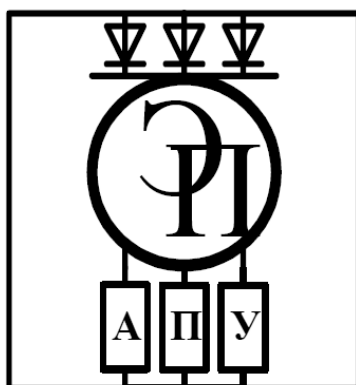


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 658.012.011.56:62-83  
ББК 32.965:31.291  
С40

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «20» ноября 2020 г., протокол № 4

Составитель канд. техн. наук В. А. Селиванов

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения курсового проекта по курсу «Системы управления электроприводами». Предназначены для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» очной и заочной форм обучения. Данные методические рекомендации могут быть использованы для дипломного проектирования.

Учебно-методическое издание

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Ответственный за выпуск	Г. С. Ленеvский
Корректор	А. А. Подошеvко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Общий подход к проектированию систем управления электроприводами.....	6
2 Разработка схемы электрической принципиальной.....	7
2.1 Проектирование схемы электрической принципиальной силовой части электропривода .....	7
2.2 Проектирование схемы электрической принципиальной системы управления электроприводом .....	7
2.3 Определение параметров регуляторов .....	8
2.4 Расчет и выбор электроаппаратуры .....	9
3 Расчет частотных и статических характеристик электропривода .....	14
3.1 Расчет и построение частотных характеристик .....	14
3.2 Расчет статических характеристик системы .....	15
4 Исследование динамических характеристик системы .....	17
4.1 Определение параметров модели .....	17
4.2 Рекомендации при моделировании на ЭВМ .....	20
Список литературы .....	21
Приложение А .....	22
Приложение Б .....	23
Приложение В .....	24
Приложение Г .....	25
Приложение Д .....	26
Приложение Е .....	27
Приложение Ж .....	28
Приложение И .....	30
Приложение К .....	32

## Введение

Дисциплина «Системы управления электроприводами» (СУЭП) преследует цель способствовать развитию у студентов интереса к специальности, показывая, что изучение способов реализации законов управления движением электропривода (ЭП) на основе анализа типовых инженерных решений, применяемых в конкретных разомкнутых и замкнутых системах, позволит подготовить студента к самостоятельному решению комплекса вопросов: решению вопросов курсового, дипломного проектирования, а также решения вопросов в инженерной деятельности.

Курсовой проект способствует закреплению знаний, полученных на лекциях, практических занятиях, лабораторном практикуме, а также приобретению навыков инженерного проектирования и расчета систем автоматического управления ЭП. Курсовое проектирование является завершающим этапом изучения курса СУЭП.

Курсовой проект состоит из трех чертежей формата А1 и расчетно-пояснительной записки.

Варианты задания на курсовое проектирование даны в таблицах Б.1–Г.2. По таблице Б.1 выбирается тип системы управления и тип преобразователя, который будет в ней использоваться. По таблицам В.1 и Г.2 выбирается тип приводного двигателя. По таблице В.2 выбирается режим работы ЭП, а по таблице Г.1 – формула для расчета момента статических сопротивлений.

При выполнении курсового проекта студент решает следующие основные задачи:

- 1) ознакомляется с заданием, разрабатывает функциональную схему системы управления;
- 2) согласно функциональной схеме ЭП производит расчет и выбор элементов силовой части и системы управления;
- 3) производит разработку структурной схемы ЭП с учетом нелинейных характеристик функциональных узлов ЭП и дает ее краткое описание;
- 4) производит расчет постоянных времени и коэффициентов передачи звеньев неизменяемой части структурной схемы, а затем выбор типа регуляторов, рассчитывает их параметры и параметры звеньев изменяемой части структурной схемы;
- 5) изучает функциональную и структурную схемы ЭП, разрабатывает схему электрическую принципиальную и производит расчет ее элементов;
- 6) разрабатывает расчетную схему ЭП при работе его элементов в линейной зоне, производит необходимые преобразования структурной схемы для расчета статических характеристик и параметров регуляторов;
- 7) рассчитывает и строит статические и частотные характеристики ЭП;

8) разрабатывает детализированную расчетную схему ЭП на основании структурной схемы и производит расчет переходных процессов на ЭВМ.

Оформление расчетно-пояснительной записки и графической части проекта следует выполнить согласно приложениям А, Е, Ж, И, К. Объем пояснительной записки 35–40 страниц. Графическая часть – 3 листа формата А1.

# 1 Общий подход к проектированию систем управления электроприводами

Построение систем управления электроприводами (СУЭП) является частью общей задачи проектирования электромеханической системы.

В начале проектирования формируется силовая часть ЭП. Разрабатывается математическая модель ЭП как объекта управления с учетом особенностей силовой части и механизма. На следующем этапе определяется структура СУЭП, производится ее синтез и анализ.

Проектируемая СУЭП должна быть оптимизирована с использованием следующих видов оптимизации:

- параметрической оптимизации, когда при заданной структуре и функциональных воздействиях на систему требуется определить значения ее параметров, при которых наилучшим образом достигаются заданные показатели качества;
- структурной оптимизации, когда необходимо найти техническое решение, при котором используется минимальное количество простейших и легко физически реализуемых элементов системы;
- функциональной оптимизации, при которой необходимо определить законы управления, затем по ним структуру и численные значения параметров системы.

Принцип проектирования СУЭП по прототипу является наиболее распространенным. В этом случае на основании технического задания выбирается типовая система управления и определяются значения ее параметров. При использовании модульного принципа осуществляется компоновка общей СУЭП из типовых модулей.

При поиске новых решений наиболее общим принципом является непосредственный синтез систем управления. В этом случае по известной модели объекта управления и заданной целевой функции специальными методами синтеза определяют структуру, характеристики и параметры системы.

Действия проектировщика ограничиваются параметрическими и функциональными ограничениями. Следует учитывать энергетические и информационные ограничения, заключающиеся в том, что не все переменные процессы могут быть измерены и наблюдаемы. В зависимости от характера поставленной задачи эти ограничения и определяют выбор метода проектирования.

## **2 Разработка схемы электрической принципиальной**

Схема электрическая принципиальная системы ЭП определяет полный состав элементов и дает детальное представление о принципе функционирования ЭП. На принципиальной схеме ЭП изображаются все электрические элементы и устройства, входящие в состав СУЭП, и электрические связи между ними согласно требованиям ЕСКД [12].

При разработке схемы электрической принципиальной системы ЭП рекомендуется пользоваться [1].

### ***2.1 Проектирование схемы электрической принципиальной силовой части электропривода***

Схема электрическая принципиальная силовой части ЭП должна отражать преобразование электрической энергии в механическую. При этом необходимо предусмотреть следующие типовые защиты:

- защиту силовых цепей от токов короткого замыкания;
- защиту от длительных токов перегрузки;
- защиту от понижения напряжения питающей сети.

Для систем ЭП показывается, каким образом реализуется подключение электродвигателя к преобразователю и питание цепи возбуждения (для системы ЭП постоянного тока), раскрывается состав силовой части преобразователя и подключение ее к питающей сети через согласующие устройства (трансформаторы, реакторы).

### ***2.2 Проектирование схемы электрической принципиальной системы управления электроприводом***

Схема управления силовой части реализует требуемый закон управления силовой схемой ЭП.

На схеме электрической принципиальной системы управления показываются регуляторы, устройства задания, согласования и синхронизации, датчики обратных связей, фильтры, один канал системы импульсно-фазового управления (СИФУ), защиты. При этом желательно, при возможности, применение стандартных устройств. Также необходимо предусмотреть сигнализацию различных режимов работы ЭП и аварийную сигнализацию. В качестве источников питания схемы управления следует использовать стандартные блоки, которые допускается не раскрывать, а изображать упрощенно.

При разработке микропроцессорной системы управления (МПСУ) необходимо разработать алгоритм работы системы управления и разработать одну из подпрограмм на языке ассемблера для выбранного однокристалльного микроконтроллера либо микропроцессорного комплекта.

В пояснительной записке следует раскрыть назначение каждого устройства системы управления и показать, как и за счет чего осуществляется реализация

требуемого закона управления для различных режимов работы спроектированного ЭП. Для пояснения работы СИФУ необходимо привести временные диаграммы ее работы.

### 2.3 Определение параметров регуляторов

В современных ЭП регуляторы строятся на базе операционных усилителей, обладающих большим коэффициентом усиления. Различные типы регуляторов и их схемная реализация приведены на рисунке 2.1, а расчетные соотношения приведены в таблице 2.1.

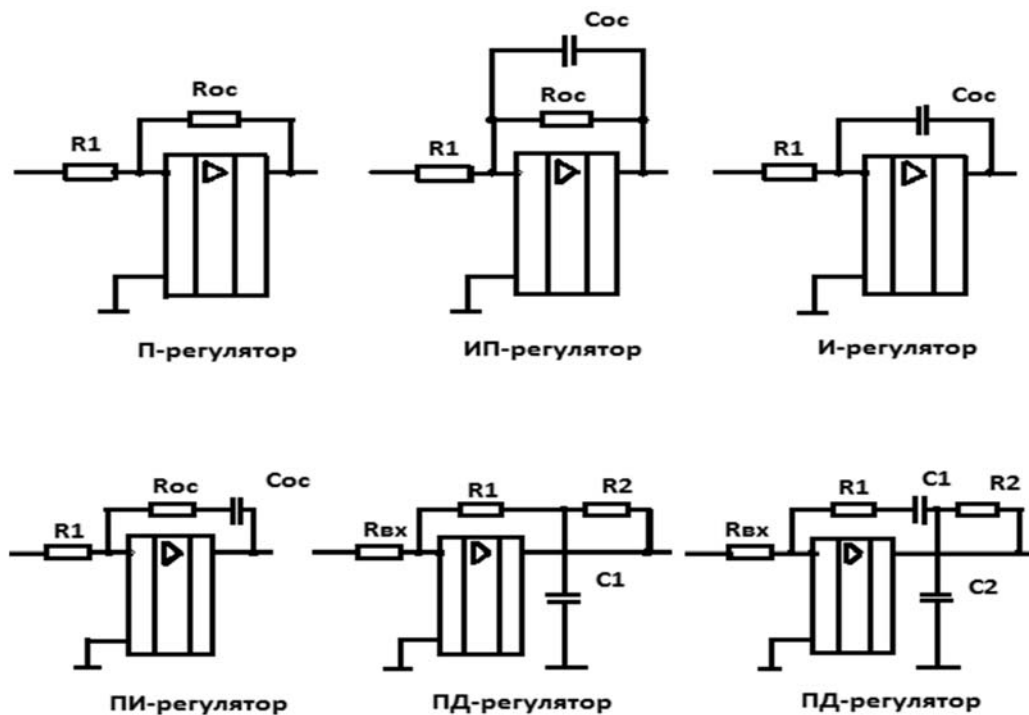


Рисунок 2.1 – Реализация некоторых типов регуляторов с использованием операционных усилителей

Справочные данные на некоторые операционные усилители приведены в таблице Е.4.

Таблица 2.1 – Расчетные соотношения регуляторов

Наименование регулятора	Передаточная функция	Расчетное соотношение
Пропорциональный (П)	$-K_{\Pi}$	$K_{\Pi} = \frac{R_{OC}}{R_1}$
Пропорционально-дифференциальный (ПД)	$-K_{\Pi}(T_d p + 1)$	$T_d = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} C_1,$ $K_{\Pi} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_{BX}}$



Окончание таблицы 2.1

Наименование регулятора	Передаточная функция	Расчетное соотношение
Интегрально-пропорциональный (ИП)	$-K_{II}(T_{II}p+1)$	$T_{II} = R_{OC}C_{OC},$ $K_{II} = \frac{R_{OC}}{R_1}$
Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)	$-K_{II} \left( \frac{T_{YII}}{T_{IIP}} + 1 \right) - \frac{1}{T_{II}p} - T_{DI}p$	$K_{II} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_{BX}},$ $T_{II} = R_{BX}C_1,$ $T_{DI} = \frac{R_1R_2}{R_{BX}},$ $T_{YII} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}C_2,$ $T_{IIP} = (R_1 + R_2)C_1$
Интегральный (И)	$-\frac{1}{T_{II}p}$	$T_{II} = R_1C_{OC}$
Пропорционально-интегральный (ПИ)	$-\frac{1}{T_{II}p} - K_{II}$	$K_{II} = \frac{R_{OC}}{R_1},$ $T_{II} = R_1C_{OC}$

## 2.4 Расчет и выбор электроаппаратуры

При выборе стандартных аппаратов и устройств в пояснительной записке приводятся условия выбора и их технические характеристики.

**2.4.1 Расчет датчика тока.** В качестве чувствительного элемента в датчиках тока применяются трансформаторы тока (ТТ), шунты, магнитодиоды и измерительные устройства, принцип работы которых основан на эффекте Холла.

2.4.1.1 Трансформаторы тока включаются в фазы питания преобразователя постоянного тока, либо на выходе преобразователя переменного тока. Они нагружаются балластным сопротивлением  $R_B$  и сопротивлением потенциометра  $R_{ПОТ}$ . Вторичное напряжение трансформатора выпрямляется диодным мостом и через потенциометр подается на вход операционного усилителя  $DA1$ . Конденсатор  $C_\Phi$  предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Трансформаторы тока выбираются по номинальному напряжению вторичной обмотки  $U_{2ТТ}$  и по току первичной обмотки  $I_{1ТТ}$ :

$$I_{1ТТ} \geq I_{2ФН}. \quad (2.1)$$

Номинальный ток во вторичной обмотке ТТ обычно равен 5 А.

Мощность нагрузки ТТ не должна превышать допустимую мощность:

$$S_{доп} \geq I_B^2 \cdot R_B, \quad (2.2)$$

где  $I_B$  – ток в балластном сопротивлении;  
 $R_B$  – балластное сопротивление.

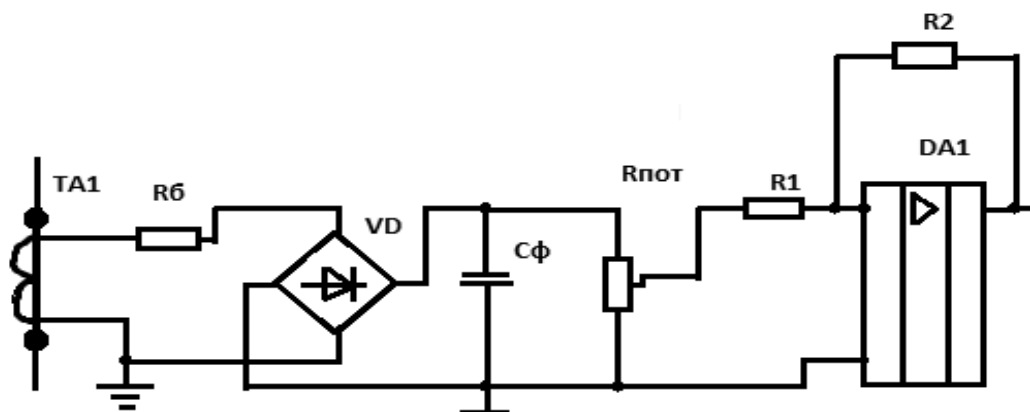


Рисунок 2.2 – Вариант включения трансформатора тока

В качестве датчиков тока выбираются ТТ класса точности 3, параметры некоторых трансформаторов приведены в таблицах Д.1 и Д.2.

2.4.1.2 При использовании в качестве датчика тока измерительного шунта, необходимо предусмотреть гальваническую развязку между схемой управления и силовой частью ЭП.

Величина напряжения, снимаемая с выводов измерительного шунта типа 75ШС, составляет 75 мВ при номинальном токе шунта.

Выбор шунта осуществляется по номинальному значению тока и напряжения:

$$U_{шн} \geq U_c; I_{шн} \geq I_c, \quad (2.3)$$

где  $U_c, I_c$  – напряжение и ток в измеряемой цепи.

Для усиления сигнала обратной связи необходимо использовать усилитель. Вариант схемы датчика тока с использованием шунта в качестве измерительного элемента приведен на рисунке 2.3.

При разработке реверсивного ЭП постоянного тока надо учитывать изменение направления протекания тока в якорной цепи электродвигателя.

2.4.2 *Расчет датчика напряжения.* В СУЭП используются датчики напряжения, осуществляющие замер величины напряжения, используемого в цепях системы управления, а также обеспечивающие гальваническую развязку силовой цепи и цепи управления.

2.4.2.1 Датчик напряжения, построенный по принципу модулятор-демодулятор (например, ДН-2) состоит из двух частей – модулятора, преобразующего

входное напряжение постоянного тока в переменное напряжение, и демодулятора, преобразующего сигнал переменного тока в постоянный. Гальваническая развязка реализуется применением трансформатора между ними.

2.4.2.2 Простейшим датчиком напряжения является делитель напряжения. При использовании в качестве измерительного элемента делителя необходимо предусмотреть гальваническую развязку силовых цепей и цепей управления, аналогично тому, как показано на рисунках 2.3 и 2.4.

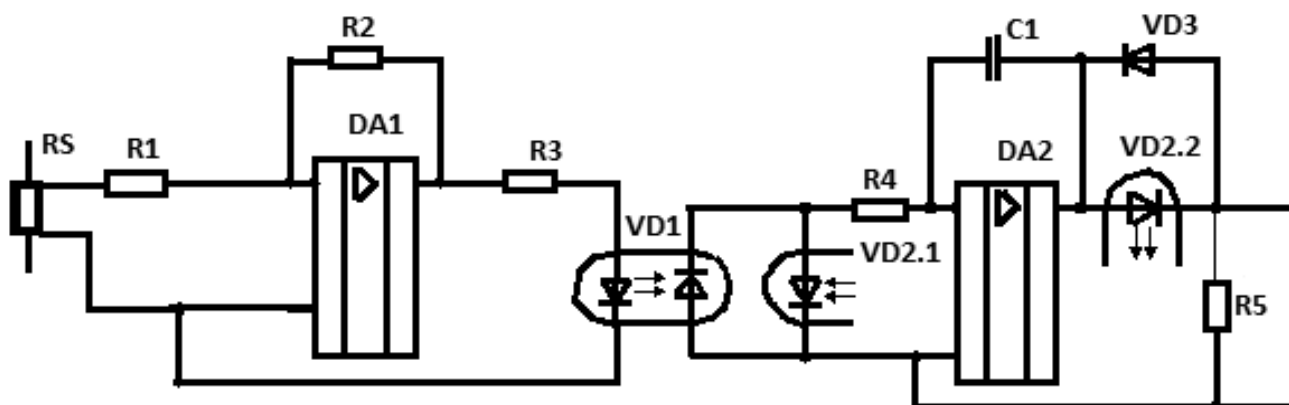


Рисунок 2.3 – Датчик тока с использованием измерительного шунта

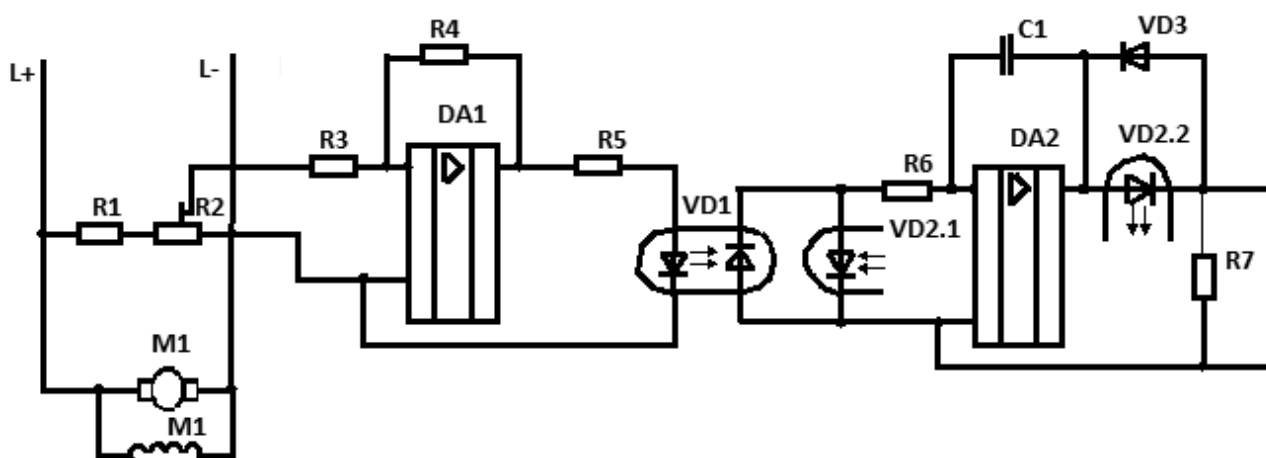


Рисунок 2.4 – Вариант реализации датчика напряжения

2.4.3 Расчет датчика скорости (ДС). В качестве ДС в ЭП применяются тахогенераторы, тахометрические мосты и числоимпульсные датчики.

2.4.3.1 Основной характеристикой тахогенератора является зависимость ЭДС тахогенератора от его частоты вращения. Коэффициент передачи тахогенератора (крутизна характеристики) определяется по формуле

$$K_{ТГ} = \frac{E_{ТГ}}{\omega_{ТГ}}. \quad (2.4)$$

Выбор тахогенератора производится по номинальному значению частоты вращения, крутизне характеристики и выходному напряжению. При этом следует выбирать номинальную частоту вращения тахогенератора не ниже, чем максимальная частота вращения электродвигателя. В случае широкого диапазона регулирования скорости ЭП используются прецизионные тахогенераторы с малым коэффициентом пульсаций. Для упрощения схемы выбираются тахогенераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Технические характеристики некоторых тахогенераторов приведены в таблице Е.1.

2.4.3.2 В МПСУ для измерения скорости могут применяться числоимпульсные датчики. При этом необходимо предусмотреть схему сопряжения датчика с МПСУ и схему пересчета количества импульсов, приходящих от датчика за единицу времени, в скорость вращения электродвигателя, или организовать пересчет импульсов программным путем.

2.4.4 *Расчет датчика положения.* В качестве датчика положения в системах регулирования положения применяются сельсины, вращающиеся трансформаторы, многооборотные переменные резисторы и числоимпульсные датчики.

2.4.4.1 Сельсинный датчик положения состоит из сельсин-датчика и сельсин-приемника, включенных в трансформаторном режиме. В однофазной обмотке сельсин-приемника наводится гармоническая ЭДС, пропорциональная углу рассогласования роторов сельсинов. При смещении в пространстве обмоток сельсинов на  $90^\circ$  на выходе сельсин-приемника ЭДС становится равна нулю. Однако следует отметить, что даже при отсутствии угла рассогласования в однофазной обмотке сельсин-приемника наводится ЭДС высших гармоник и ДС основной частоты, сдвинутая по фазе на  $90^\circ$ . Величина этой ЭДС обычно не превышает 0,2 В.

Напряжение обратной связи при использовании сельсинов вычисляется по формуле

$$U_o = U_{\max} \sin(\varphi_d - \varphi_n), \quad (2.5)$$

где  $U_{\max}$  – амплитудное значение напряжения однофазной обмотки сельсин-приемника;

$\varphi_d, \varphi_n$  – угол поворота сельсин-датчика и сельсин-приемника.

Коэффициент обратной связи по положению

$$K_{оп} = \frac{U_{зп}}{U_o}. \quad (2.6)$$

При использовании в качестве датчиков положения сельсинов в схеме управления должно быть предусмотрено устройство, определяющее направление перемещения (фазовый дискриминатор) (рисунок 2.5).

2.4.5 *Выбор задающего устройства.* В качестве задающего устройства в ЭП применяются потенциометры, электронные задающие устройства и сельсинные задающие устройства.

2.4.5.1 Выбор и расчет потенциометра производится по условию обеспечения изменения величины напряжения на входе СИФУ от минимального до максимального значения.

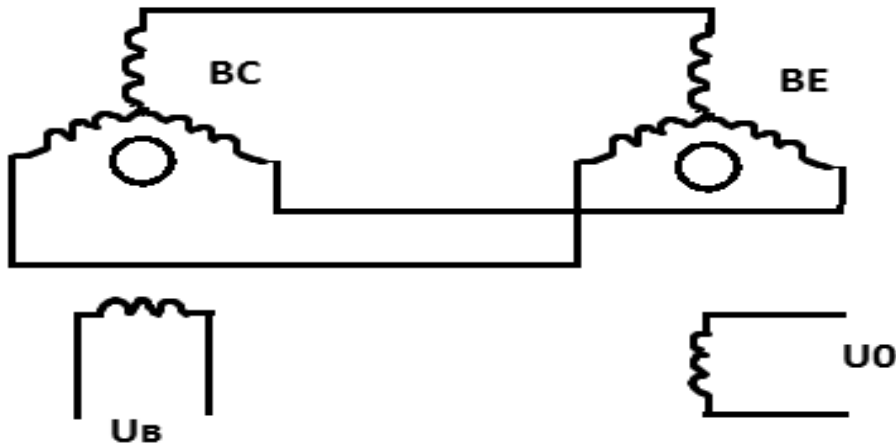


Рисунок 2.5 – Включение сельсинов

2.4.5.2 Для задания угла поворота механизма применяются сельсинные командоаппараты. Они состоят из стандартных сельсинов и фазочувствительного выпрямителя (ФВ), который предназначен для преобразования сигнала переменного тока заданной фазы в сигнал постоянного тока, пропорциональный этой фазе. Простейшие конструкции ФВ приведены в [7].

2.4.5.3 При использовании электронных задающих устройств необходимо указать закон управления, который должно обеспечить задающее устройство. Если устройство выполняет функцию задатчика интенсивности, то рассчитывается постоянная времени  $T_{зи}$ . После этого составляется схема электрическая принципиальная задающего устройства.

## 3 Расчет частотных и статических характеристик электропривода

### 3.1 Расчет и построение частотных характеристик

В инженерных расчетах помимо аналитического метода расчета корректирующих устройств также применяется и метод синтеза регуляторов на основе частотных характеристик. По виду частотных характеристик производится определение частоты среза системы и оценка запасов устойчивости спроектированной системы по фазе и амплитуде. Частотные характеристики обеспечивают наглядность между графиками переходных процессов и параметрами системы при высоком порядке дифференциальных уравнений системы.

Перейдя к комплексной форме записи, заменив оператор Лапласа на  $j\omega$ , можно представить передаточную функцию системы в следующем виде:

$$W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\Phi(\omega)}, \quad (3.1)$$

где  $A(\omega)$  – амплитудная частотная характеристика системы;

$\Phi(\omega)$  – фазовая частотная характеристика системы.

При этом можно выделить из передаточной функции системы действительную (вещественную) и мнимую части:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (3.2)$$

Значение логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) вычисляется на основе выражения

$$L(\omega) = 20 \lg \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}. \quad (3.3)$$

Логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФЧХ) системы рассчитывается по формуле

$$\Phi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (3.4)$$

Для расчета корректирующих устройств методом ЛАЧХ в первую очередь выбирается вариант включения корректирующего устройства: последовательный или параллельный в виде гибкой обратной связи. На практике в большинстве случаев применяется последовательное включение (последовательная коррекция).

Выбор схемы и расчет параметров последовательного корректирующего устройства осуществляется в следующем порядке:

1) на графике ранее построенных желаемой ЛАЧХ системы  $L_{\text{Ж}}(w)$  и ЛАЧХ нескорректированного разомкнутого контура  $L_{\text{НСК}}(w)$  вычерчивается ЛАЧХ корректирующего устройства  $L_{\text{К}}(w)$ :

$$L_{\text{К}}(w) = L_{\text{Ж}}(w) - L_{\text{НСК}}(w). \quad (3.5)$$

При этом следует помнить, что чем меньше изломов имеет ЛАЧХ корректирующего устройства, тем проще его техническая реализация;

2) по построенной ЛАЧХ выбирается схема корректирующего звена и рассчитываются номиналы навесных элементов.

В курсовом проекте выполняется расчет и построение ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого внешнего контура регулирования для двух случаев: нескорректированного и скорректированного контуров. После построения частотных характеристик делается вывод о запасах устойчивости системы по амплитуде и по фазе [10].

### 3.2 Расчет статических характеристик системы

Расчет статических характеристик спроектированной системы выполняется для максимального и минимального значений выходной координаты. Графики строятся в одних координатных осях для всех случаев. После построения характеристик определяются значения статизма и жесткости для каждой характеристики.

*3.2.1 Определение статических характеристик разомкнутой системы.* Для расчета статических характеристик разомкнутой системы можно воспользоваться следующим уравнением:

$$w = \frac{K_{\text{У}} \cdot U_{\text{З}}}{C} - \frac{I_{\text{ЯН}} R_{\text{ЯЭ}}}{C}, \quad (3.6)$$

где  $U_{\text{З}}$  – напряжение задания;

$K_{\text{У}}$  – коэффициент усиления системы управления.

При этом значение коэффициента усиления разомкнутой системы для системы «преобразователь – двигатель постоянного тока» определяется как  $K_{\text{У}} = K_{\text{П}}$ .

*3.2.2 Расчет статических характеристик замкнутой системы.* Для проведения расчета статических характеристик замкнутой системы, структурная схема ЭП сворачивается относительно возмущающего воздействия. В полученной передаточной функции нужно приравнять оператор Лапласа « $p$ » нулю и по полученному уравнению рассчитать статические характеристики замкнутой системы.

При реверсе системы ТП–Д с совместным управлением группами вентиляей необходимо учитывать соотношение углов регулирования выпрямительной и инверторной групп вентиляей. Вопросы согласования внешних характеристик выпрямительных и инверторных групп вентиляей тиристорного преобразователя с совместным управлением рассматриваются в [4, 7].

Для нереверсивных систем ТП–Д и реверсивных с отдельным управлением группами вентиляей производится расчет граничного тока якорной цепи и показывается на графике зона прерывистых токов. Внешние характеристики с ТП в зоне прерывистого тока становятся нелинейными. При этом двигатель реагирует не на среднее, а на мгновенное значение выпрямленного напряжения.

$$I_{dTP} = E_{d0} \sin(\alpha) \frac{\left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{m}\right)\right)}{\omega L_{\Sigma}}. \quad (3.7)$$

В зоне прерывистых токов напряжение преобразователя стремится к определенному пределу при  $I_d$ , стремящемуся к нулю. При углах управления  $\alpha < \frac{\pi}{m}$  этот предел равен:

$$E_{d0} = U_{2\phi}, \quad (3.8)$$

где  $U_{2\phi}$  – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора, равная: для нулевых схем амплитуде фазного напряжения трансформатора  $U_{2m} = 1,41 \cdot U_{2\phi H}$ ; для мостовых схем амплитуде линейного напряжения трансформатора  $U_{2m} = 2,34 U_{2\phi H}$ .

При углах управления  $\alpha > \frac{\pi}{m}$  предел стремится к мгновенному значению напряжения в момент открытия тиристора:

$$E_{d0} = U_{2\phi m} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right). \quad (3.9)$$

Скорость идеального холостого хода определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{E_{dm}}{C}. \quad (3.10)$$



## 4 Исследование динамических характеристик системы

Исследование динамических характеристик спроектированной системы ЭП выполняется путем ее моделирования на ЭВМ. В результате моделирования получаются графики переходных процессов выходной и промежуточной координат системы ЭП, которые исследуются согласно заданию на проектирование.

При моделировании системы управления необходимо учитывать все нелинейности, присущие регуляторам и преобразователям, а также режимы работы преобразователей в зоне непрерывного и прерывистого токов.

По полученным графикам определяются показатели качества спроектированной СУЭП, которые должны удовлетворять заданию на курсовое проектирование.

Моделирование можно производить в любом из перечисленных пакетов: RUNGE, MatLab, Siam, MathCad. Структурные схемы моделей, таблицы результатов расчета, графики должны быть приведены в пояснительной записке [11].

### 4.1 Определение параметров модели

4.1.1 Тиристорный преобразователь, работающий в режиме непрерывного тока, с достаточной точностью можно представить одним динамическим безынерционным звеном с чистым запаздыванием, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{ТП}(p) = k_{ТП} e^{-\tau_3 p}, \quad (4.1)$$

где  $\tau_3$  – общее время запаздывания,  $\tau_3 = \tau_{СП} + \tau_{УУ}$ ;

$\tau_{УУ}$  – время запаздывания устройства управления, которое принимают равным  $\tau_{УУ} = 0$  для СИФУ вертикального типа;

$\tau_{СП}$  – время запаздывания силового преобразователя, которое принимается равным половине максимального времени запаздывания:

$$\tau_{СП} = \frac{1}{2 f_{сети} m_B}, \quad (4.2)$$

где  $f_{сети}$  – частота сети;

$m_B$  – число фаз выпрямления.

С достаточной точностью тиристорный преобразователь, работающий в режиме непрерывного тока, можно представить инерционным звеном

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{\tau_3 p + 1}. \quad (4.3)$$

Если блок управления тиристорами имеет на входе фильтр для защиты от высокочастотных помех, то передаточная функция тиристорного преобразователя примет вид:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{(T_{ТП}p + 1) \cdot (T_{\phi}p + 1)}. \quad (4.4)$$

Если нет данных о постоянной времени фильтра, то ее можно принять равной  $T_{\phi} = 0,05 \dots 0,01$  с.

Для упрощения расчетов тиристорный преобразователь можно представить инерционным звеном с передаточной функцией:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}p + 1}, \quad (4.5)$$

где  $T_{ТП} = T_{\phi} + \tau_3$ .

4.1.2 При математическом описании двигателя постоянного тока с независимым возбуждением принимаются допущения:

- размагничивающее действие реакции якоря считается скомпенсированным;
- индуктивность и сопротивление якорной цепи являются постоянными величинами;
- магнитный поток линейно зависит от намагничивающей силы.

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением описывается системой дифференциальных уравнений в операторном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{ТП}(p) - E_{д}(p) = I_{я}(p) \cdot R_{я}(T_{я}p + 1) \Rightarrow W_1(p) = \frac{I_{я}(p)}{E_{ТП}(p) - E_{д}(p)} = \frac{1/R_{я}}{T_{я}p + 1}; \\ E_{д}(p) = C \cdot \omega(p) \Rightarrow W_2(p) = \frac{E_{д}(p)}{\omega(p)} = C; \\ M_{д}(p) = C \cdot I_{я}(p) \Rightarrow W_3(p) = \frac{M_{д}(p)}{I_{я}(p)} = C; \\ M_{д}(p) - M_{с}(p) = J_{\Sigma} \cdot p \cdot \omega(p) \Rightarrow W_4(p) = \frac{\omega(p)}{M_{д}(p) - M_{с}(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p}, \end{array} \right. \quad (4.6)$$

где  $E_{ТП}(p)$  – изображение ЭДС тиристорного преобразователя;

$E_{д}(p)$  – изображение противоЭДС двигателя;

$I_{я}(p)$  – изображение тока якоря;

$R_{я}$  – суммарное сопротивление якорной цепи;

$T_{я}$  – суммарная постоянная времени якорной цепи;

$C$  – конструктивный коэффициент двигателя;

$\omega(p)$  – изображение скорости вращения электродвигателя;

$M_{д}(p)$  – изображение момента, развиваемого двигателем;

$M_c(p)$  – изображение момента сил статических сопротивлений;

$J_\Sigma$  – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

На основании системы уравнений структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением будет иметь вид, представленный на рисунке 4.1.

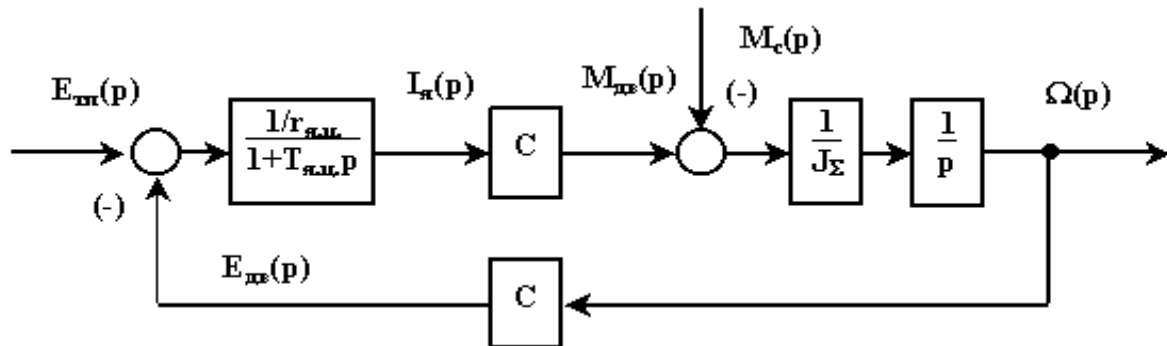


Рисунок 4.1 – Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Сопротивление якоря двигателя при отсутствии паспортных данных можно определить по формуле

$$R_{\text{я}} = 0,5 \cdot \frac{U_{\text{я}}}{I_{\text{ян}}} \cdot \left( 1 - \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{я}} \cdot I_{\text{ян}}} \right). \quad (4.7)$$

Конструктивный коэффициент двигателя можно определить из его номинальных параметров:

$$C = \frac{U_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{ян}}}{w_{\text{н}}}. \quad (4.8)$$

Номинальную скорость двигателя  $w_{\text{н}}$ , рад/с определяют по формуле

$$w_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (4.9)$$

Индуктивность якоря двигателя

$$L_{\text{я}} = \frac{y \cdot U_{\text{я}}}{p \cdot I_{\text{ян}} \cdot w_{\text{н}}}. \quad (4.10)$$

Постоянную времени якорной цепи находят следующим образом:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}}. \quad (4.11)$$

При использовании метода последовательной коррекции желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования, настроенного на оптимум по модулю, будет иметь вид:

$$W(P)_{\text{ЖМО}} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)}, \quad (4.12)$$

где  $T_{\mu}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени;  
 $a$  – коэффициент демпфирования.

При настройке на симметричный оптимум

$$W(P)_{\text{ЖСО}} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)} \frac{4T_{\mu} p + 1}{4T_{\mu} p}. \quad (4.13)$$

Исходя из настройки контуров выбираются типы регуляторов и рассчитываются их коэффициенты в соответствии с таблицей 2.1.

#### ***4.2 Рекомендации при моделировании на ЭВМ***

При выборе величины шага интегрирования следует пользоваться правилом: шаг интегрирования должен быть как минимум в 5 раз меньше самой малой постоянной времени в системах автоматического регулирования (САУ).

При моделировании в пакете MatLab при «черновом» расчете целесообразно использовать метод Эйлера, а при окончательных расчетах – методы с автоматическим выбором шага интегрирования [8].

## Список литературы

- 1 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод: учебник / Г. Б. Онищенко. – Москва: Академия, 2013. – 288 с.
- 2 **Епифанов, А. П.** Основы электропривода: учебное пособие / А. П. Епифанов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 192 с.
- 3 **Москаленко, В. В.** Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко. – Москва: Академия, 2009. – 368 с.
- 4 **Ильинский, Н. Ф.** Основы электропривода: учебное пособие / Н. Ф. Ильинский. – Москва: МЭИ, 2007. – 222 с.
- 5 **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока: учебник / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- 6 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учебное пособие / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.
- 7 **Браславский, И. Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – Москва: Академия, 2004. – 256 с.
- 8 **Худяков, В. Ф.** Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB 7.x: учебное пособие / В. Ф. Худяков, В. А. Хабuzов. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2008. – 332 с.

## **Приложение А (обязательное)**

### **Структура курсового проекта по дисциплине «Системы управления электроприводами»**

#### **Содержание расчетно-пояснительной записки.**

Техническое задание.

Введение.

1 Расчетная часть.

1.1 Составление функциональной схемы СУЭП.

1.2 Составление структурной схемы СУЭП.

1.2.1 Определение передаточных функций элементов силовой части ЭП.

1.2.2 Расчет параметров объекта управления.

1.2.3 Синтез корректирующих устройств.

1.3 Исследование частотных свойств СУЭП.

1.3.1 Расчет частотных характеристик СУЭП, ЛФХ.

1.3.2 Анализ частотных характеристик.

1.4 Расчет статических характеристик системы.

1.4.1 Расчет статических характеристик разомкнутой системы.

1.4.2 Расчет статических характеристик замкнутой системы.

1.5 Расчет динамических характеристик.

1.5.1 Математическое описание динамических процессов СУЭП.

1.5.2 Построение математической модели.

1.5.3 Анализ переходных процессов.

1.6 Составление схемы электрической принципиальной СУЭП.

1.6.1 Описание схемы электрической принципиальной.

1.6.2 Расчет и выбор элементов управления схемы электрической принципиальной.

Заключение.

Список литературы.

Приложение 1: программа модели СУЭП.

Приложение 2: результаты моделирования.

Перечень элементов.

#### **Графическая часть проекта.**

Лист 1: функциональная схема СУЭП, структурная схема СУЭП, схема модели СУЭП с учетом нелинейностей для расчета на ЭВМ.

Лист 2: статические характеристики системы, частотные характеристики системы, динамические характеристики.

Лист 3: схема электрическая принципиальная системы электропривода.

## Приложение Б (обязательное)

Таблица Б.1 – Тип преобразователя

Последняя цифра зачетной книжки	0	1	2	3	4
Тип преобразователя	ТРН нереверсивный с датчиком момента	Однофазный ТП полууправляемый с АРТ	Трехфазный ТП мостовой с модальным управлением	Шестифазный ТП с нулевым выводом	Вентильно-индукторный привод (ВИП)
Предпоследняя цифра зачетной книжки	0	1	2	3	4
Тип системы	Двухконтурная система стабилизации скорости, астатическая по возмущению	Трехконтурная позиционная система, статическая по возмущению	Двухконтурная система стабилизации скорости, астатическая по возмущению	Двухконтурная система стабилизации скорости, статическая по возмущению, с модальным управлением	Трехконтурная позиционная система, статическая по возмущению

Продолжение таблицы Б.1

Последняя цифра зачетной книжки	5	6	7	8	9
Тип преобразователя	Однофазный ТП с раздельным управлением с АРТ	Трехфазный мостовой ТП с совместным управлением вентилей	Транзисторный ШИП реверсивный	Трехфазный мостовой ТП с раздельным управлением вентилей	Тиристорный ШИП реверсивный
Предпоследняя цифра зачетной книжки	5	6	7	8	9
Тип системы	Следящая, астатическая по возмущающему воздействию, с модальным управлением	Двухконтурная система стабилизации скорости, астатическая по возмущению	Трехконтурная позиционная система, статическая по возмущению	Следящая система, астатическая по возмущению	Двухконтурная система стабилизации скорости, астатическая с модальным управлением

## Приложение В (обязательное)

Таблица В.1 – Выбор типа двигателя

Последняя цифра зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип двигателя	2ПН 200М	2ПН 200М	2ПН 200L	2ПН 200L	2ПН 180L	2ПН 180М	2ПБ 180L	2ПН 160L	2ПБ 160L	2ПН 132L
$P_n$ , кВт	8,5	13	11	16	10	5,6	5,6	11	5,3	5,5
$n_n$ , об/мин	810	1100	830	1000	980	760	1000	1500	1450	1540
$U_{ян}$ , В	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
$I_{ян}$ , А	44,5	67	57	82	52,5	30	29,2	56	27,4	30,4

Таблица В.2 – Режимы работы СУЭП

Предпоследняя цифра зачетной книжки	Пуск	Останов	Реверс	Наброс-сброс нагрузки	$M/M$	$U$ , В	Диапазон	$J_m/J_d$
1	+	+	–	+	–	+1, +10	20	0,5
2	+	–	+	+	0,5	+10, –5	30	1,0
3	+	+	–	+	–	+5, +10	50	1,5
4	+	–	+	+	0,5	+10, –1	20	2,0
5	+	+	–	+	–	+5, +10	50	5,0
6	+	–	+	+	1	+5, –5, +10	10	4,0
7	+	+	–	+	–	+1, +10, +5	15	2,0
8	+	–	+	+	0,75	+10, –1, +5	40	1,5
9	+	+	–	+	–	+10, +1	25	1,0
0	+	–	+	+	0,25	+5, +10, –5	30	0,5

*Примечание* – Диапазон регулирования для систем управления с ТРН принять  $D = 10$



## Приложение Г (обязательное)

Таблица Г.1 – Расчет статического момента сил сопротивлений

Предпоследняя цифра зачетной книжки	Формула для определения момента нагрузки
1	$M_c = 0,1M_M \cdot \text{sign } w$
3	$M_c = 0,5M_M \cdot \text{sign } w$
5	$M_c = M_M \cdot \text{sign } w$
7	$M_c = 0,2M_H + 0,9 \cdot (w/w_H)^2 \cdot M_M \cdot \text{sign } w$
9	$M_c = 0,2M_H + 0,9 \cdot (w/w_H)^2 \cdot M_M \cdot \text{sign } w$
0	$M_c = 0,2M_H + 0,9 \cdot (w/w_H)^2 \cdot M_M \cdot \text{sign } w$

Таблица Г.2 – Выбор типа двигателя для систем с ТРН

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип двигателя	4A80	4A100	4A132	4A71	4A132	4A160	4A112	4A90	4A160	4A250
$P$ , кВт	2,2	4	11	0,75	5,5	15	3	0,75	7,5	30
$n_c$ , об/мин	3000	3000	1500	1500	1500	1000	1000	750	750	600
$U_n$ , В	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
$I_n/I_u$ , А	6,5	7,5	7,5	4,5	7	6	6	3,5	6	6

## Приложение Д (справочное)

Таблица Д.1 – Технические данные трехфазных трансформаторов серии ТМ

Тип	$P_{mp}$ , кВ·А	$U_{1н}$ , В	$K_{2н}$ , В	Потери, Вт		$U_k$ , %	$I_{xx}$ , % от $I_n$
				холостого хода	короткого замыкания		
ТМ-20/6	20	380	230	180	600	5,5	9
ТМ-30/6	30	380	230	250	850	5,5	8
ТМ-50/6	50	380	230	350	1325	5,5	7
ТМ-100/6	100	6000	230	600	2400	5,5	6,5
ТМ-180/6	180	6000	230	1000	4000	5,5	6

Таблица Д.2 – Технические данные трансформаторов ТТ

Тип	Номинальная мощность $S_n$ , кВ·А	Номинальное напряжение, В		Напряже- ние короткого замыкания $u_k$ , %	Потери, Вт		Схема Соеди- нения
		$U_{1н}$	$U_{2н}$		холостого хода	короткого замыкания	
ТТ-2,5	2,5	220/380	104	4	35	110	$\Delta/\Lambda - \Lambda_0$
ТТ-6	6		104 (208)	6	78	250	
ТТ-8	8		208 (260)	8	105	290	
ТТ-11	11		260 (416)	8	138	330	
ТТ-14	14		208 (416)	8	169	390	
ТТ-19	19		260 (416)	8	210	420	
ТТ-25	25		260 (416)	8	239	535	

*Примечание* – Трансформаторы могут быть выполнены на любые вторичные напряжения, указанные в таблице; трансформаторы имеют третью обмотку с  $U_{2н} = 93$  В, предназначенную для питания цепей управления электропривода

## Приложение Е (справочное)

Таблица Е.1 – Технические данные тахогенераторов постоянного тока вращающегося трансформатора

Тип тахогенератора	Номинальное напряжение, В	Номинальная скорость вращения, об/мин	Номинальный ток, А	$R_m$ , Ом
ТМГ-30П	230	4000	0,087	400
ТГ-2	110	2400	0,3	115
ТД-103	110	1500	0,06	710
ТД-201	110	1000	0,1	780

Таблица Е.2 – Характеристики трансформатора тока ТКФ-5

Тип	Номинальное напряжение, В	Класс точности	Мощность нагрузки при работе в классе точности 3S, В·А	Номинальный первичный ток $I_H$ , А
ТКФ-5	500	3	50	5; 7,5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600

Таблица Е.3 – Характеристики сельсинов

Блок ограничения	Назначение	Частота, Гц	Напряжение питания, В	Напряжение однофазной обмотки, В	Погрешность, %	Потребляемый ток, А
БС-405	Приемник	50	110	34	±18	0,09
БС-405		50	110	78	±30	0,09
БС-155А		50	110	100	±5	0,15
СБ-32-18		400	36	21	±10	0,02

Таблица Е.4 – справочные данные операционных усилителей (ОУ)

Тип ОУ	$K_y$	$U_{in}$ , В	$I_n$ , А	$U_m$ , В	$R_m$ , Ом	$U$ , В
К14ОУД6	30000	±15	100	±10	1,0	11,0
14ОУД7	50000		200	±4	0,3	11,5
К14ОУД8А	50000		0,2	50	1000	10,0
К14ОУД20	50000		200	±5	0,4	11,5
КМ551УД1А	500000		100	1,5	–	10,0
КМ551УД1Б	250000		125	2,5	–	10,0
К553УД1А	15000		500	7,5	–	10,0
К553УД1Б	25000		50	2,0	–	10,0
К553УД2	20000		500	7,5	0,30	10,0

## Приложение Ж (справочное)

Таблица Ж.1 – Технические данные вращающихся трансформаторов (ВТ)

Обозначение ВТ	Назначение ВТ	Напряжение питания $U$ , В	Полное входное сопротивление холостого хода, Ом	Коэффициент трансформации $k$	Погрешность измерения
КФЗ.031.048	СКВТ	40	200		
	ВТДП-П		400	0,53	$\pm 30$
			500		
КФЗ.031.050	СКВТ	60	400		
	ВТДП-П		500	0,53	$\pm 30$
			1000		
КФЗ.031.053	СКВТ	60	600		
	ВТДП-П		1000	0,96	$\pm 30$
			2000		
ЛШЗ.010.391	СКВТ		200		
	ВТДП-Д	40	450	0,56	
ЛШЗ.010.516-01	СКВТ ВТДП-Д	40	200	0,56	$\pm 1$
ЛШЗ.010.516-02	СКВТ ВТДП-Д	40	450	0,56	$\pm 2$
ЛШЗ.010.516-03	ПВТ ВТДП-Д	40	200 450	0,72	$\pm 4$
ЛШЗ.010.390	ВТДП-Д	27	200	0,96	
			450		
СКТ-225-2Д	ВТДП-Д	36	1330	1,0	$\pm 5$
СКТ-225-2Д8		36	1330	0,22	

Таблица Ж.2 – Технические данные дросселей (реакторов)

Тип	Индуктивность, Гн	Номинальный ток, А	Сопротивление обмотки, Ом
ДФ-1	0,25	25	–
ДФ-7	0,015	40	–
ДФ-7	0,00045	235	–
ФРОС-8/6	0,02	150	–
ФРОС-8/0,5	0,004	200	–
Д25	0,08	1,1	4,0
Д26	0,16	0,8	7,0
Д27	0,3	0,56	14,0
Д34	0,08	1,4	2,6

Окончание таблицы Ж.2

Тип	Индуктивность, Гн	Номинальный ток, А	Сопротивление обмотки, Ом
Д35	0,16	1,0	5,3
Д43	0,08	2,2	1,85
Д52	0,01	12,5	0,086
Д53	0,02	4,4	0,35
Д56	0,0005	16,5	0,017
Д59	0,0043	2,9	0,3
Д60	0,0005	10,0	0,015
Д69	0,005	5,6	0,17

## Приложение И (справочное)

Таблица И.1 – Технические данные фильтровых реакторов

Тип	Номинальный ток, А	Номинальная индуктивность, Гн
ДФ-7	5	1
	7	0,55
	10	0,25
	15	0,1
	20	0,0625
	40	0,015
	50	0,01
	150	0,0011
ДФ-3	235	0,00045
	6	2,5
	8	1
ДФ-2	10	0,8
	250	0,0014
ДФ-1	8	3,5
	25	0,25

Таблица И.2 – Технические данные ограничивающих реакторов

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Уравнительный ток, А	Номинальная индуктивность, мГн
РОС-16/0,5	200	160	14,5	20
РОС-32/0,5	400	160	14,5	40
РОС-50/0,5	200	320	31	9,35
РОС-50/0,5Т	200	500	46	6
РОС-64/0,5Т	400	500	48	12
РОС-80/0,5Т	200	800	77	3,75

Таблица И.3 – Технические данные кремниевых стабилизаторов

Тип	Напряжение стабилизации $U_{ст}$ , В	Максимальный ток стабилизации $I_{ст\ max}$ , мА	Максимальная мощность $P_{max}$ , Вт
Д808	7...8,5	33	0,28
Д810	9...10,5	26	
Д811	10...12	23	

Окончание таблицы И.3

Тип	Напряжение стабилизации $U_{ст}$ , В	Максимальный ток стабилизации $I_{ст\ max}$ , мА	Максимальная мощность $P_{max}$ , Вт
Д813	11,5...14	20	0,28
2С156А	5,05...6,16	55	
2С168А	6,1...7,5	45	
Д814А	7...8,5	40	
Д814Б	8...9,5	36	
Д814В	9...10,5	32	
КС211Б	11...13,2	33	
КС211В	8,8...11	33	
КС211Г	9,4...12,7	33	

## Приложение К (справочное)

Таблица К.1 – Технические данные сельсинов

Тип сельсина	Назначение	Частота напряжения питания, Гц	Напряжение питания, В	Напряжение однофазной обмотки СП $U$ , В	Погрешность измерения, %	Потребляемый ток, А
НД-501	Датчик	50	110	152		0,7
НД-414						0,6
НД-404	Датчик	400	110	100		1,3
НД-214						0,58
НД-204						0,35
БД-501				152		1,2
БД-404	Датчик	50	110	152		0,4
БД-404				34		0,4
БС-3	Датчик	400	36	5		0,012
СС-405	Приемник	50	110	53		0,13
СТ-1		50	36	31	20	0,035