутой системы по возмущению [1]:

$$W_м(p) = -\frac{4 \cdot T_\mu p(2 \cdot T_\mu p + 1)}{8 \cdot T_\mu p\left[4 \cdot T_\mu p(2 \cdot T_\mu p + 1) + 1\right] + 1}. \qquad (11.9)$$

Составить уравнение переходной функции по возмущению.

Изображение переходной функции по возмущению:

$$\Omega_2(p) = -\frac{4 \cdot T_\mu (2 \cdot T_\mu p + 1)}{8 \cdot T_\mu p\left[4 \cdot T_\mu p(2 \cdot T_\mu p + 1) + 1\right] + 1}. \qquad (11.10)$$

Представляя переходную функцию в виде набора типовых звеньев с помощью известных методов [8, Приложение 2], получим:

$$\Omega_2(p) \cong -4T_\mu \frac{\tau p+1}{(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \qquad (11.11)$$

где $\tau = 2T_\mu$, $T_1 = T_2 = 4T_\mu$, $\xi = 0{,}5$.

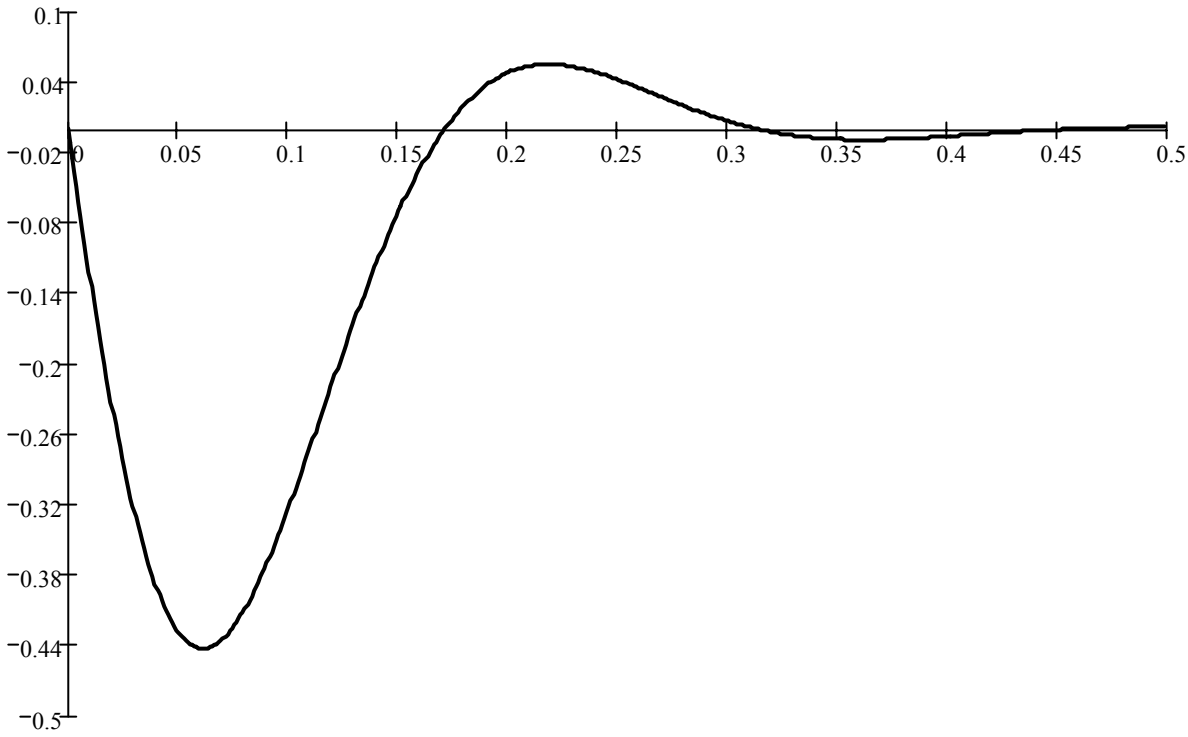


Рисунок 11.3 – Вид переходного процесса по возмущению в системе с ПИ-регулятором скорости

Согласно [8, таблица 4.1, п.60] временная функция скорости примет вид:

$$\omega_2(t) = 2T_\mu \cdot [C_1 e^{-\gamma t} \sin(\lambda t + \theta) + C_2 e^{-\alpha t}], \qquad (11.12)$$

где: $\gamma = \dfrac{\xi}{T_1}$, $\lambda = \dfrac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_1}$, $\alpha = \dfrac{1}{T_2}$,

$$C_1 = \frac{1}{\lambda T_1^2}\sqrt{\frac{\tau^2 + T_1^2(1-2\gamma\tau)}{T_1^2(1-2\gamma T_2)+T_2^2}},$$

$$C_2 = \frac{T_2 - \tau}{T_1^2(1-2\gamma T_2)+T_2^2},$$

$$\theta = -arctg\frac{\lambda T_2}{1-\gamma T_2} + arctg\frac{\lambda\tau}{1-\gamma\tau}.$$

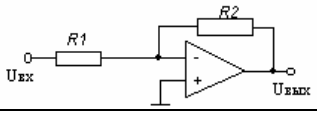
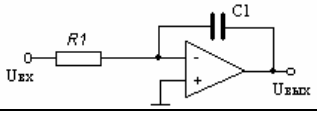
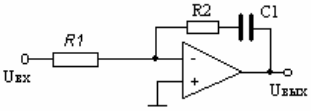
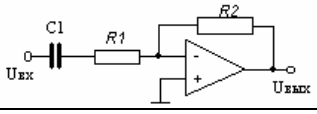
Характер переходного процесса по возмущению изображен на рисунке 11.3.

12 Разработка принципиальной схемы, выбор элементов и конструктивного исполнения регуляторов (частоты вращения, тока якоря)

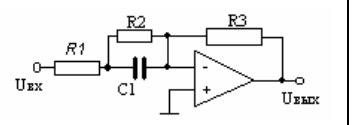
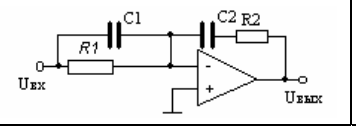
По полученным передаточным функциям регуляторов скорости и тока с рассчитанными параметрами изобразить принципиальную электрическую схему регуляторов, реализованных на операционных усилителях. Примеры схемных решений и расчет параметров регуляторов приведены в таблице 12.1.

Регуляторы системы управления строятся на типовых элементах унифицированной блочной системы регуляторов УБСР-АИ аналогового действия, объединенных по принципу единства конструкции, вида входных и выходных сигналов, напряжений питания.

Таблица 12.1 - Примеры реализации регуляторов на операционных усилителях

Тип регулятора	Реализация регулятора	Передаточная функция $W_р(p)$	Параметры регулятора
П		$-K_п$	$K_п$=R2/R1
И		$-\frac{1}{T_и \cdot p}$	$T_и$=R1·C1
ПИ		$-\frac{T1 \cdot p + 1}{T_и \cdot p}$	T1=R2·C1 $T_и$=R1·C1
Д		$-\frac{T_д \cdot p}{T1 \cdot p + 1}$	$T_д$=C1·R2 T1=C1·R1

Продолжение таблицы 12.1

ПД		$-K \cdot \frac{T1 \cdot p + 1}{T2 \cdot p + 1}$	K=R3/(R1+R2) T1=R2·C1 $T2 = \frac{C1 \cdot R1 \cdot R2}{R1 + R2}$
ПИД		$-\frac{(T1p+1)(T2p+1)}{T_u \cdot p}$	T1=R1·C1 T2=R2·C2 $T_и$=R1·C2 $K_п$=R2/R1

Широко распространено применение операционных усилителей (ОУ) типа К140УД7, К553УД1, К553УД2. Питание ячеек осуществляется стабилизированным напряжением с уровнем напряжения от ±12,5 В до ±15 В. Уровни выходных напряжений - до 10 В, сопротивление нагрузки - не менее 2 кОм.

ОУ типа К552УД2 имеет следующие параметры:

Коэффициент усиления по напряжению, не менее.....$2 \cdot 10^4$

Выходное напряжение при $R_н$ 2 кОм, В.....±10

Входной ток, мкА.....до 1,5

Напряжение смещения нуля, приведенное ко входу, не более, мВ…….....…7,5

Ток потребления, мА.....6

Полоса пропускания в режиме с единичной отрицательной

обратной связью, МГц.....до 0,8

Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс.....0,5

Пример 10.1 По передаточной функции ПИ-регулятора тока:

$$W_{рег}(p) = \frac{T_0 p + 1}{T_u p},$$

где $T_0 = 0{,}04$ с, $T_u = 0{,}01$ с,

изобразить принципиальную схему регулятора, рассчитать параметры регулятора и выбрать элементы регулятора.

По условиям задания принимаем за элементную базу построения регулятора операционные усилители К553УД1В. Электрическая схема подключения операционного усилителя приведена на рисунке 12.1.

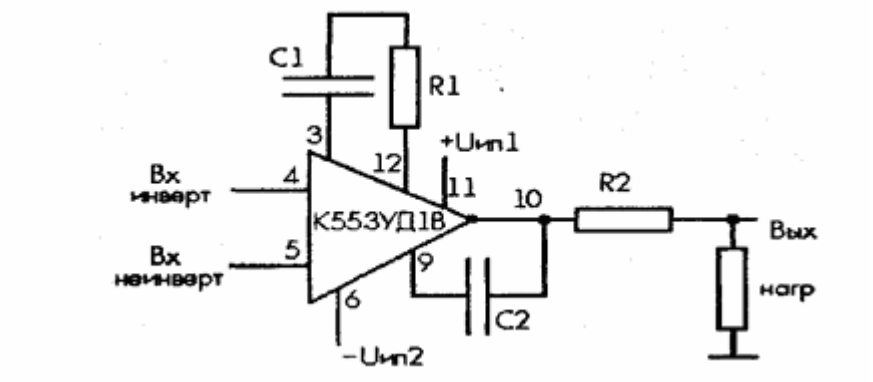


Рисунок 12.1 – Схема подключения операционного усилителя

Электрическая принципиальная схема регулятора тока на базе К553УД1В приведена на рисунке 12.2.

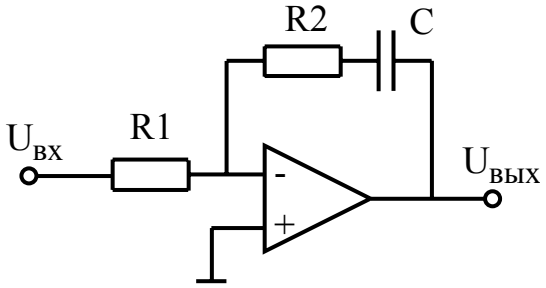


Рисунок 12.2 – Электрическая принципиальная схема регулятора тока (пропорционально-интегральный регулятор)

Параметры ПИ регулятора считаются по формулам:

$$T_0 = R2 \cdot C; \tag{12.1}$$

$$T_u = R1 \cdot C. \tag{12.2}$$

Задаемся величиной емкости конденсатора C:

$$C = 2{,}2 \cdot 10^{-6}\ Ф.$$

Выбираем конденсатор типа К73-17-250В-2,2 мкФ.

Сопротивление R2 считается по формуле:

$$R2 = \frac{T_0}{C},$$

$$R2 = \frac{0,04}{2,2 \cdot 10^{-6}} = 18181 \text{ Ом.}$$

Выбираем [15] резистор типа МЛТ – 0,25 – 18 кОм ± 2 %.

Сопротивление R1 считается по формуле:

$$R1 = \frac{T_и}{C},$$

$$R1 = \frac{0,01}{2,2 \cdot 10^{-6}} = 4545 \text{ Ом.}$$

Выбираем резистор типа МЛТ – 0,25 – 4,7 кОм ± 2 %.

13 Описание работы серийно выпускаемого электропривода, структурно схожего с проектируемым

В курсовом проекте важным разделом является составление принципиальной схемы электропривода с системой управления, разработанной студентом. В Приложении В в качестве примера приведена принципиальная схема электропривода ЭТ6, система управления которого построена по принципам подчиненного регулирования координат. Требуется кратко описать состав и работу привода во всех режимах работы.

14 Заключение

В этом разделе необходимо отразить выполненные в процессе проектирования основные этапы расчетов системы управления привода, сопоставить результаты проектирования с требованиями задания.

Список использованных источников

1 **Терехов, В.М**. Системы управления электроприводов: учебник для студ. вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под. ред. В.М. Терехова.-М.: Издательский центр «Академия», 2005.-304с.

2 **Башарин, А.В**. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г.Соколовский. –Л.: Энергоиздат, 1982.-392с.

3 **Усынин, Ю.С.** Системы управления электроприводов: учебное пособие. –2-е изд., испр. и доп.-Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

4 Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского.-М.: Энергоатомиздат, 1983.-616с.

5 **Ключев, В.И.** Теория электропривода: учеб. для вузов.-2-е изд. перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1998. –704с.: ил.

6 Электротехнический справочник: В 4т. Т.4: Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов).- 8-е изд., испр. и доп. –М.: Издательство МЭИ, 2002.-696с.

7 ГОСТ 27803-91. Электроприводы регулируемые металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования. Введ. 1992–01-01-М.: Издательство стандартов, 1991.-17с.

8 **Макаров, И.М.** Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учебное пособие для вузов / И.М. Макаров, Б.М. Менский.-М.: Машиностроение, 1977.-464с.

9 **Замятин, В.Я.** Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов.–М.: Радио и связь, 1988.–576с.:ил.

10 Справочник по наладке электроустановок / Под ред. А.С. Дорофеюка, А.П. Хачумяна. - изд. 2-е перераб. и доп. -М.: Энергия, 1976. -560 с.: ил.

11 **Онищенко, Г.Б.** Электрический привод: учебник для вузов. –М.: РАСХН, 2003. –320.:ил.

12 Электропривод постоянного тока серии ЭТ6. Паспорт ИЖВЕ 654632. 003ПС.

13 **Белецкий, Д.Г.** Справочник токаря – универсала / Д.Г. Белецкий, В.Г. Моисеев, М.Г. Шеметов; под ред. М.Г. Шеметова.- М.: Машиностроение, 1987.-560 с.: ил.

14 ГОСТ Р 50369 – 92.-М.: Электроприводы. Термины и определения. Введ. 1993-01-07-М.: Издательство стандартов, 1993.-13с.

15 Резисторы: справочник / Ю.Н. Андреев, А.И. Антонян, Д.М. Иванов и др.; под ред. И.И. Четверткова. – М.; Энергоиздат, 1981. –352 с., ил.

Приложение А
(*обязательное*)

Задание на курсовое проектирование

1 Тема курсового проекта***: Выбор структуры и расчет параметров элементов системы управления тиристорного электропривода постоянного тока.***

2 Техническое задание: Спроектировать систему управления электро-привода механизма подачи металлорежущего станка, обеспечивающую технологический процесс с длительным режимом работы исполнительного органа рабочей машины (ИОРМ) с разными скоростями в диапазоне не менее “Д” с периодическими набросами и сбросами нагрузки в пределах (0,1 – 1,0) Мс ном. Требуемые показатели СУЭП взять из таблицы1 в соответствии с заданным вариантом. Тип силового управляемого преобразователя – тиристорный постоянного тока для всех вариантов задания.

3 Необходимые для проектирования данные взять из справочников или рассчитать.

4 Расшифровка показателей таблицы1:

Jмех – момент инерции ИОРМ, приведенный к валу двигателя;

Поддержание параметра – регулирование скорости при постоянном моменте (M= const) или постоянной мощности (P = const);

Д – диапазон регулирования скорости;

$\varepsilon_{ст}$% - статическая ошибка регулирования (%);

$\varepsilon_{дин}$ % - допустимый динамический перепад скорости при ударном приложении нагрузки или изменении управляющего сигнала (%);

ПК – показатель, определяющий качество СУЭП: Б – быстродействие; ТР – точность регулирования; СД – степень демпфирования (плавность движения).

5 Варианты задания взять из таблицы А1.

6 Срок сдачи студентом законченной работы – 14-я неделя семестра.

Таблица А.1 – Варианты задания на проектирование СУЭП

№ вар	Тип двигателя	$P_Н$, кВт	$J_{мех}$, кг·м^2	Поддержание параметра	Д	$\varepsilon_{ст}$, %	$\varepsilon_{дин}$, %	ПК
1.	ПБВ132L	3,0	0,2	M=const	100	5,0	5	Б
2.	ПБВ100M	0,75	0,04	M=const	200	5,0	5	Б
3.	ПБВ100L	1,1	0,06	M=const	300	5,0	5	Б
4.	ПБВ112S	1,1	0,08	M=const	400	5,0	5	Б
5.	ПБВ112M	1,1	0,1	M=const	500	5,0	5	Б
6.	ПБВ112L	1,1	0,15	M=const	600	2,0	5	СД
7.	ПБВ132M	2,2	0,2	M=const	700	2,0	5	СД
8.	ПБВ160M	4,0	0,5	M=const	800	2,0	5	СД
9.	ПБВ160L	5,5	0,6	M=const	1000	2,0	5	СД
10.	ПФВ160S	7,5	0,7	M=const	2000	2,0	5	СД
11.	ПФВ160M	11,0	1,0	M=const	100	0,5	5	ТР
12.	ПБВ132L	3,0	0,02	M=const	200	0,5	5	ТР
13.	ПБВ100M	0,75	0.03	M=const	300	0,5	5	ТР
14.	ПБВ100L	1,1	0,04	M=const	400	0,5	5	ТР
15.	ПБВ112S	1,1	0,05	M=const	500	0,5	5	ТР
16.	ПБВ132L	3,0	0,6	M=const	600	2,0	2	СД
17.	ПБВ100M	0,75	0,4	M=const	700	2,0	2	СД
18.	ПБВ100L	1,1	0,6	M=const	800	2,0	2	СД
19.	ПБВ112S	1,1	0,8	M=const	1000	2,0	2	СД
20.	ПБВ112M	1,1	0,7	M=const	2000	2,0	2	СД
21.	ПБВ112L	1,1	0,6	M=const	100	0,5	5	ТР
22.	ПБВ132M	2,2	1,0	M=const	200	0,5	5	ТР
23.	ПБВ160M	4,0	1,6	M=const	300	0,5	5	ТР
24.	ПБВ160L	5,5	1,8	M=const	400	0,5	5	ТР
25.	ПФВ160S	7,5	1,4	M=const	500	0,5	5	ТР
26.	ПФВ160M	11,0	1,7	M=const	600	5,0	5	Б
27.	ДК1-1,7	0,18	0.01	M=const	700	5,0	5	Б
28.	ДК1-2,3	0,24	0,02	M=const	800	5,0	5	Б
29.	ДК1-3,5	0,37	0,03	M=const	1000	5,0	5	Б
30.	ДК1-5,2	0,55	0,04	M=const	2000	5,0	5	Б

Приложение Б
(*справочное*)

Справочные данные высокомоментных электродвигателей

Таблица Б1 – Технические данные высокомоментных двигателей серии ПВ

Параметр	Тип электродвигателя										
	ПБВ 100М	ПБВ 100L	ПБВ 112S	ПБВ-112М	ПБВ 112L	ПБВ-132М	ПБВ 132L	ПБВ-160М	ПБВ 160L	ПФВ-160S	ПФВ-160М
Номинальный момент, Н·м	7,16	10,5	14	17,5	21	35	47,7	76,4	105	143,2	175
Номинальная скорость, об/мин	1000	1000	750	600	500	600	600	500	500	500	600
Номинальная мощность, кВт	0,75	1,1	1,1	1,1	1,1	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0
Номинальное напряжение, В	52	56	44	47	50	53	70	66	78,5	58	82
Номинальный ток, А	18	24	31,5	29	28	50	50	78,5	90	182	180
Максимальн. момент, Н·м	70	100	130	170	210	350	470	490	510	490	510
Максимальная скорость, об/мин	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1000
Момент инерции якоря, кг·м^2	0,01	0,013	0,035	0,042	0,049	0,188	0,238	0,242	0,298	0,194	0,242
Максимальное теоретическое ускорение, с$^{-2}$	7000	7700	3700	4050	4360	1860	1970	2020	1710	2520	2100
Электромеханическая постоянная времени, мс	10,3	7,6	13,2	10,1	8,6	14,2	12,3	8,5	7,9	9,9	8,5
Электромагнитная постоянная времени, мс	5,3	5,75	6,75	7,3	7,65	7,35	7,85	10,6	11,8	9,25	10,6
Тепловая пост. времени нагрева, мин	60	70	60	70	80	90	100	—	—	—	—
Сопротивл. обмотки якоря при 15°С, Ом	0,222	0,139	0,109	0,123	0,144	0,0574	0,070	0,0317	0,034	0,031	0,0325
Масса, кг	29	35	45	51	57	88	105	168	182	162	176
Высота оси вращения, мм	100	100	112	112	112	132	132	160	160	160	160
Длина, мм	476	536	515	555	595	652	722	786	841	731	786

Таблица Б2 – Технические данные высокомоментных двигателей серии ДК1

Параметр	Тип электродвигателя			
	ДК1-1,7-100АТ	ДК1-2,3-100АТ	ДК1-3,5-100АТ	ДК1-5,2-100
Номинальный момент, Н·м	1,7	2,3	3,5	5,2
Номинальная скорость, об/мин	1000	1000	1000	1000
Номинальная мощность, кВт	0,18	0,24	0,37	0,55
Номинальное напряжение, В	36	48	60	110
Номинальный ток, А	8	7,5	7,5	6,5
Максимальный момент, Н·м	11,8	14,1	24,5	38,2
Максимальная скорость, об/мин	2000	2000	2000	2000
Момент инерции якоря, кг·м^2	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$2{,}7\cdot10^{-3}$	$2{,}85\cdot10^{-3}$	$3{,}9\cdot10^{-3}$
Максимальное теоретическое ускорение, с$^{-2}$	5600	5200	8600	9800
Электромеханическая постоянная времени, мс	25	20	15	10
Электромагнитная постоянная времени, мс	2,5	3	3,5	5,3
Тепловая постоянная времени нагрева, мин	45	50	60	60
Сопротивление якоря, Ом	0,75	0,9	1,15	2,1
Индуктивность якоря, мГн	1,88	2,7	4,02	11,1
Масса, кг	15,4	18	20	25,8
Высота оси вращения, мм	80	80	80	80
	295	328	361	427

Приложение В
(*справочное*)

Принципиальная, функциональная схемы и описание работы серийно выпускаемых электроприводов

В.1 Описание работы электропривода ЭТУ 3601

В.1.1 Общие положения

Комплектный электропривод ЭТУ 3601 создан на базе тиристорного устройства управления БТУ 3601 и двигателей постоянного тока мощностью от 0.5 до 18.5 кВт.

Тиристорные устройства управления серии БТУ 3601 предназначены для создания на основе высокомоментных двигателей постоянного тока, а также других типов двигателей, имеющих номинальный ток не более 200 А и номинальное напряжение не более 440 В, быстродействующих широкорегулируемых электроприводов различных производственных механизмов, в том числе механизмов подач металлорежущих станков с числовым программным управлением.

Устройство выпускается в двух климатических исполнениях: УХЛ и О по категории размещения 4 в соответствии с ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70, и могут встраиваться в шкафы комплектных устройств управления при условии, что температура воздуха внутри последних не превышает 45 ˚С для исполнения УХЛ4 и 55 ˚С для исполнения О4.

В.1.2 Принцип работы устройства БТУ 3601

Устройство управления БТУ 3601 является основным элементом электропривода, в котором происходит преобразование переменного напряжения 3-фазной питающей сети в постоянное напряжение, подаваемое на якорь электродвигателя, и в котором осуществляются все необходимые функции по управлению поступающим к якорю потоком энергии с целью регулирования его частоты вращения в функции сигналов задатчика частоты вращения.

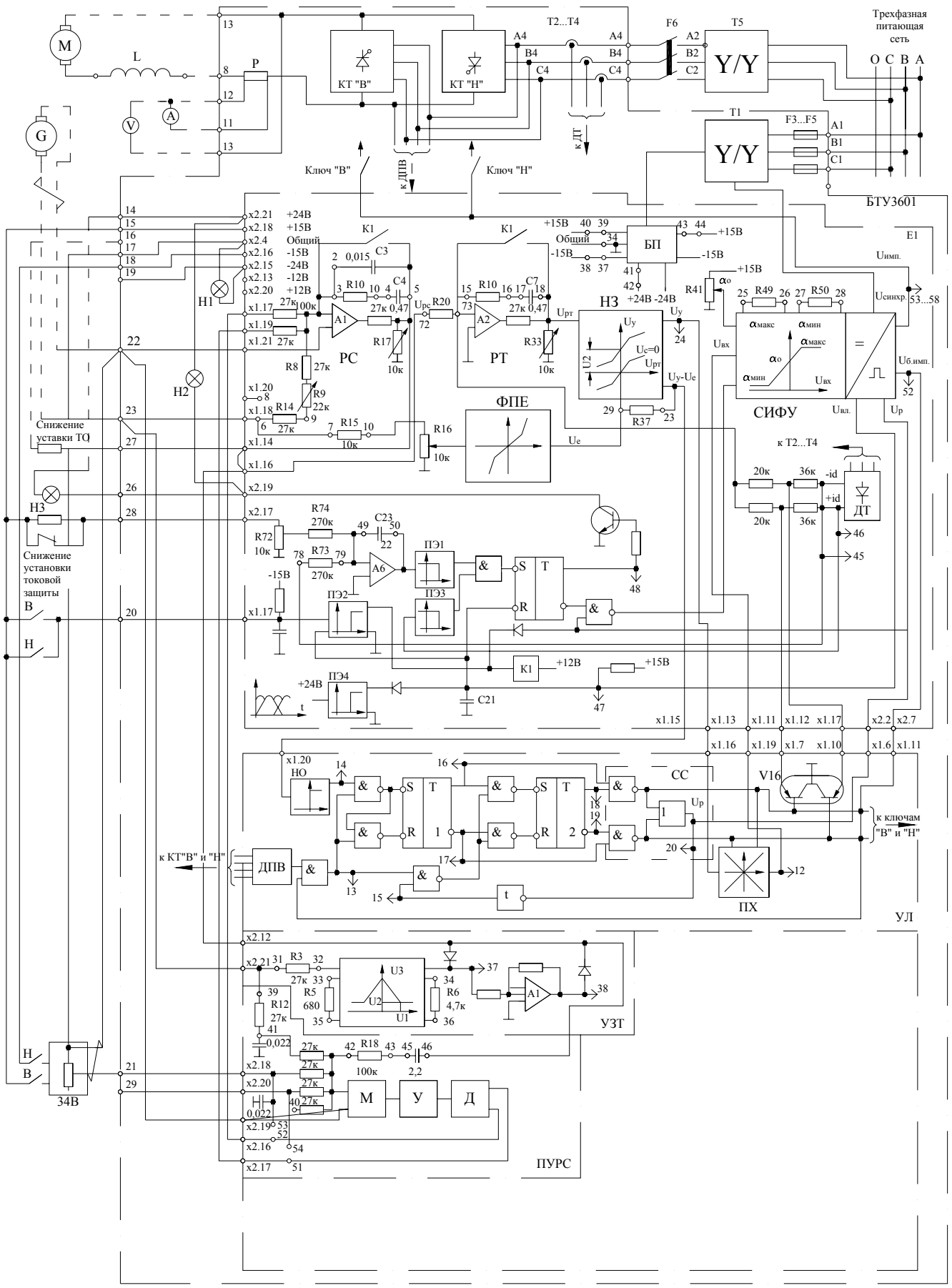


Рисунок В.1 – Функциональная схема привода ЭТУ 3601

Функциональная схема устройства управления серии БТУ 3601, отражающая также его взаимосвязь с другими элементам электропривода, приведена на рисунке В1. Силовая часть устройства, выполненная в виде реверсивного 3-фазного мостового тиристорного управляемого выпрямителя, работающего по принципу раздельного управления силовыми комплектами тиристоров КТ «В» и КТ «Н» с запиранием неработающего комплекта (без уравнительных токов), подключается к питающей сети через согласующий трансформатор Т5 и автоматический выключатель F6, осуществляющий защиту комплексных устройств от токов короткого замыкания и длительных перегрузок выпрямителя.

Якорь электродвигателя М подключается к зажимам постоянного электрического тока силовых вентильных комплектов через сглаживающий дроссель или непосредственно.

Схема управления устройством выполнена по принципу двухконтурной системы подчиненного регулирования координат с ПИ-регуляторами тока и скорости и конструктивно размещена на двух выемных печатных платах Е1 и Е2.

Первая плата Е1 содержит элементы, необходимые для управления нереверсивным электроприводом, а именно:

а) систему импульсно-фазового управления - СИФУ;

б) регуляторы скорости и тока – РС и РТ;

в) функциональный преобразователь э.д.с. двигателя - ФПЕ;

г) нелинейное звено - НЗ;

д) блок питания - БП;

е) датчик тока - ДТ;

ж) узел защиты и сигнализации.

Для устройств с диапазоном регулирования 1:1000 в плате Е1 необходимо установить перемычки между лепестками 6 и 7; с диапазоном 1: 10000 – установить перемычки 2 - 3, 6 - 7 и выпаять резисторы R10; R14.

Вторая плата Е2 имеет две модификации, соответственно, для исполнений устройств с диапазоном регулирования скорости 1: 1000 и 1: 10000.

Плата Е2 для исполнения устройства с диапазоном 1: 10000 имеет следующие функциональные узлы:

а) логическое устройство системы раздельного управления УЛ с переключателем характеристик ПХ и датчиком проводимости вентилей ДПВ;

б) узел зависимого токоограничения УЗТ;

в) предварительный усилитель регулятора скорости ПУРС, выполненный по схеме модулятор-усилитель-демодулятор.

Плата для исполнения с диапазоном 1: 1000 отличается отсутствием узла ПУРС.

В плате Е2 для исполнения с диапазоном 1: 1000 необходимо установить перемычки 51-54 и 52-53.

Пропорционально-интегральные регуляторы скорости и тока выполнены соответственно на операционных усилителях А1 и А2. Параметры регуляторов определяются величинами сопротивления резисторов и емкостей конденсаторов в цепи обратной связи и во входной цепи (выбор параметров коррекции). Выходной сигнал регулятора скорости (сигнал заданного значения тока) Upc является задающим для внутреннего токового контура, поэтому ограничение максимальной величины Upc с помощью резистора R17 приводит и к ограничению максимально возможного тока якоря двигателя в переходных режимах пуска и торможения или при перезагрузках.

Регулятор скорости для исполнений устройства с диапазоном регулирования 1: 10000, как уже отмечалось выше, содержит предварительный усилитель ПУРС с двойным преобразованием сигнала (модулятор-усилитель-демодулятор) с коэффициентом усиления около 100 и высокой термостабильностью. ПУРС выполнено в двух инвертирующих операционных усилителях. Входной сигнал подается на указанные усилители через модуляторы (транзисторы V10, V11). Усилительные сигналы через демодуляторы (транзисторы V14, V15) подается на входы усилителя постоянного тока А1 платы Е1 (зажимы X1.17 и X1.17). Модулятор и демодулятор работают на частоте 2-3 кГц, вырабатываемой генератором прямоугольных импульсов (усилитель А3 платы Е2).

В исполнении устройства с диапазоном регулирования 1: 1000 ПУРС на плате Е2 не устанавливается, а вместо него устанавливаются перемычки 52-53 и54-51,

благодаря которым сигнал от задатчика частоты вращения ЗЧВ, подаваемые на зажимы 21 или 29 внешнего клеммника, поступает непосредственно на входы усилителя А1 платы Е1. Усилитель А1 в этом случае охватывается корректирующей цепочкой обратной связи R10, С4, а конденсатор С3 отключается. В устройствах с диапазоном регулирования 1: 10000 роль корректирующей цепочки обратной связи RC выполняет цепь R18, С11 платы Е2.

Для обеспечения постоянства коэффициента усиления управляемого выпрямителя в режиме непрерывного и прерывистого токов в канал регулирования введено нелинейное звено (НЗ) с характеристикой обратной регулировочной характеристике управляемого выпрямителя в режиме прерывистого тока. Нелинейное звено выполнено на операционном усилителе А4 платы Е1 с нелинейной обратной связью. Управляющее напряжение Uy на входе НЗ представляет сумму сигналов, пропорциональных величине тока и э.д.с. двигателя:

$$Uy=Upт+Ue.$$

Сигнал, пропорциональный э.д.с. двигателя Ue, формируется с помощью функционального преобразователя э.д.с. (ФПЕ), имеющего арксинусную характеристику и выполненного на операционном усилителе А3 платы Е1. Величина сигнала Ue (единичная положительная связь э.д.с. двигателя) выставляется с помощью переменного резистора R16 при номинальной частоте вращения двигателя и холостом ходе таким образом, чтобы среднее значение выходного напряжения регулятора тока Upт было равно нулю.

При такой настройке сигнал Upт становится пропорциональным только току двигателя, и по этому ограничение его максимального уровня с помощью резистора R33 обеспечивает также ограничение максимальной величины составляющей выпрямленного напряжения Ud - E=Id$\times$Rэ, которая непосредственно определяет ток якоря двигателя. Таким образом осуществляется дополнительное ограничение максимально возможного тока двигателя (так называемые упреждающие токоограничение). Но так как в устройстве основное ограничение тока осуществляется путем ограничения максимальной величины сигнала задания тока (Upc) с помощью резистора RI7 платы Е1, то дополнительное токоограничение, как менее точное,

пользуется лишь для ограничения величины первого выброса тока, которого основное токоограничение не исключает.

Для согласования однополярной регулировочной характеристики СИФУ α = f(Uвх) с реверсивным сигналом Uу служит переключатель характеристик ПХ в плате Е2, выполненный на операционном усилителе А1 и транзисторных ключах V1. Для ограничения углов регулирования в СИФУ, а также выставления начального угла регулирования служит управляющий орган СИФУ, выполненный на операционном усилителе А3 платы Е1.

Для изменения уставки токоограниченя в зависимости от частоты вращения двигателя в соответствии с характеристикой (для высокомоментных двигателей) в системе регулирования предусмотрен узел зависимого токоограничения УЗТ. Принцип действия УЗТ основан на ограничении (по модулю) выходного напряжения регулятора скорости в зависимости от величины напряжения тахогенератора. Максимальное выходное напряжение УЗТ (точки 37, 38) устанавливается резистором R6, минимальное — резистором R5. Резистором R3 устанавливается наклон характеристики вход-выход УЗТ.

Сигнал обратной связи по току формируется с помощью датчика тока (ДТ), питающегося от трансформаторов тока Т2...Т4. Реверсирование сигнала обратной связи по току обеспечивается транзисторными ключами V16 платы Е2.

Управление транзисторными ключами V16, а также подключение выхода СИФУ к необходимому комплекту тиристоров осуществляется логическим устройством управления УЛ. УЛ включает в себя, кроме ПХ и ключей V16:

-нуль-орган (НО);

-триггер 1 заданного направления тока;

-триггер 2 истинного направления тока;

-схему совпадения состояний триггеров (СС);

-элемент отсчета выдержки времени;

-датчик проводимости вентилей ДПВ.

При изменении полярности напряжения (Uу—Uе) на промежуточном выходе нелинейного звена НЗ изменяется сигнал на выходе НО. После исчезновения тока в силовой цепи на выходе датчика проводимости ДПВ формируется сигнал «1», и

при отсутствии управляющих импульсов формируется сигнал $U_{бл.имп} = 1$ и триггер 1 перебрасывается в новое состояние.

Схема совпадения СС фиксирует несоответствие состояний триггеров (Up = 0). Сигналом Up = 0 обеспечивается блокировка выдачи управляющих импульсов СИФУ, а также запускается элемент отсчета выдержки времени t. После отсчета выдержки времени (примерно 1 мс) формируется сигнал «1» на выходе элемента t, и при отсутствии блокирующего сигнала ДПВ триггер 2 перебрасывается в новое состояние. Если во время отсчета выдержки времени на вход НО поступает команда на включение в первоначальное положение, то триггер 1 возвращается в исходное состояние, соответствующее триггеру 2, и мгновенно разрешается выдача управляющих импульсов на тиристоры первоначально работавшего комплекта. Это позволяет исключить потери информации в системе регулирования тока нагрузки, уменьшить бестоковые паузы и обеспечить тем самым устойчивую работу преобразователя.

Нуль-орган выполнен на усилителе А2, триггер 1 — на микросхеме Д1, триггер 2 — на микросхеме Д2, а схема совпадения и элемент t — на микросхеме ДЗ. Датчик проводимости вентилей работает по принципу контроля напряжения на тиристорах и состоит из диодных мостов V4...V6, оптронов V7...V9, резисторов R7...R9...R11, установленных в силовой части устройства, и нуль-органа (транзисторы V10, V11). При наличии напряжения на всех тиристорах вход нуль-органа (переходы эммитер—база транзисторов V10, V11) шунтируется, в результате чего транзисторы VI0, V11 закрываются и на выходе ДПВ формируется сигнал «1».

Система импульсно-фазового управления (СИФУ) предназначена для преобразования постоянного управляющего напряжения, вырабатываемого системой автоматического регулирования, в последовательность прямоугольных управляющих импульсов соответствующей фазы, подаваемых на управляющие переходы тиристоров силовых вентильных комплектов.

СИФУ состоит из двух идентичных каналов фазосмещения и управляющего органа УО. Каждый канал СИФУ выполнен по принципу одноканального управления двумя противофазными вентилями выпрямительного моста, что практически исключает асимметрию противофазных управляющих импульсов. Каналы фазос-

мещения выполнены по принципу «вертикального» управления с линейно возрастающим опорным напряжением.

В целях обеспечения максимального быстродействия реверсивного управляемого выпрямителя при использовании одного комплекта СИФУ каждый канал подготавливается к выдаче управляющих импульсов не только к началу полупериода синхронизирующего напряжения, но и в любой другой момент времени от специального сигнала (Up), формируемого логическим устройством раздельного управления в момент отсчета им бестоковой паузы при переключении силовых комплектов вентилей, причем повторные управляющие импульсы появляются после переключения только в тех каналах, где опорное напряжение превышает новое значение управляющего напряжения.

В.2 Устройство и работа электропривода серии ЭТ 6

В.2.1 Общие положения

Электропривод серии ЭТ6 [12] представляет собой электромеханическое устройство, служащее для регулирования и стабилизации частоты вращения электродвигателя постоянного тока в диапазоне 1÷10000.

Принципиальная схема электропривода приведена на рисунке В.2. В приводе можно выделить следующие узлы:

– регулятор скорости;
– регулятор тока;
– узел зависимого токоограничения (УЗТ);
– система импульсно-фазового управления (СИФУ);
– управляемый выпрямитель (УП);
– датчик тока;
– датчик скорости - тахогенератор;
– двигатель;
- силовой трансформатор;
– уравнительные реакторы.

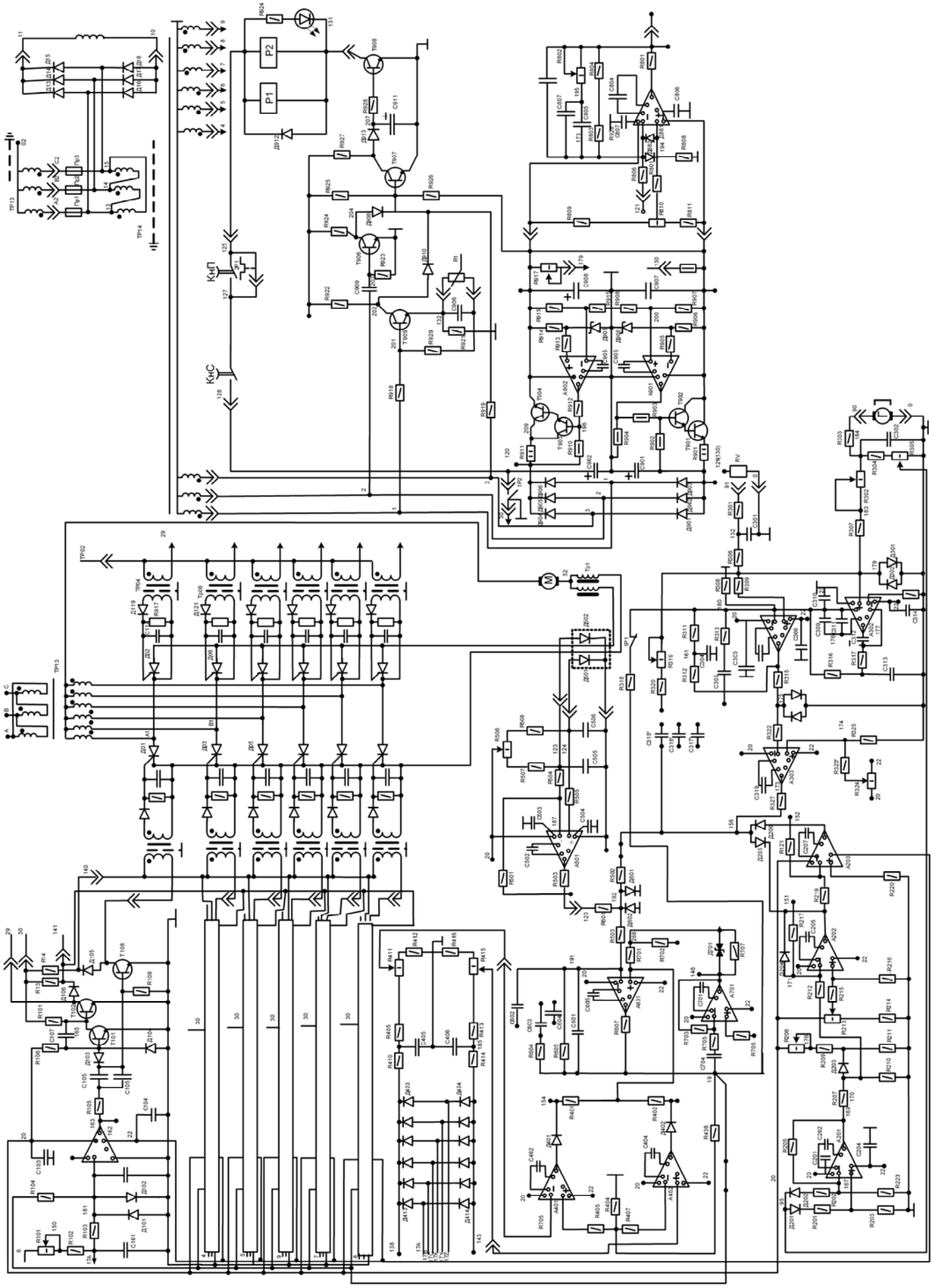


Рисунок В.2.1 – Схема электрическая принципиальная привода

В.2.2 Принцип работы электропривода

Электропривод состоит из двух замкнутых контуров подчиненного регулирования – контура тока (РТ) и контура скорости (РС).

Работа электропривода осуществляется следующим образом:

При наличии рассогласования на входе регулятора скорости (РС) на его выходе формируется сигнал, определяемый законом регулирования регулятора скорости, который, сравниваясь с текущим значением тока якоря, поступает на вход регулятора тока (РТ). Регулятор тока усиливает и преобразует в соответствии с законом регулирования регулятора тока эту разность и подает управляющее напряжение Uу на схему формирования управляющих импульсов (СИФУ), функция которой заключается в формировании и распределении импульсов управления силовых тиристоров. По мере уменьшения рассогласования (под действием отрицательной обратной связи по частоте вращения) происходит стабилизация частоты вращения двигателя на уровне, пропорциональном напряжению задания (Uз). Коэффициент усиления системы регулирования обеспечивает необходимый диапазон регулирования и достаточную точность поддержания скорости в условиях действия на привод возмущающих воздействий.

Ограничения тока якоря двигателя осуществляется путем ограничения напряжения выхода регулятора скорости.

Предусмотрено зависимое ограничение тока в функции частоты вращения (работа УЗТ) и ограничение типа «токовая отсечка».

В.2.3 Работа тиристорного преобразователя

Тиристорный преобразователь содержит управляемый реверсивный шестипульсный выпрямитель, формирователь управляющих импульсов и систему управления электропривода (СУЭП).

СУЭП (смотри принципиальную электрическую схему привода ЭТ6) состоит из:

- схемы усилителя – регулятора скорости;

- схемы усилителя – регулятора тока с датчиком тока и схемой ограничения производной РТ;

- схемы ограничения минимального угла управления;

- схемы ограничения тока якоря;

- схемы защиты;

- источника питания;

- схемы дополнительного усилителя.

В.2.4 Силовая схема

Силовая схема состоит из следующих аппаратов:

- согласующего трансформатора ТС /Тр/;

- управляемого выпрямителя;

- токоограничивающих дросселей УР1, УР2.

Трансформатор ТС имеет две силовые обмотки и обмотку для питания цепей управления. Между силовой обмоткой и обмоткой управления проложен экран. Первичная обмотка соединена в треугольник, вторая – в шестифазную звезду с нулевым выводом, третья обмотка – в звезду.

Обмоточные данные трансформаторов и дросселей имеются на каркасе катушек.

Выпрямитель состоит из 12 тиристоров /Д0I - ДI2/, включенных по шестифазной однополупериодной схеме с нулевой точкой трансформатора. Уравнительный ток при совместном управлении группами тиристоров ограничивается двумя токоограничивающими реакторами. Для защиты тиристоров от коммутационного перенапряжения включены защитные цепочки (RC).

В.2.5 Схема формирования управляющих импульсов

Схема формирования управляющих импульсов осуществляет формирование и распределение управляющих импульсов на тиристоры силовой схемы и состоит из шести идентичных каналов управления. Система импульсно-фазового управления выполнена в соответствии с вертикальным принципом управления.

Принцип работы СИФУ рассмотрим на примере работы канала фазы AI.

Отфильтрованное опорное напряжение синусоидальной формы снимается с конденсатора C101 и через резистор R103 подается на вход нуль органа A101. Нуль - орган выполнен на интегральном операционном усилителе с большим коэффициентом усиления. Моменты времени переключения нуль - органа A101 выделяются дифференцирующей цепочкой R106, C105, C106, R107, дифференциалы напряжений усиливаются транзисторами T101, T102 и через импульсный трансформатор TP02 поступают на управляющий электрод тиристора анодной группы, а импульсы, усиленные транзистором T103 через импульсный трансформатор TP01 поступают на управляющий электрод тиристора катодной группы. Резисторы R13, R14 служат для ограничения тока через первичные обмотки импульсных трансформаторов и являются общими для всех шести каналов СИФУ. Ширина управляющих импульсов составляет 10-12 электрических градусов.

В.2.6 Регулятор скорости

Усилитель – регулятор скорости совместно с регулятором тока и их корректирующими цепями обеспечивают необходимые показатели качества работы электропривода в статике и динамике.

Усилитель – регулятор скорости представляет собой многокаскадный усилитель постоянного тока с цепями коррекции, собранный на трех микросхемах. Первый каскад состоит из двух дифференциальных усилителей A301, A302. Структура первого каскада и соответствующей выбор входящих в его состав эле-

ментов обеспечили термостабильность характеристик электропривода за счет компенсации теплового дрейфа усилителя А301 параллельно включенным усилителем А302. Второй каскад собранный на операционном усилителе А303 служит для получения необходимого коэффициента усиления регулятора скорости.

Усилитель имеет два входа:

91 – вход задающего сигнала;

90 – вход сигнала обратной связи (тахогенератора).

Цепи подстроек коррекции:

R323, R324 – резисторы смещения «нуля» усилителя;

R302, R307 – резисторы подстройки максимальной скорости;

R319, R320, C316, C318 – элементы коррекции регулятора скорости, которые подбираются в процессе наладки.

В.2.7 Регулятор тока с датчиком тока и схемой ограничения производной напряжения на выходе регулятора

Усилитель – регулятор тока выполнен на операционном усилителе А601 и представляет собой пропорционально – интегральный регулятор .

R604, C601 - C604 – элементы коррекции регулятора, которые подбираются при наладке.

Датчик тока предназначен для передачи на вход регулятора тока сигнала обратной связи, пропорционального току якоря электродвигателя.

Датчик тока выполнен на основе магнитодиодов. В состав датчика тока входят:

- два магнитодиода (Д501, Д502), включенных в мостовую схему;
- операционный усилитель постоянного тока А501;

- магнитная система на керамических магнитах.

Балансировка датчика тока производится резистором R506.

Схема ограничения производной (СОП) входит в контур регулирования тока якоря и осуществляет ограничение наибольшего значения полосы пропускания, при которой система автоматического управления вентильным электроприводом (САУ ВЭП) устойчива и сохраняет заданную форму переходной характеристики.

СОП состоит из дифференцирующей цепочки, операционного усилителя А701, стабилитрона Д701, делителя напряжения R701, R702. Схема работает следующим образом:

Выходной сигнал регулятора тока дифференцируется, усиливается и через стабилитрон Д701 поступает на неинвертирующий вход усилителя регулятора тока А601, осуществляя ограничение производной выходного сигнала, при величине входного напряжения А701 большим, чем напряжение пробоя стабилитрона Д701.

В.2.8 Схема ограничения минимального угла управления

Схема ограничения минимального угла управления предназначена для исключения превышения напряжением управления (регулятора тока) в системе фазового управления, уровня опорного напряжения в динамических режимах и при изменении напряжения питающей сети. Схема работает следующим образом.

Опорные синусоидальные напряжения всех шести фаз с точек 17А - 17Е подаются на выпрямительный мост Д403 - Д414. Выпрямленные напряжения через фильтры R410, С405 и R414, С406 поступают на делители напряжения R409, R411, R412 и R413, R415, R416. Резисторы R411 и R415 служат для регулировки уровня ограничения (уставки напряжения ограничения). Напряжение с движков потенциометров R411, R415 поступают на неинвертирующие входы операционных усилителей А401, А402, на инвертирующие входы которых поступает через

делитель R408, R406 и резисторы R405, R407 выходное напряжение регулятора тока. Выходные напряжения А401, А402 через диоды Д401, Д402 и резисторы R401, R402 поступают на неинвертирующий вход операционного усилителя А601 регулятора тока.

Таким образом, усилители А401, А402 образуют контур отрицательной обратной связи усилителя – регулятора тока, включаются в работу при достижении напряжения на выходе делителя R408, R406 величины напряжения уставки ограничения и предотвращают дальнейший рост напряжения на выходе РТ. В динамических режимах и при изменении напряжения питающей сети величина напряжения уставки меняется пропорционально изменению величины опорных напряжений, и тем самым обеспечивают исключение превышения напряжения управления (напряжение выхода регулятора тока) уровня опорных напряжений.

В.2.9 Схема ограничения тока якоря двигателя

Схема ограничения тока якоря обеспечивает, в зависимости от подключения, ограничение тока якоря на заданном уровне («токовая отсечка») или зависимое ограничение тока в функции частоты вращения.

Принцип работы токоограничения основан на ограничении выходного напряжения регулятора скорости, которое пропорционально заданному току якоря. При работе токоограничения в режиме «токовой отсечки» выводится в нуль резистор R305 (точка 95 подключается к нулю). Величина уставки задается резистором R213.

При работе нелинейного токоограничения кривая перегрузки по току для двигателей ПБВ апроксимируется двумя прямыми. Перегиб осуществляется за счет изменения коэффициента передачи угла апроксимации.

Схема работает следующим образом.

Напряжение тахогенератора через делитель R304, R305 подается на схему выделения модуля, выполненную на микросхеме А201, с выхода которой снимается сигнал положительной полярности, пропорциональный напряжению тахогенератора. Этот сигнал подается на вход узла аппроксимации, выполненного на элементах R207, R210, R203, R209, R211, Д203.

Точка перегиба определяется величиной напряжения подпора диода Д203 и регулируется в зависимости от типа применяемого электродвигателя резистором R208 на входе усилителя.

В результате суммирования напряжения А201, напряжений узла аппроксимации и смещения усилителя А202 на выходе формируется напряжение подпора диода Д205 заданной величины.

Величина смещения определяет максимальный ток уставки и регулируется резистором R213. Для ограничения сигнала регулятора скорости другой полярности напряжение подпора диода Д206 формируется инвертором А203 подключенным к выходу А202. Диод Д204 ограничивает величину отрицательного напряжения на выходе А202.

Приложение Г

(*справочное*)

Пример расчета параметров элементов силового канала электропривода как объекта управления

Исходными данными расчета являются технические характеристики двигателя электропривода рабочей машины (пример - таблица Г.1)

Таблица Г.1 Технические характеристики выбранного двигателя ПБВ112М

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальный момент, Н·м	17.5
Номинальная скорость, об/мин	600
Номинальная мощность, кВт	1.1
Номинальное напряжение, В	47
Номинальный ток, А	29
Максимальный момент, Н·м	170
Максимальная скорость, об/мин	2000
Момент инерции якоря, $кг \cdot м^2$	0.042
Максимальное теоретическое ускорение, $с^{-2}$	4050
Электромеханическая постоянная времени, мс	10.1
Электромагнитная постоянная времени, мс	7.3
Тепловая постоянная времени нагрева, мин.	70
Сопротивление обмотки якоря при 15 ^{o}С, Ом	0.123
Масса, кг	51
Высота оси вращения, мм	112
Длина, мм	555

Г.1 Расчет параметров и выбор силового трансформатора

Трансформатор выбирается по полной мощности и ЭДС вторичной обмотки.

Полная мощность трансформатора считается по формуле:

$$S_{тр.расч} = К_{сх} \cdot К_з \cdot К_а \cdot К_г \cdot К_i \cdot К_{исп} \cdot U_{дв.ном} \cdot I_{дв.ном}, \qquad (Г.1)$$

где: $К_{сх}$=1,55–коэффициент схемы (для шестипульсной однополупериодной схемы);

$К_з$ =(1÷1,15)=1,05–коэффициент запаса по напряжению;

$К_а$ =1,05–коэффициент запаса, учитывающий неполное открытие тиристоров при максимальном управляющем напряжении;

$К_г$=1,05–коэффициент запаса, учитывающий падение напряжения на обмотках трансформатора и силовых вентилях;

$К_i$=0,415–коэффициент отклонения формы тока (для шестипульсной однополупериодной схемы);

$К_{исп}$ –коэффициент использования, учитывающий допустимый предел превышения напряжения двигателя в режиме ускоренного перемещения рабочего органа, считается по формуле:

$$К_{исп} = \frac{n_{max}}{n_{ном}}, \qquad (Г.2)$$

где: n_{max}=1500– принятая скорость вращения двигателя при ускоренном перемещении рабочего органа, об/мин;

$n_{ном}$=600–номинальная скорость вращения, об/мин.

$$К_{исп} = \frac{1500}{600} = 2,5,$$

$$S_{тр.расч} = 1,55 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 0,415 \cdot 2,5 \cdot 47 \cdot 29 = 2537,12 \text{ В·А}.$$

Фазная ЭДС вторичной обмотки считается по формуле:

$$E_{2\,ф.расч} = К_и \cdot К_з \cdot К_а \cdot К_г \cdot К_{исп} \cdot U_{дв.ном}, \qquad (Г.3)$$

где: $К_и$=0,741–коэффициент для идеальной схемы выпрямления (шестипульсная однополупериодная схема).

$$E_{2\,ф.расч} = 0{,}741 \cdot 1{,}05 \cdot 1{,}05 \cdot 1{,}05 \cdot 2{,}5 \cdot 47 = 100{,}83 \text{ В}.$$

Трансформатор выбирается из условий:

$$S_{тр} \geq S_{тр.расч} \; ; \qquad (Г.4а)$$

$$E_{2ф} \geq E_{2\,ф.расч} \; . \qquad (Г.4б)$$

Исходя из данных, полученных в результате расчета, выбираем трансформатор типа ТСЗМ1-4,0 имеющего номинальные данные, приведенные в таблице Г.2.

Таблица Г.2 –Номинальные данные трансформатора типа ТСЗМ1-4,0

Наименование параметра	Значение параметра
Полная мощность, кВ·А	4
Фазное напряжение первичной обмотки, В	220
Фазное напряжение вторичной обмотки, В	170
Ток х.х., %	16
Напряжение короткого замыкания, %	2,3
Потери х.х., Вт	65
Потери к.з., Вт	120

Г.2 Расчет параметров и выбор тиристоров преобразователя

Тиристоры выбираются по среднему значению токов через вентиль и допустимому обратному напряжению, с проверкой на перегрузочную способность тиристоров в динамических режимах (по защитному показателю).

Средний ток через вентиль считается по формуле:

$$I_{вср} = \frac{I_{дв.ном}}{m \cdot K_{охл}} \, , \qquad (Г.5)$$

где: m = 6 – количество тиристоров выпрямительной группы (для шестипульсной схемы);

$К_{охл}$=0,35–коэффициент охлаждения, учитывающий условия охлаждения тиристоров (воздушное охлаждение со стандартным радиатором).

$$I_{вср}=\frac{29}{6\cdot 0{,}35}=13{,}8\ \text{А}.$$

Максимальное обратное напряжение считается по формуле:

$$U_{обр.max}=К_{з.u}\cdot\sqrt{2}\cdot U_{2л}, \qquad (Г.6)$$

где: $К_{з.u}$=1,4–коэффициент запаса по напряжению;

$U_{2л}$ – линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, считается по формуле:

$$U_{2л}=\sqrt{3}\cdot U_{2ф}. \qquad (Г.7)$$

$$U_{2л}=\sqrt{3}\cdot 170=294{,}45\ \text{В};$$

$$U_{обр.max}=1{,}4\cdot\sqrt{2}\cdot 294{,}45=583\ \text{В}.$$

Максимальная допустимая нагрузка возникает во время пуска, поэтому рассчитываем защитный коэффициент исходя из времени пуска. Кратность пускового момента высокомоментного двигателя принимаем равной 6, т.е. $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$=6. Т.к. ток двигателя прямо пропорционален моменту ($M=КФ\cdot I$), можно сказать, что кратность пускового тока равна 6, т.е. получим значение показателя:

$$I^2_{в.пуск}\cdot t_{пуск}, \qquad (Г.8)$$

где $I_{в.пуск}=\frac{6I_{дв.ном}}{m}$.

$M_{дв} - M_c = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt}$ – уравнение движения электропривода. Принимаем, что при пуске момент нагрузки равен 0 (M_c=0) и двигатель разгоняется линейно за время $t_{пуск}$.

Тогда:

$$M_{дв} = J_\Sigma \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t};$$

$$J_\Sigma = J_{дв} + J_{мех};$$

$$\Delta\omega = \omega_{ном};$$

$$\Delta t = t_{пуск}$$

Защитный показатель и время пуска считаются по формулам:

$$I^2_{в.пуск} \cdot t_{пуск};$$

$$t_{пуск} = J_\Sigma \cdot \frac{K_{исп}\omega_{ном}}{M_{пуск}} = J_\Sigma \cdot \frac{2{,}5 \cdot \omega_{ном}}{6 \cdot M_{ном}}. \qquad (Г.9)$$

Рассчитываем:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30};$$

$$\omega_{ном} = \frac{3{,}14 \cdot 600}{30} = 62{,}8 \ \ с^{-1};$$

$$J_\Sigma = 0{,}042 + 0{,}1 = 0{,}142 \ \ кг \cdot м^2;$$

$$t_{пуск} = 0{,}142 \cdot \frac{2{,}5 \cdot 62{,}8}{6 \cdot 17{,}5} = 0{,}2 \ \ с;$$

$$(6 \cdot \frac{29}{6})^2 \cdot 0{,}2 = 168{,}2 \ \ А^2 \cdot с.$$

Проверка тиристора на перегрузочную способность в динамических режимах производится по условию: $I^2_{в.пуск} \cdot t_{пуск} \le (I^2 \cdot t)_{защ}$.

Исходя из данных, полученных в результате расчета, выбираем [9] тиристор типа Т 122 – 20 – 6 с защитным показателем 613 $А^2$·с.

Г.3 Расчет индуктивности уравнительных реакторов

Индуктивность уравнительного реактора, находится по формуле:

$$L_{ур} = \frac{Lур.расч - Lтр}{2}, \qquad (Г.10)$$

где: $L_{тр}$ – индуктивность трансформатора, находится по формуле:

$$L_{тр} = \frac{Xтр}{2\pi fc},$$

$L_{ур.расч}$ – расчетная индуктивность, находится по формуле [10]:

$$L_{ур.расч} = \frac{U2фном \cdot Кд \cdot \sqrt{2}}{\omega c \cdot Iурmin}. \qquad (Г.11)$$

ω_c–угловая частота питающей сети, считается по формуле:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c .$$

Для $X_{тр}$ = 0,499 Ом (смотри Г.15, а) получаем: $L_{тр}$ = 1,587 мГн .

Расчетное значение уравнительного тока реверсивного управляемого преобразователя:

$$Iурmin = 0{,}2 \cdot Iдном = 0{,}2 \cdot 29 = 5{,}8А .$$

$К_д$ = 0,18 – коэффициент, зависящий от схемы и угла управления [10].

$$L_{уррасч} = \frac{170 \cdot 0.18 \cdot \sqrt{2}}{314 \cdot 5{,}8} = 23{,}75 \text{ мГн}.$$

В результате расчета получаем:

$$L_{урр} = \frac{23{,}75 - 1{,}587}{2} = 11{,}082 \text{ мГн}.$$

Г.4 Расчет параметров силовой цепи

Активное сопротивление якорной цепи считается по формуле:

$$R_{яц} = 1{,}24 \cdot R_{ядв} + R_{преоб} + R_{щ}, \qquad (Г.12)$$

где: 1,24 – температурный коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обмотки якоря двигателя $R_{ядв}$ при его нагреве.

Эквивалентное сопротивление вентилей для шестифазной схемы R_v – находится по формуле:

$$R_v = \frac{1}{Iдвном}, \qquad (Г.13)$$

$$R_v = \frac{1}{29} = 0{,}034 \text{ Ом}.$$

Сопротивление преобразователя $R_{преоб}$ – находится по формуле:

$$R_{преоб} = R_{тр} + \frac{Xтр \cdot m}{2\pi} + Rурр. \qquad (Г.14)$$

Активное сопротивление уравнительного реактора $R_{урр}$ принимаем равным нулю.

Хтр – реактивное сопротивление обмоток силового трансформатора, считается по формуле:

$$Xтр = \frac{\Delta Uкз \cdot U1ф}{100 \cdot I1ф \cdot Кт^2}; \qquad (Г.15)$$

$$Xтр = \frac{2{,}3 \cdot 220}{100 \cdot 6{,}061 \cdot 1{,}294^2} = 0{,}499 \text{ Ом}. \qquad (Г.15, а)$$

Rтр – активное сопротивление обмотки трансформатора, считается по формуле:

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_{кз}}{m \cdot I_1ф^2 \cdot Кт^2}; \qquad (Г.16)$$

$$R_{тр} = \frac{120}{3 \cdot 6{,}061^2 \cdot 1{,}294^2} = 0{,}65 \text{ Ом}.$$

В расчете принято:

$\Delta P_{кз}$=120 – потери х.х трансформатора, Вт;

m = 3 – количество фаз трансформатора;

$I_1ф$ – номинальный ток первичной обмотки трансформатора, считается по формуле:

$$I_{1ф} = \frac{S_{трп}}{3 \cdot U_{1ф}}, \qquad (Г.17)$$

$$I_{1ф} = \frac{4000}{3 \cdot 220} = 6{,}061 \text{ А};$$

$К_Т$–коэффициент трансформации, считается по формуле:

$$К_Т = \frac{U_{1Ф}}{U_{2ф}}, \qquad (Г.18)$$

$$К_Т = \frac{220}{170} = 1{,}294.$$

Определяем активное сопротивление преобразователя:

$$R_{преоб} = 0,65 + \frac{0,499 \cdot 6}{2\pi} + 0 = 1,12 \text{ Ом.}$$

Расчетное сопротивление якорной цепи:

$$R_{я.ц.} = 1,24 \cdot 0,123 + 0,034 + 1,12 = 1,31 \text{ Ом.}$$

Индуктивность якорной цепи, считается по формуле:

$$L_{я.ц} = L_{тр} + L_{як} + L_{упр}, \qquad (Г.19)$$

где: $L_{як}$ –индуктивность якоря двигателя, считается по формуле:

$$L_{я.к} = T_{я} \cdot R_{як}, \qquad (Г.20)$$

$$L_{я.к} = 7,3 \cdot 0,123 = 0,897 \text{ мГн}$$

В результате получаем:

$$L_{я.ц} = 1,587 + 0,897 + 11,082 = 13,57 \text{ мГн.}$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи считается по формуле:

$$T_{я.ц} = \frac{L_{я.ц} \cdot 10^{-3}}{R_{я.ц}}, \qquad (Г.21)$$

$$T_{я.ц} = 0,0103 \text{ с.}$$

Г.5 Расчетные параметры тиристорного преобразователя

Коэффициент усиления силового преобразователя:

$$К_{тп} = \frac{U_{d.\max}}{U_{y.\max}}, \qquad (Г.22)$$

$$К_{тп} = \frac{2{,}5 \cdot 47}{8} = 14{,}7.$$

Постоянная времени преобразователя принимается равной $Т_{тп}$ = 0,01 с.

Г.6 Расчет коэффициентов передачи датчиков обратной связи

Коэффициент передачи датчика тока:

$$К_{ост} = \frac{U_{ост.\max}}{I_{дв.\max}}, \qquad (Г.23)$$

$$К_{ост} = \frac{8}{6 \cdot 29} = 0{,}046 \text{ В / А}.$$

Коэффициент передачи датчика скорости:

$$К_{осс} = \frac{U_{осс\max}}{\omega_{\max}}, \qquad (Г.24)$$

$$К_{осс} = \frac{8}{2{,}5 \cdot 62{,}8} = 0{,}05 \text{ Вс / рад}.$$

Вывод: Силовой канал электропривода как объект управления характеризуется следующими параметрами:

- конструктивные коэффициенты двигателя $С_е = 0{,}69 \ \frac{Вс}{рад}$, $С_м = 0{,}603 \ \frac{Нм}{А}$;
- активное сопротивление якорной цепи $R_{я.ц.}$ = 1,31 Ом;
- электромагнитная постоянная времени якорной цепи $Т_{я.ц}$ = 0,0103 с;
- коэффициент усиления силового преобразователя $К_{тп}$ = 14,7;
- постоянная времени преобразователя $Т_{тп}$ = 0,01 с;
- электромеханическая постоянная времени привода $Т_м$ = 0,36 с (смотри 9.3);
- коэффициент передачи датчика тока $К_{ост}$ = 0,046 В / А;
- коэффициент передачи датчика скорости $К_{осс}$ = 0,05 Вс / рад

Приложение Д

(*справочное*)

Справочные данные трансформаторов

Таблица Д.1 – Технические характеристики трансформаторов

Справочные данные трансформаторов

Тип трансформатора	Полная мощность, кВА мощность	Фазное напряжение первичной обмотки	Фазное напряжение вторичной обмотки	Ток холостого хода, %	Напряжение короткого замыкания, %	Мощность холостого хода, Вт	Мощность короткого замыкания, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
ТСМ-0.16	0.16	220	12 19 22 24 36 42 85 170 220	24	13	-	-
ТСМ-0.25	0.25	220	12 19 22 24 36 42 85 170 220	24	10.5	-	-
ТСМ-0.4	0.4	220	12 19 22 24 36 42 85 170 220	20	7.0	-	-

Продолжение таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8
ТСМ-0.63	0.63	220	12 19 22 24 36 42 85 170 220	20	5.5	-	-
ТСМ-1.0	1.0	220	12 19 22 24 36 42 85 170 220	20	5.0	-	-
ТСЗМ1-1.6	1.6	220	12 19 22 24 36 42 85 170 220	24	3.0	-	-
ТСМ1-1.6	1.6	220	19 22 36	24	3,0	-	-
ТСЗМ1-2.5	2.5	220	19 22 24 36 42 85 170 220	20	2.5	-	-
ТСМ1-2.5	2.5	220	19 22 36	20	2,5	-	-

Продолжение таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8
ТСЗМ1-4.0	4.0	220	36 42 85 170 220	16	2.3	-	-
ТСМ1-4.0	4.0	220	36	15	2,3	-	-
ТСЗ-6.3	6.3	220	110 230	12.0	2.0	70	130
ТСЗ-6.3	6.3	380	110 230	12.0	2.0	70	130
ТСЗ-10	10	220	110 220	9.0	1.6	85	160
ТСЗ-10	10	380	110 220	9.0	1.6	85	160
ТС-16	16	220	110 230	-	3,6	115	440
ТС-16	16	380	110 230	-	3,6	115	440
ТС-25	25	220	110 230	-	3,6	155	600
ТС-25	25	380	110 230	-	3,6	155	600
ТС-40	40	220	110 230	-	3,6	220	880
ТС-40	40	380	110 230	-	3,6	220	880
ТС-63	63	220	110 230	-	3,6	290	1280
ТС-63	63	380	110 230	-	3,6	290	1280
ТС-100	100	220	110 230	-	3,6	390	1450
ТС-100	100	380	110 230	-	3,6	390	1450

Таблица Д.2 – Определение потерь х.х. (нижняя кривая) и к.з. (верхняя кривая) трансформатора в зависимости от его мощности (в процентах)

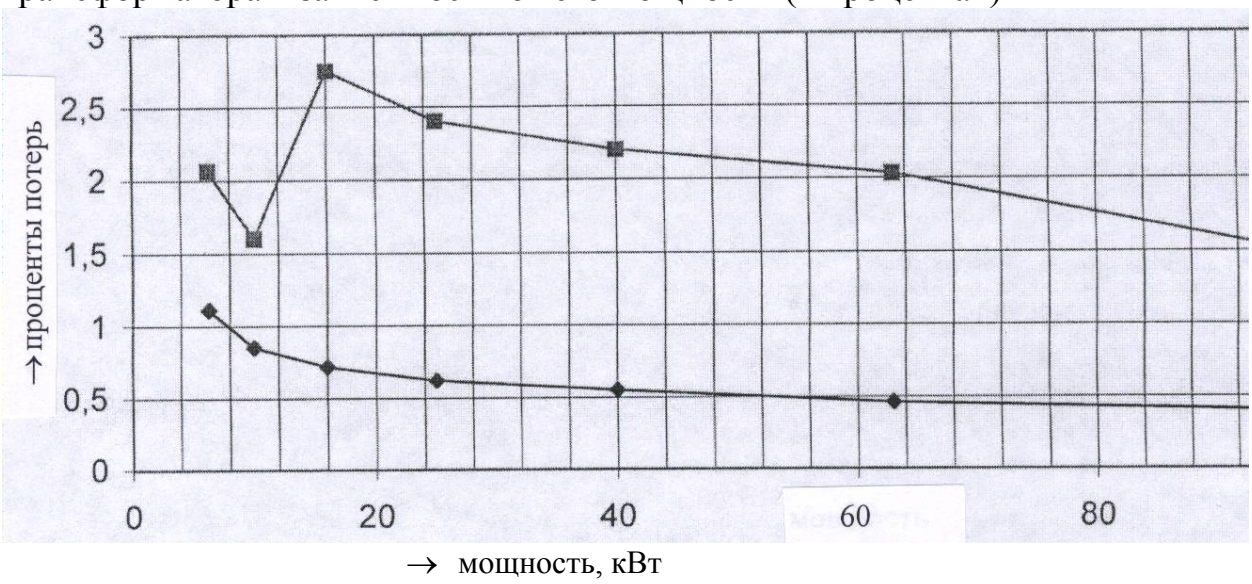


Таблица Д.3 - Технические данные трансформаторов сухих трехобмоточных типа ТСТ

Номинальная мощность, кВА	Фазное напряжение первичной обмотки, В	Фазное напряжение вторичной обмотки, В
2,5; 6,3; 10,0; 16,0; 25,0; 40,0; 63,0; 100,0; 120,0; 160,0; 250,0	380	230; 220; 208; 177; 133; 127; 110; 104; 85; 24; 12

Примечание. При двойном значении вторичного напряжения (трехобмоточные трансформаторы) мощность обмоток распределяется поровну.