

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ / О.В. Юсупова

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### Б1.В.04.06 «Теория электропривода»

<b>Код и направление подготовки (специальность)</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
<b>Направленность (профиль)</b>	Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов
<b>Квалификация</b>	Бакалавр
<b>Форма обучения</b>	Очная
<b>Год начала подготовки</b>	2022
<b>Институт / факультет</b>	Электротехнический факультет (ЭТФ)
<b>Выпускающая кафедра</b>	кафедра "Электропривод и промышленная автоматика"
<b>Кафедра-разработчик</b>	кафедра "Электропривод и промышленная автоматика"
<b>Объем дисциплины, ч. / з.е.</b>	216 / 6
<b>Форма контроля (промежуточная аттестация)</b>	Зачет с оценкой, Экзамен

## **Б1.В.04.06 «Теория электропривода»**

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) **13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от № 144 от 28.02.2018 и соответствующего учебного плана.

Разработчик РПД:

Доцент, кандидат  
технических наук, доцент

---

(должность, степень, ученое звание)

В.П Курган

---

(ФИО)

Заведующий кафедрой

А.В. Стариков, доктор  
технических наук, профессор

---

(ФИО, степень, ученое звание)

**СОГЛАСОВАНО:**

Председатель методического совета  
факультета / института (или учебно-  
методической комиссии)

В.Н Овсянников, кандидат  
технических наук, доцент

---

(ФИО, степень, ученое звание)

Руководитель образовательной  
программы

П.Г. Кравцов, кандидат  
технических наук, доцент

---

(ФИО, степень, ученое звание)

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы .....	4
2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы .....	5
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся .....	5
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий .....	5
4.1 Содержание лекционных занятий .....	6
4.2 Содержание лабораторных занятий .....	9
4.3 Содержание практических занятий .....	12
4.4. Содержание самостоятельной работы .....	14
5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю) .....	18
6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения .....	19
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем .....	19
8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю) .....	20
9. Методические материалы .....	23
10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) .....	25

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю),  
соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной  
программы**

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Профессиональные компетенции			
Не предусмотрено	ПК-4 Способен разрабатывать отдельные разделы проектов и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	Владеть Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..
			Знать Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.
			Уметь Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.

## 2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы: **обязательная часть**

Код компетенции	Предшествующие дисциплины	Параллельно осваиваемые дисциплины	Последующие дисциплины
ПК-4	Интеллектуальная и промышленная собственность; Моделирование в технике; Моделирование электромеханических систем; Основы электропривода; Учебная практика: профилирующая практика	Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы; Проектирование электротехнических устройств; Производственная практика: преддипломная практика; Системы управления электроприводов	

## 3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Вид учебной работы	Всего часов / часов в электронной форме	7 семестр часов / часов в электронной форме	8 семестр часов / часов в электронной форме
<b>Аудиторная контактная работа (всего),</b> в том числе:	100	64	36
Лабораторные работы	28	16	12
Лекции	44	32	12
Практические занятия	28	16	12
<b>Внеаудиторная контактная работа, КСР</b>	6	3	3
<b>Самостоятельная работа (всего),</b> в том числе:	83	14	69
выполнение курсовых проектов	14	14	0
подготовка к лабораторным работам	57	0	57
подготовка к практическим занятиям	12	0	12
<b>Контроль</b>	27	27	0
<b>Итого: час</b>	216	108	108
<b>Итого: з.е.</b>	6	3	3

## 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

№ раздела	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы				
		ЛЗ	ЛР	ПЗ	СРС	Всего часов
1	Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода	8	0	0	4	12
2	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	12	16	10	10	48
3	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	4	4	2	11	21
4	Электромеханические следящие системы	8	4	4	11	27
5	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	6	4	8	35	53
6	Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	6	0	4	12	22
	<b>КСР</b>	0	0	0	0	6
	<b>Контроль</b>	0	0	0	0	27
	<b>Итого</b>	44	28	28	83	216

#### 4.1 Содержание лекционных занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема лекции	Содержание лекции (перечень дидактических единиц; рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
<b>7 семестр</b>				
1	Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода	Тема 1.1. ВВЕДЕНИЕ. Предмет дисциплины «Теория электропривода» (ТЭП) и её задачи.	1.1.1. Исторический обзор развития ТЭП в России за рубежом. 1.1.2. ТЭП – теоретическая основа для построения современных автоматизированных комплектных электроприводов постоянного и переменного тока.	2
2	Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода	Тема 1.1. ВВЕДЕНИЕ. Предмет дисциплины «Теория электропривода» (ТЭП) и её задачи.	1.1.3. Структура и содержание дисциплины «Теория электропривода».	2
3	Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода	Тема 1.2. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода.	1.2.1. Статические и динамические свойства, структурная схема и передаточная функция двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ). 1.2.2. Динамические свойства тиристорного преобразователя напряжения.	2

4	Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода	Тема 1.2. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода.	1.2.3. Расчет графиков механических характеристик и переходных процессов разомкнутого электропривода	2
5	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.1. . Основные сведения и понятия о системах подчиненного регулирования электропривода постоянного тока.	2.1.1. Структура и общая характеристика систем подчиненного регулирования (СПР). 2.1.2. Последовательность оптимизации отдельных контуров регулирования в СПР.	2
6	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.1. . Основные сведения и понятия о системах подчиненного регулирования электропривода постоянного тока.	2.1.3. Методика выбора и реализация регуляторов в СПР.	2
7	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.2. Условия технического (модульного) оптимума переходных процессов в системе подчиненного регулирования (СПР).	2.2.1. Желаемая передаточная функция оптимизируемого разомкнутого контура при техническом оптимуме и графики её ЛАФЧХ.	2
8	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.2. Условия технического (модульного) оптимума переходных процессов в системе подчиненного регулирования (СПР).	2.2.2. График переходной характеристики в контуре при его настройке на технический оптимум и его показатели качества.	2
9	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.3. Условия симметричного оптимума переходных процессов в системе подчиненного регулирования (СПР).	2.3.1. Обоснование настройки контура на симметричный оптимум (СО).	2
10	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.3. Условия симметричного оптимума переходных процессов в системе подчиненного регулирования (СПР).	2.3.2. Желаемая передаточная функция оптимизируемого разомкнутого контура при симметричном оптимуме и графики её ЛАФЧХ. 2.3.3. График переходной характеристики в контуре при его настройке на симметричный оптимум и его показатели качества. Построение графика ЛАХ ЛСОрж(w).	2
11	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	Тема 3.1. Регулирование скорости электропривода постоянного тока при постоянном моменте и постоянной мощности.	3.1.1. Диаграмма момента и мощности. 3.1.2. Обоснование двухзонного регулирования скорости электропривода постоянного тока .	2
12	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	Тема 3.1. Регулирование скорости электропривода постоянного тока при постоянном моменте и постоянной мощности.	3.1.3. Структурная схема системы двухзонного регулирования и ее анализ.	2

13	Электромеханические следящие системы	Тема 4.1. Принцип инвариантности в следящей системе.	4.1.1.Условие абсолютной инвариантности в линейной следящей системе.	2
14	Электромеханические следящие системы	Тема 4.1. Принцип инвариантности в следящей системе	4.1.2.Пример реализации инвариантности в линейной следящей системе.	2
15	Электромеханические следящие системы	Тема 4.2. Позиционная следящая система.	4.2.1. Эквивалентная структурная схема трехконтурной СПР. 4.2.2. Режим отработки малых перемещений. .	2
16	Электромеханические следящие системы	Тема 4.2. Позиционная следящая система.	4.2.3. Режим отработки средних и больших перемещений	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>32</b>
<b>8 семестр</b>				
17	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.1. Общие положения частотного регулирования скорости асинхронного двигателя (АД).	5.1.1.Схема замещения АД при частотном регулировании. 5.1.2. Определение параметров схемы замещения АД при частотном регулировании.	2
18	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.2. Механические характеристики АД при частотном регулировании	5.2.1.Законы частотного регулирования скорости АД. 5.2.2.Механические характеристики АД при законе частотного регулирования $U/f = \text{const}$ и их графики.	2
19	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.3. Регулирование скорости АД при постоянстве потокосцепления статора и ротора.	5.3.1. Уравнение механической характеристики АД при постоянстве потокосцепления статора. 5.3.2.Механические характеристики АД при постоянстве потокосцепления статора и их графики. 5.3.3.Уравнение механической характеристики АД при постоянстве потокосцепления ротора. 5.3.4. Механические характеристики АД при постоянстве потокосцепления статора и их графики.	2
20	Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Тема 6.1. Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом.	6.2.1.Векторная математическая модель АД. 6.3.2.Расчет параметров структурной схемы АД при векторном управлении.	2
21	Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Тема 6.2. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом.	6.2.1.Структурная схема системы подчиненного регулирования при векторном управлении. 6.2.2.Контур регулирования тока фазы. 6.2.3. Контур регулирования потокосцепления ротора.	2
22	Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Тема 6.2. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом.	6.2.4. Контур регулирования момента. 6.2.5. Контур регулирования скорости.	2

<b>Итого за семестр:</b>	<b>12</b>
<b>Итого:</b>	<b>44</b>

## 4.2 Содержание лабораторных занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема лабораторного занятия	Содержание лабораторного занятия (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
<b>7 семестр</b>				
1	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы подчиненного регулирования скорости на базе тиристорного электропривода «КЕМТОК».	1. Экспериментальное определение коэффициента передачи двигателя. 2. Экспериментальное определение .электромеханической постоянной времени двигателя. 3. Аналитическое определение активного сопротивления якорной цепи двигателя.	2
2	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы подчиненного регулирования скорости на базе тиристорного электропривода «КЕМТОК».	4. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при настройке скоростного контура по условиям технического оптимума. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими выводами. 5. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при настройке скоростного контура на симметричный оптимум. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими выводами. 6. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при нестандартной настройке скоростного контура на симметричный оптимум	2

3	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы подчиненного регулирования скорости на базе тиристорного электропривода «BOSCH».	1. Экспериментальное определение коэффициента передачи двигателя КДУ. 2. Экспериментальное определение электромеханической постоянной времени двигателя ТМ. 3. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при настройке скоростного контура по условиям технического оптимума. 4. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при настройке скоростного контура на симметричный оптимум. 5. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при нестандартной настройке скоростного контура на симметричный оптимум.	2
4	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы подчиненного регулирования скорости на базе тиристорного электропривода «BOSCH».	6. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в замкнутом электроприводе при настройке контура скорости на технический оптимум. 7. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в замкнутом электроприводе при настройке контура скорости на симметричный оптимум с ПИ-регулятором. 8. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в замкнутом электроприводе при настройке контура скорости на симметричный оптимум с ПИД-регулятором. 9. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в разомкнутой системе электропривода.	2
5	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы подчиненного регулирования скорости на базе тиристорного электропривода «КЕМЕК».	1. Экспериментальное определение коэффициента передачи двигателя КДУ. 2. Экспериментальное определение электромеханической постоянной времени двигателя Тм. 3. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при настройке скоростного контура по условиям технического оптимума. 4. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при настройке скоростного контура на симметричный оптимум. 5. Экспериментальное исследование переходного процесса изменения скорости при отработке в СПР скачкообразного управляющего воздействия при нестандартной настройке скоростного контура на симметричный оптимум.	2

6	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы подчиненного регулирования скорости на базе тиристорного электропривода «КЕМЕК».	6. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в замкнутом электроприводе при настройке контура скорости на технический оптимум. 7. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в замкнутом электроприводе при настройке контура скорости на симметричный оптимум с ПИ-регулятором. 8. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в замкнутом электроприводе при настройке контура скорости на симметричный оптимум с ПИД-регулятором. 9. Экспериментальное определение электромеханической характеристики в разомкнутой системе электропривода	2
7	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы автоматической стабилизации момента электропривода постоянного тока.	1. Экспериментальное определение коэффициента передачи двигателя КДУ. 2. Экспериментальное определение электромеханической постоянной времени двигателя Тм.	2
8	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Исследование системы автоматической стабилизации момента электропривода постоянного тока.	3. Определение статических характеристик системы автоматической стабилизации момента. 4. Определение переходных характеристик системы автоматической стабилизации момента	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>16</b>
<b>8 семестр</b>				
9	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	Исследование двухзонной системы стабилизации скорости «Кемтор».	1. Экспериментальное определение переходного процесса изменения скорости при отработке скачкообразного управляющего воздействия на входе разомкнутого электропривода. 2. Экспериментальное определение переходного процесса изменения скорости при отработке в системе подчиненного регулирования скачкообразного управляющего воздействия. 3. Экспериментальное определение переходного процесса изменения скорости двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля.	2
10	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	Исследование двухзонной системы стабилизации скорости «Кемтор».	4. Экспериментальное определение переходного процесса изменения тока возбуждения двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля. 5. Экспериментальное определение переходного процесса изменения тока якоря двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля.	2

11	Электромеханические следящие системы	Исследование следящей системы на базе тиристорного электропривода «КЕМЕК».	1. Экспериментальное определение коэффициента передачи измерителя рассогласования (сельсинной пары и фчв) 2. Экспериментальное определение коэффициента передачи замкнутого контура скорости и скоростной ошибки следящей системы в режиме постоянной заводки, а также определение коэффициент передачи разомкнутой системы $K_p$ - добротности следящего контура	2
12	Электромеханические следящие системы	Исследование следящей системы на базе тиристорного электропривода «КЕМЕК».	3. Экспериментальное определение ошибки следящей системы при гармоническом воздействии, подаваемом на ее вход.	2
13	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Исследование статических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода.	1. Экспериментальное определение закона частотного регулирования электропривода, т.е. снятие зависимости $U=\varphi(f)$ , где $U$ и $f$ соответственно напряжение и частота на обмотках статора. 2. Экспериментальное определение зависимости коэффициента мощности, тока статора от момента нагрузки асинхронного двигателя.	2
14	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Исследование статических характеристик частотно - регулируемого асинхронного электропривода.	3. Экспериментальное определение механической характеристики асинхронного электропривода. 4. Экспериментальное определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода с учётом компенсации скольжения.	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>12</b>
<b>Итого:</b>				<b>28</b>

### 4.3 Содержание практических занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема практического занятия	Содержание практического занятия (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
<b>7 семестр</b>				
1	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.1. Решение задач по настройке на ТО контура регулирования тока	2.1.1.Контур регулирования тока. 2.1.2 Расчет и реализация регулятора тока по условиям технического оптимума (ТО).	2
2	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.2. Решение задач по настройке на ТО контура регулирования скорости.	2.2.1.Расчет регулятора скорости по условиям ТО. 2.2.3. Реализация П-регулятора скорости. 2.2.2.Статические свойства контура скорости, настроенного на ТО.	2

3	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.3. Решение задач по настройке на СО контура регулирования скорости.	2.3.1.Расчет регулятора скорости по условиям СО. 2.3.2.Реализация ПИ-регулятора скорости.	2
4	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.4. Решение задач по расчету и построению графиков переходных характеристик в контуре регулирования скорости.	2.4.1.Определение передаточной функции по управляющему воздействию и обоснование необходимости фильтра на входе скоростного контура. 2.4.2.Построение графика переходной характеристики по управляющему воздействию. 2.4.3.Определение передаточной функции по возмущающему воздействию и построение графика переходного процесса.	2
5	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Тема 2.5. Решение задач по расчету и реализации регулятора скорости на не-типичной симметричный оптимум.	2.5.1.Расчет R-С параметров ПИД-регулятора скорости. 2.5.2.Передаточные функции скоростного контура по управляющему и возмущающему воздействию.	2
6	Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости	Тема 3.1. Решение задач по расчету и реализации регуляторов системы двухзонного регулирования скорости.	3.1.1.Контур регулирования тока возбуждения системы двухзонного регулирования. Расчет и реализация регулятора тока возбуждения двигателя. 3.1.2. Контур регулирования электро-движущей силы (ЭДС) двигателя системы двухзонного регулирования. Расчет и реализация регулятора электродвижущей силы двигателя.	2
7	Электромеханические следящие системы	Тема 4.1. Решение задач по статическому расчету астатической следящей системы.	4.1.1.Структурная схема статики астатической следящей системы. Режим постоянной заводки. 4.2.2. Определение допустимой скоростной ошибки следящей системы в режиме постоянной заводки.	2
8	Электромеханические следящие системы	Тема 4.2. Решение задач по выбору регулятора положения позиционной следящей системы.	4.2.1. Выбор регулятора положения при отработке малых перемещений. 4.2.2. Выбор нелинейного регулятора положения при отработке средних и больших перемещений.	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>16</b>
<b>8 семестр</b>				
9	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.1. . Расчёт параметров схемы замещения асинхронного двигателя при частотном регулировании.	5.1.1 Построить Т-образная схема замещения асинхронного двигателя при частотном регулировании. 5.1.2 Расчет схемы замещения асинхронного двигателя при частотном регулировании	2

10	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.2. Расчёт механических характеристик асинхронного двигателя при законе частотного регулирования $U/f = \text{const}$ и их графики.	5.2.1 Аналитический расчёт характеристик асинхронного двигателя при законе частотного регулирования $U/f = \text{const}$ . 5.2.2 Графики механических характеристик асинхронного двигателя при законе частотного регулирования $U/f = \text{const}$ .	2
11	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.3. Расчёт механических характеристик асинхронного двигателя при постоянстве потокосцепления статора и их графики.	5.3.1 Аналитический расчёт характеристик асинхронного двигателя при постоянстве потокосцепления статора. 5.3.2 Графики механических характеристик асинхронного двигателя при постоянстве потокосцепления статора	2
12	Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Тема 5.4. Расчёт механических характеристик асинхронного двигателя постоянстве потокосцепления ротора и их графики.	5.4.1 Аналитический расчёт характеристик асинхронного двигателя постоянстве потокосцепления ротора. 5.4.2 Графики механических характеристик асинхронного двигателя постоянстве потокосцепления ротора.	2
13	Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Тема 6.1. Расчет системы векторного управления асинхронным электроприводом.	6.1.1. Расчет контура регулирования тока фазы. 6.1.2. Расчет контура регулирования потокосцепления ротора.	2
14	Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Тема 6.1. Расчет системы векторного управления асинхронным электроприводом.	6.1.3. Расчет контура регулирования момента. 6.1.4 Расчет контура регулирования скорости на CO.	2
<b>Итого за семестр:</b>				<b>12</b>
<b>Итого:</b>				<b>28</b>

#### 4.4. Содержание самостоятельной работы

Наименование раздела	Вид самостоятельной работы	Содержание самостоятельной работы (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов
<b>7 семестр</b>			
Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода	Выполнение курсового проекта	Расчет электромеханических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании скорости в системе «управляемый преобразователь - двигатель».	4

Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Выполнение курсового проекта Выполнение курсового проекта	Расчет и реализация регулятора тока по условиям ТО. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям ТО. Статические свойства контура скорости, настроенного на ТО.	2
Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Выполнение курсового проекта	Расчет и реализация регулятора скорости по условиям СО.	2
Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Выполнение курсового проекта	Построение графиков переходных процессов по управляющему воздействию и возмущающему воздействию по условиям СО.	2
Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Выполнение курсового проекта	Расчет и реализация регулятора скорости на нетиповой симметричный оптимум с ПИД-регулятором скорости.	2
Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря	Выполнение курсового проекта	Построение графиков переходных процессов по управляющему воздействию и возмущающему воздействию по условиям нетипового симметричного оптимума НСО.	2
<b>Итого за семестр:</b>			<b>14</b>
<b>8 семестр</b>			

<p>Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости</p>	<p>Подготовка к лабораторной работе. Исследование двухзонной системы стабилизации скорости «Кемтор».</p>	<p>1. Определение переходного процесса изменения скорости при отработке скачкообразного управляющего воздействия на входе разомкнутого электропривода. 2. Определение переходного процесса изменени скорости при отработке в системе подчиненного регулирования скачкообразного управляющего воздействия. 3. Определение переходного процесса изменения скорости двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля. 4. Определение переходного процесса изменения тока возбуждения двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля. 5.Определение переходного процесса изменения тока якоря двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля.</p>	<p>5</p>
<p>Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости</p>	<p>Написание отчёта по лабораторной работе. Исследование двухзонной системы стабилизации скорости «Кемтор».</p>	<p>1.Экспериментальное определение переходного процесса изменения скорости при отработке скачкообразного управляющего воздействия на входе разомкнутого электропривода. 2.Экспериментальное определение переходного процесса изменени скорости при отработке в системе подчиненного регулирования скачкообразного управляющего воздействия. 3. Экспериментальное определение переходного процесса изменения скорости двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля. 4.Экспериментальное определение переходного процесса изменения тока возбуждения двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля. 5.Экспериментальное определение переходного процесса изменения тока якоря двигателя при разгоне электропривода «Кемтор» до максимальной скорости и торможении до нуля.</p>	<p>6</p>

<p>Электромеханические следящие системы</p>	<p>Подготовка к лабораторной работе. Исследование следящей системы на базе тиристорного электропривода «КЕМЕК».</p>	<p>1. Определение коэффициента передачи измерителя рассогласования (сельсинной пары и фчв) 2. Определение коэффициента передачи замкнутого контура скорости и скоростной ошибки следящей системы в режиме постоянной заводки, а также определение коэффициент передачи разомкнутой системы <math>K_p</math> – добротности следящего контура 3. Определение ошибки следящей системы при гармоническом воздействии, подаваемом на ее вход.</p>	<p>5</p>
<p>Электромеханические следящие системы</p>	<p>Написание отчёта по лабораторной работе. Исследование следящей системы на базе тиристорного электропривода «КЕМЕК».</p>	<p>1. Экспериментальное определение коэффициента передачи измерителя рассогласования (сельсинной пары и фчв) 2. Экспериментальное определение коэффициента передачи замкнутого контура скорости и скоростной ошибки следящей системы в режиме постоянной заводки, а также определение коэффициент передачи разомкнутой системы <math>K_p</math> – добротности следящего контура 3. Экспериментальное определение ошибки следящей системы при гармоническом воздействии, подаваемом на ее вход.</p>	<p>6</p>
<p>Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании</p>	<p>Подготовка к лабораторной работе. Исследование статических характеристик частотно – регулируемого асинхронного электропривода.</p>	<p>1. Определение закона частотного регулирования электропривода, т.е. снятие зависимости <math>U=?(f)</math>, где <math>U</math> и <math>f</math> соответственно напряжение и частота на обмотках статора. 2. Определение зависимости коэффициента мощности, тока статора от момента нагрузки асинхронного двигателя. 3. Определение механической характеристики асинхронного электропривода. 4. Определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода с учётом компенсации скольжения.</p>	<p>15</p>

Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Написание отчёта по лабораторной работе. Исследование статических характеристик частотно – регулируемого асинхронного электропривода.	1. Экспериментальное определение закона частотного регулирования электропривода, т.е. снятие зависимости $U=f(f)$ , где $U$ и $f$ соответственно напряжение и частота на обмотках статора. 2. Экспериментальное определение зависимости коэффициента мощности, тока статора от момента нагрузки асинхронного двигателя. 3. Экспериментальное определение механической характеристики асинхронного электропривода. 4. Экспериментальное определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода с учётом компенсации скольжения.	15
Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании	Подготовка к лабораторной работе. Исследование статических характеристик частотно – регулируемого асинхронного электропривода.	1. Определение закона частотного регулирования электропривода, т.е. снятие зависимости $U=f(f)$ , где $U$ и $f$ соответственно напряжение и частота на обмотках статора. 2. Определение зависимости коэффициента мощности, тока статора от момента нагрузки асинхронного двигателя. 3. Определение механической характеристики асинхронного электропривода. 4. Определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода с учётом компенсации скольжения.	5
Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Подготовка к практическому занятию. Расчет системы векторного управления асинхронным электроприводом.	1. Расчет контура регулирования тока фазы. 2. Расчет контура регулирования потокосцепления ротора.	6
Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом	Подготовка к практическому занятию. Расчет системы векторного управления асинхронным электроприводом.	1. Расчет контура регулирования момента. 2. Расчет контура регулирования скорости на С0.	6
<b>Итого за семестр:</b>			<b>69</b>
<b>Итого:</b>			<b>83</b>

## 5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю)

№ п/п	Библиографическое описание	Ресурс НТБ СамГТУ (ЭБС СамГТУ, IPRbooks и т.д.)
Основная литература		
1	Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода : Учеб.пособие / Н. Ф. Ильинский .- 3-е изд.,стер.- М., Изд-во МЭИ, 2007.- 221 с.	Электронный ресурс
2	Курган, В.П. Введение в электромеханику : учеб.пособие / В. П. Курган; Самар.гос.техн.ун-т.- Самара, 2011.- 71 с.	Электронный ресурс
3	Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : Учеб. / Г. Г. Соколовский .- 2-е изд.,испр.- М., Academia, 2007.- 265 с.	Электронный ресурс
Учебно-методическое обеспечение		
4	Теория электропривода : метод. указания к контрольной работе / Самар.гос.техн.ун-т, Электропривод и промышленная автоматика; сост.: В. П. Курган , А. А. Панкин.- Самара, 2014.- 27 с.- Режим доступа: <a href="https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 2685">https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 2685</a>	Электронный ресурс
5	Электропривод насосов и компрессоров : лаборатор. практикум / Самар.гос.техн.ун-т, Электропривод и промышленная автоматика; сост.: В. А. Арефьев, В. П. Курган , А. А. Панкин.- Самара, 2016.- 102 с.- Режим доступа: <a href="https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 2523">https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu elib 2523</a>	Электронный ресурс

Доступ обучающихся к ЭР НТБ СамГТУ ([elib.samgtu.ru](http://elib.samgtu.ru)) осуществляется посредством электронной информационной образовательной среды университета и сайта НТБ СамГТУ по логину и паролю.

## 6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения

При проведении лекционных занятий используется мультимедийное оборудование.

Организовано взаимодействие обучающегося и преподавателя с использованием электронной ин-формационной образовательной среды университета.

№ п/п	Наименование	Производитель	Способ распространения
1	Apache OpenOffice.org.Calc – табличный процессор с пакетом статистического анализа	Apache Software Foundation (Зарубежный)	Свободно распространяемое
2	Microsoft Office 2007 Open License Academic	Microsoft (Зарубежный)	Лицензионное
3	ОС Microsoft Windows 10 для образовательных учреждений	Microsoft (Зарубежный)	Лицензионное

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование	Краткое описание	Режим доступа
-------	--------------	------------------	---------------

1	Электротехника и промышленная электроника: конспекты лекций, МГТУ им. Н. Э. Баумана	<a href="http://fn.bmstu.ru/electro/newsite/lectures/lec%201/konspect.htm">fn.bmstu.ru/electro/newsite/lectures/lec%201/konspect.htm</a>	Ресурсы открытого доступа
---	---	--	---------------------------

## 8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

### Лекционные занятия

#### 8.1 Лекционные занятия:

null

#### Аудитории

для лекционных занятий укомплектованы мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории (наборы демонстрационного оборудования (проектор, экран, компьютер/ноутбук), учебно-наглядные пособия, тематические иллюстрации).

#### 8.2 Практические занятия:

null

#### Аудитории

для практических занятий укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения (проектор, экран, компьютер/ноутбук).

### 8.3 Лабораторные занятия:

null

Для лабораторных занятий в 7 семестре используются аудитория №14(1 корпус), оснащенная следующим оборудованием: 4 лабораторных стенда.

Для лабораторных занятий в 8 семестре используются аудитория №14(1 корпус), оснащенная следующим оборудованием: 3 лабораторных стенда.

### 8.4 Самостоятельная работа:

null

#### Помещения

для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом к электронной информационно-образовательной среде СамГТУ:

-

читальный зал НТБ СамГТУ (ауд. 200 корпус № 8; ауд. 125 корпус № 1; ауд. 41, 31, 34, 35

Главный корпус библиотеки, ауд. 83а, 414, 416, 0209 АСА СамГТУ; ауд. 401 корпус №10);

-

компьютерные классы (ауд. 208, 210 корпус № 8).

### **Практические занятия**

#### Аудитории

для практических занятий укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения (проектор, экран, компьютер/ноутбук).

### **Лабораторные занятия**

#### Для

лабораторных занятий в 7 семестре используются аудитория №14(1 корпус), оснащенная следующим оборудованием: 4 лабораторных стенда.

#### Для

лабораторных занятий в 8 семестре используются аудитория №14(1 корпус ), оснащенная следующим оборудованием: 3 лабораторных стенда.

### **Самостоятельная работа**

#### Помещения

для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом к электронной информационно-образовательной среде СамГТУ:

-

читальный зал НТБ СамГТУ (ауд. 200 корпус № 8; ауд. 125 корпус № 1; ауд. 41, 31, 34, 35  
Главный корпус библиотеки, ауд. 83а, 414, 416, 0209 АСА СамГТУ; ауд. 401 корпус №10);

## 9. Методические материалы

### Методические рекомендации при работе на лекции

До лекции студент должен просмотреть учебно-методическую и научную литературу по теме лекции с тем, чтобы иметь представление о проблемах, которые будут разбираться в лекции.

Перед началом лекции обучающимся сообщается тема лекции, план, вопросы, подлежащие рассмотрению, доводятся основные литературные источники. Весь учебный материал, сообщаемый преподавателем, должен не просто прослушиваться. Он должен быть активно воспринят, т.е. услышан, осмыслен, понят, зафиксирован на бумаге и закреплен в памяти. Приступая к слушанию нового учебного материала, полезно мысленно установить его связь с ранее изученным. Следя за техникой чтения лекции (акцент на существенном, повышение тона, изменение ритма, пауза и т.п.), необходимо вслед за преподавателем уметь выделять основные категории, законы и определять их содержание, проблемы, предполагать их возможные решения, доказательства и выводы. Осуществляя такую работу, можно значительно облегчить себе понимание учебного материала, его конспектирование и дальнейшее изучение.

Конспектирование лекции позволяет обработать, систематизировать и лучше сохранить полученную информацию с тем, чтобы в будущем можно было восстановить в памяти основные, содержательные моменты. Типичная ошибка, совершаемая обучающимся, дословное конспектирование речи преподавателя. Как правило, при записи «слово в слово» не остается времени на обдумывание, анализ и синтез информации. Отбирая нужную информацию, главные мысли, проблемы, решения и выводы, необходимо сокращать текст, строить его таким образом, чтобы потом можно было легко в нем разобраться. Желательно оставить в рабочих конспектах поля, на которых можно будет делать пометки из рекомендованной литературы, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. С окончанием лекции работа над конспектом не может считаться завершённой. Нужно еще восстановить отдельные места, проверить, все ли понятно, уточнить что-то на консультации и т.п. с тем, чтобы конспект мог быть использован в процессе подготовки к практическим занятиям, зачету, экзамену. Конспект лекции – незаменимый учебный документ, необходимый для самостоятельной работы.

### Методические рекомендации при подготовке и работе на практическом занятии

Практические занятия по дисциплине проводятся в целях выработки практических умений и приобретения навыков в решении профессиональных задач.

Рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию:

1. ознакомление с планом практического занятия, который отражает содержание предложенной темы;
2. проработка конспекта лекции;
3. чтение рекомендованной литературы;
4. подготовка ответов на вопросы плана практического занятия;
5. выполнение тестовых заданий, задач и др.

Подготовка обучающегося к практическому занятию производится по вопросам, разработанным для каждой темы практических занятий и (или) лекций. В процессе подготовки к практическим занятиям, необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной

литературы.

Работа студентов во время практического занятия осуществляется на основе заданий, которые выдаются обучающимся в начале или во время занятия. На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий. Обучающимся необходимо обращать внимание на основные понятия, алгоритмы, определять практическую значимость рассматриваемых вопросов. На практических занятиях обучающиеся должны уметь выполнить расчет по заданным параметрам или выработать определенные решения по обозначенной проблеме. Задания могут быть групповые и индивидуальные. В зависимости от сложности предлагаемых заданий, целей занятия, общей подготовки обучающихся преподаватель может подсказать обучающимся алгоритм решения или первое действие, или указать общее направление рассуждений. Полученные результаты обсуждаются с позиций их адекватности или эффективности в рассмотренной ситуации.

## Методические рекомендации при работе на лабораторном занятии

Проведение лабораторной работы делится на две условные части: теоретическую и практическую.

Необходимыми структурными элементами занятия являются проведение лабораторной работы, проверка усвоенного материала, включающая обсуждение теоретических основ выполняемой работы.

Перед лабораторной работой, как правило, проводится технико-теоретический инструктаж по использованию необходимого оборудования. Преподаватель корректирует деятельность обучающегося в процессе выполнения работы (при необходимости). После завершения лабораторной работы подводятся итоги, обсуждаются результаты деятельности.

Возможны следующие формы организации лабораторных работ: фронтальная, групповая и индивидуальная. При фронтальной форме выполняется одна и та же работа (при этом возможны различные варианты заданий). При групповой форме работа выполняется группой (командой). При индивидуальной форме обучающимися выполняются индивидуальные работы.

По каждой лабораторной работе имеются методические указания по их выполнению, включающие необходимый теоретический и практический материал, содержащие элементы и последовательную инструкцию по проведению выбранной работы, индивидуальные варианты заданий, требования и форму отчетности по данной работе.

## Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы

Организация самостоятельной работы обучающихся ориентируется на активные методы овладения знаниями, развитие творческих способностей, переход от поточного к индивидуализированному обучению с учетом потребностей и возможностей обучающегося.

Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой, материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса.

Самостоятельная работа реализуется:

- непосредственно в процессе аудиторных занятий;
- на лекциях, практических занятиях;
- в контакте с преподавателем вне рамок расписания;
- на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.;
- в библиотеке, дома, на кафедре при выполнении обучающимся учебных и практических задач.

Эффективным средством осуществления обучающимся самостоятельной работы является электронная информационно-образовательная среда университета, которая обеспечивает доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем.

## **10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)**

Фонд оценочных средств представлен в приложении № 1.

**Фонд оценочных средств  
по дисциплине  
Б1.В.04.06 «Теория электропривода»**

<b>Код и направление подготовки (специальность)</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
<b>Направленность (профиль)</b>	Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов
<b>Квалификация</b>	Бакалавр
<b>Форма обучения</b>	Очная
<b>Год начала подготовки</b>	2022
<b>Институт / факультет</b>	Электротехнический факультет (ЭТФ)
<b>Выпускающая кафедра</b>	кафедра "Электропривод и промышленная автоматика"
<b>Кафедра-разработчик</b>	кафедра "Электропривод и промышленная автоматика"
<b>Объем дисциплины, ч. / з.е.</b>	216 / 6
<b>Форма контроля (промежуточная аттестация)</b>	Зачет с оценкой, Экзамен

**Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю),  
соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной  
программы**

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Профессиональные компетенции			
Не предусмотрено	ПК-4 Способен разрабатывать отдельные разделы проектов и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<p>Владеть Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..</p>
			<p>Знать Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.</p>
			<p>Уметь Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.</p>

## Матрица соответствия оценочных средств запланированным результатам обучения

Код индикатора достижения компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства	Текущий контроль успеваемости	Промежуточная аттестация
<b>Введение. Статические и динамические свойства разомкнутого тиристорного электропривода</b>				
ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<b>Уметь</b> Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.	Расчёт курсового проекта	Нет	Да
		Вопросы для собеседования по практическим занятиям	Да	Нет
	<b>Владеть</b> Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..	Отчеты по лабораторным работам	Да	Нет
	<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	Список вопросов для подготовки к экзамену	Нет	Да
		тесты	Да	Нет
<b>Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с управлением по цепи якоря</b>				
ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<b>Владеть</b> Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..	Отчеты по лабораторным работам	Да	Нет
		Расчёт курсового проекта	Нет	Да
	<b>Уметь</b> Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.	Вопросы для собеседования по практическим занятиям	Да	Нет

	<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	Список вопросов для подготовки к экзамену	Нет	Да
		тесты	Да	Нет
<b>Анализ и синтез систем подчиненного регулирования электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости</b>				
ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<b>Владеть</b> Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..	Отчеты по лабораторным работам	Да	Нет
	<b>Уметь</b> Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.	Расчёт курсового проекта	Нет	Да
		Вопросы для собеседования по практическим занятиям	Да	Нет
	<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	Список вопросов для подготовки к экзамену	Нет	Да
		тесты	Да	Нет
	<b>Электромеханические следящие системы</b>			
ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<b>Владеть</b> Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..	Отчеты по лабораторным работам	Да	Нет
		<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	Список вопросов для подготовки к экзамену	Нет
	<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	тесты	Да	Нет

	<b>Уметь</b> Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.	Расчёт курсового проекта	Нет	Да
		Вопросы для собеседования по практическим занятиям	Да	Нет
<b>Законы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя АД. Механические характеристики АД при частотном регулировании</b>				
ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<b>Уметь</b> Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.	Вопросы для собеседования по практическим занятиям	Да	Нет
		Список вопросов для подготовки к экзамену	Нет	Да
	<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	тесты	Да	Нет
		<b>Владеть</b> Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..	Отчеты по лабораторным работам	Да
<b>Векторное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом</b>				
ПК-4.2 Оформляет техническую документацию на различных стадиях разработки проектов систем электропривода промышленных установок и технологических комплексов	<b>Уметь</b> Уметь: использовать практические методы расчета и выбора основных элементов электрических приводов; анализировать математические модели систем электроприводов и обслуживаемых ими технологий; разрабатывать отдельные разделы проектов, а также готовить техническую документацию проектов.	Вопросы для собеседования по практическим занятиям	Да	Нет
		<b>Владеть</b> Владеть: методами подготовки и выполнения отдельных разделов проектов по заданной методике с использованием современных информационных технологий и аппаратных средств в области систем электропривода..	Отчеты по лабораторным работам	Да
	<b>Знать</b> Знать: основные типы систем электропривода промышленных установок, их статические и динамические характеристики, а также регулировочные свойства; методы выполнения типовых расчётов и проектирования по заданной методике и оформлять техническую документацию на различных стадиях разработки проектов.	Список вопросов для подготовки к экзамену	Нет	Да
		тесты	Да	Нет

1. **Типовые контрольные задания или иные материалы для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие процесс формирования компетенций**

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
«Электропривод и промышленная автоматика»

\_\_\_\_\_ А.В. Стариков  
21 марта 2019 г.

## **ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

**НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ СТУДЕНТОВ по дисциплине  
«ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА»**

*для направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,  
профиля «Электропривод и автоматика промышленных установок  
и технологических комплексов»*

**Самара 2019**

Целью самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теория электропривода» является закрепление изученного теоретического материала и овладение практическими навыками расчёта систем подчинённого регулирования электроприводов. Результаты выполнения самостоятельной работы оформляются в виде отчетов по четырем типовым контрольным заданиям и оцениваются преподавателем дисциплины. Типовые контрольные задания составлены для четырех контрольных точек .

### **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ В 7 СЕМЕСТРЕ**

Расчет системы автоматического управления электропривода постоянного тока, построенной в виде системы подчиненного регулирования, по дисциплине «Теория электропривода» .

В контрольных заданиях должны быть решены следующие вопросы:

1. Расчет основных параметров схемы «тиристорный преобразователь-двигатель».
  - 1.1. Расчет и выбор силового трансформатора.
  - 1.2. Расчет и выбор управляемых клапанов.
  - 1.3. Расчет индуктивности и активного сопротивления якорной цепи.
  - 1.4. Определение статических и динамических характеристик силового преобразователя и двигателя.
2. Расчет и реализация регулятора тока по условиям технического оптимума.
3. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям технического оптимума.
4. Определение статических свойств контура скорости, настроенного на технический оптимум.
5. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям симметричного оптимума.

6. Построение графика переходной характеристики по управляющему воздействию для контура скорости, настроенного на симметричный оптимум.
7. Построение графика переходной характеристики по возмущающему воздействию для контура скорости, настроенного на симметричный оптимум.
8. Описание работы упрощенной принципиальной схемы системы автоматического управления электропривода постоянного тока.

Исходные данные для расчета берутся из таблицы согласно заданному преподавателем номеру варианта.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Электропривод постоянного тока выполнен по схеме двухконтурной системы подчиненного регулирования (СПР) с внутренним контуром, замкнутым по току якоря, и внешним, замкнутым по скорости двигателя. Структурная схема линеаризованной модели СПР, справедливая при типовых допущениях [1], приведена на рис. 1.

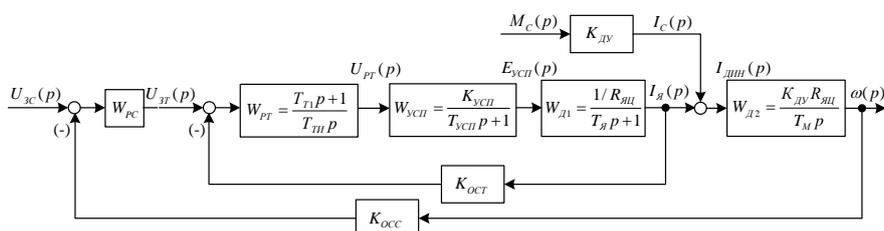


Рис. 1. Структурная схема линеаризованной модели СПР

Динамические свойства двигателя постоянного тока на этой схеме без учета действия внутренней обратной связи по ЭДС двигателя отражены звеньями с передаточными функциями  $W_{д1}(p)$  и  $W_{д2}(p)$ . Входной переменной для первого звена является ЭДС управляемого силового преобразователя  $E_{всн}(p)$ , а выходной – ток якоря  $I_я(p)$ . Связь между изображениями этих переменных устанавливается передаточной функцией аperiодического звена:

$$W_{д1}(p) = \frac{I_я(p)}{E_{всн}(p)} = \frac{1/R_{яц}}{T_я p + 1},$$

где  $R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи;

$T_я$  – электромагнитная постоянная времени двигателя.

Динамические свойства второго звена, выходной переменной которого является скорость двигателя  $\omega(p)$ , описываются передаточной функцией интегрирующего звена:

$$W_{Д2} = \frac{\omega(p)}{I_{я.дин}(p)} = \frac{K_{дв} R_{яц}}{T_M p};$$

$$I_{я.дин}(p) = I_я(p) - I_C(p),$$

где  $K_{дв}$  – коэффициент передачи двигателя;

$K_{ост}$  и  $K_{осс}$  – соответственно коэффициенты передачи звеньев обратной связи по току и скорости;

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени двигателя;

$I_C(p)$ ,  $I_{я.дин}(p)$  – соответственно статическая и динамическая составляющие тока якоря.

Вентильный преобразователь приближенно описывается передаточной функцией апериодического звена:

$$W_{всп}(p) = \frac{E_{всп}(p)}{U_{рт}(p)} = \frac{K_{всп}}{T_{всп} p + 1},$$

где  $K_{всп}$ ,  $T_{всп}$  – коэффициент передачи и постоянная времени вентильного (тиристорного) преобразователя.

Значение  $T_{всп}$  при синтезе СПР обычно принимается в качестве малой некомпенсируемой постоянной токового контура:  $T_{\mu r} = T_{всп}$ .

В схеме использован типовой ПИ-регулятор тока с передаточной функцией

$$W_{рт}(p) = \frac{T_{\mu r} p + 1}{T_{\mu r} p},$$

что обеспечивает настройку токового контура на технический оптимум (ТО).

Известно, что для внешнего скоростного контура электропривода в зависимости от требований к его статическим и динамическим характеристикам могут использоваться стандартные настройки на ТО и симметричный оптимум (СО). Желаемый тип настройки достигается использованием, соответственно, П- и ПИ-регуляторов с передаточными функциями:

$$W_{PC}^{MO}(p) = K_{PC};$$

$$W_{PC}^{CO}(p) = \frac{T_{CI}p + 1}{T_{CI}p}.$$

Отклик скоростного контура на скачок задающего сигнала при стандартных настройках системы показан на рис. 2. Скорость протекания переходных процессов в обоих случаях определяется величиной, эквивалентной некомпенсируемой постоянной времени  $T_{\mu c}$  скоростного контура, что определяет удобство построения теоретической кривой по оси абсцисс в относительных единицах времени ( $t/T_{\mu c}$ ), где  $T_{\mu c} = 2T_{\mu T}$ .

Важнейшими показателями качества переходного процесса по управляющему воздействию являются перерегулирование, определяемое как отношение максимального отклонения выходной координаты в переходном режиме от установившегося значения ( $\Delta\omega_{МАКС}$ ) к этому установившемуся значению ( $\omega_{УСТ}$ ):

$$\sigma = \frac{\Delta\omega_{МАКС}}{\omega_{УСТ}} \cdot 100\%,$$

а также время переходного процесса  $t_{ПП}$ , определяемое как интервал времени с момента подачи воздействия на вход системы до момента вхождения значений выходной координаты в зону допустимых отклонений от установившегося значения. Величину зоны допустимых отклонений обычно принимают равной  $\pm 0,05\omega_{УСТ}$ .

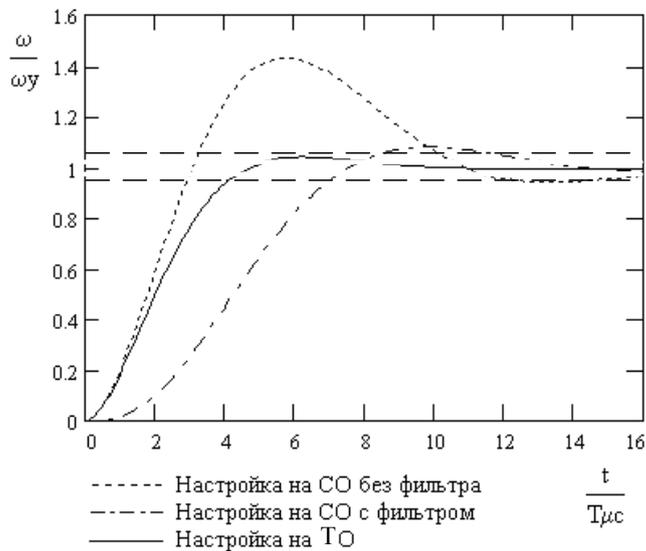


Рис. 2. Отклик скоростного контура на скачок задающего сигнала при стандартных настройках системы

Настройка скоростного контура на ТО (см. рис. 2) обеспечивает максимальное быстродействие системы. Однако жесткость механических характеристик электропривода при такой настройке, как правило, оказывается неудовлетворительной. В связи с этим при высоких требованиях к точности стабилизации скорости преимущественно используется настройка на СО, которая обеспечивает жесткие механические характеристики. Однако показатели качества переходного процесса в этом случае оказываются не всегда приемлемыми:  $\sigma = 43,3\%$ . Величину перерегулирования  $\sigma$  можно существенно снизить (до 8,1%) включением на входе системы апериодического фильтра с передаточной функцией:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{4T_{мс}p + 1}.$$

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

**Важно:** Исходные данные для расчета берутся из таблицы согласно заданному преподавателем номеру варианта.

**Параметры двигателя:**

Номинальная мощность:  $P_H$  [кВт].

Номинальная скорость:  $n_H$  [об/мин].

Номинальное напряжение:  $U_H$  [В].

Номинальный ток:  $I_H$  [А].

Номинальный момент:  $M_H$  [Н·м].

Маховой момент:  $GD^2$  [кг·м<sup>2</sup>].

Кратность пускового тока:  $\lambda$ .

Число пар полюсов:  $2p$ .

Активное сопротивление обмотки якоря при 15<sup>0</sup>С:  $R_{я}$  [Ом].

Число параллельных ветвей:  $2a$ .

Активное сопротивление обмотки добавочных полюсов:  $R_{д}$  [Ом].

Двигатели постоянного тока выпускаются со встроенным тахогенератором.

#### **Параметры нагрузки и силового преобразователя:**

Диапазон регулирования скорости:  $D$ .

Допустимая статическая ошибка:  $\xi_{доп}$  [%].

Момент инерции исполнительного механизма:  $J_M$  [кг·м<sup>2</sup>].

Постоянная времени управляемого силового преобразователя:  $T_{уст}$  [с].

Для всех вариантов берется один тип силовой схемы управляемого тиристорного преобразователя – реверсивная трехпульсная противоположная схема выпрямления с уравнительными дросселями.

#### **Значение коэффициентов силовой схемы**

Коэффициент схемы по напряжению	$K_H = 0,922$
Коэффициент запаса по напряжению	$K_U = 1,1$
Коэффициент запаса, учитывающий неполное открытие вентиля при максимальном управляющем сигнале	$K_{\alpha} = 1,1..1,2$
Коэффициент запаса, учитывающий падение напряжения в вентилях и обмотках трансформатора	$K_R = 1,05$
Коэффициент схемы по току вторичной обмотки	$K_{T2} = 0,578$
Коэффициент, учитывающий отклонение формы тока от прямоугольной	$K_i = 1,1$
Коэффициент схемы по току первичной обмотки	$K_{T1} = 0,47$
Коэффициент схемы по мощности	$K_M = 1,45$

Коэффициент схемы по среднему току вентиля  $K_{TB} = 0,333$   
Коэффициент схемы по максимальному напряжению  
вентиля  $K_{HB} = 2,25$

**Дополнительные данные:**

Следующие коэффициенты выбираются студентом произвольно в пределах указанных диапазонов.

Коэффициент, учитывающий индуктивность обмотки якоря для некомпенсированных машин  $K_L = 5..12$   
Относительное значение индуктивной составляющей напряжения короткого замыкания трансформатора для трансформаторов типа ТТ  $U_L = 0,08..0,1$   
Относительное значение активной составляющей напряжения короткого замыкания трансформатора для трансформаторов типа ТТ  $U_a = 0,025..0,035$   
Частота сети:  $f$  [Гц]=50.

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов		
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			
$P_{нв}$ , кВт	$n_{нв}$ , об/мин	$U_{нв}$ , В	$I_{нв}$ , А	$M_{нв}$ , Н·м	$GD^2$ , кг·м <sup>2</sup>	$\lambda$	$2p$	$R_{я'}$ , Ом	$2a$	$R_{д'}$ , Ом	$K_j$	$T_{устп}$ , сек		
1	ПБВ112L	1,1	500	50	28	21	0,2	7	4	0,144	2	0,7 $R_a$	2	0,006
2	1ПИ12.07	0,24	1000	36	6,8	2,3	0,024	7	4	1,0	2	0,7 $R_a$	1	0,004
3	21МВН	2,2	1000	81	18	21	0,132	7	4	0,115	2	0,7 $R_a$	2	0,007
4	2ПБВ100М	0,8	1000	47	20	7,5	0,076	7	4	0,22	2	0,7 $R_a$	2	0,005
5	2ПБВ112S	1,6	1000	55	28	15	0,136	7	4	0,11	2	0,7 $R_a$	2	0,006
6	2ПБВ100L	1,2	1000	47	25	11	0,152	7	4	0,14	2	0,7 $R_a$	2	0,006
7	2ПБВ112М	2	1000	69	35	18,5	0,168	7	4	0,123	2	0,7 $R_a$	2	0,008
8	2ПБВ132S	3,89	1000	73	54	37	0,696	7	4	0,057	2	0,7 $R_a$	2	0,007
9	ДК1-1,7	0,27	1500	36	8	1,7	0,018	7	4	0,75	2	0,7 $R_a$	1	0,004
10	ДК1-3,5	0,74	2000	65	7,5	3,5	0,044	7	4	1,15	2	0,7 $R_a$	2	0,006
11	ДК1-2,3	0,36	1500	48	7,5	2,3	0,028	7	4	0,95	2	0,7 $R_a$	1	0,005
12	ДК1-5,2	0,55	1000	110	6,5	5,2	0,032	7	4	2,1	2	0,7 $R_a$	1	0,005
13	ПБВ100М	0,75	1000	52	18	7,16	0,04	7	4	0,222	2	0,7 $R_a$	1	0,006
14	ПБВ100L	1,1	1000	56	24	10,5	0,06	7	4	0,139	2	0,7 $R_a$	2	0,007
15	ПБВ112S	1,1	750	44	31,5	14	0,07	7	4	0,109	2	0,7 $R_a$	2	0,004
16	ПБВ112М	1,1	600	47	29	17,5	0,084	7	4	0,123	2	0,7 $R_a$	2	0,008
17	МИЗ2	0,37	1000	110	4,2	3,61	0,053	4	4	1,46	2	0,75	1	0,005
18	МИ42	1,1	1000	110	12,6	10,7	0,26	4	4	0,435	2	0,32	0,5	0,006

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов		
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей	Сопротивление добавочных полюсов		
$P_{н}, кВт$	$n_{н}, об/мин$	$U_{н}, В$	$I_{н}, А$	$M_{н}, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{д}, Ом$	$K_J$	$T_{уст}, сек$		
19	МИ32	0,45	1500	110	5,0	2,93	0,053	4	4	0,605	2	0,7	1	0,005

Окончание таблицы

Номер варианта	Двигатель												Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря		Обмотки добавочных полюсов		
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей	Сопротивление добавочных полюсов		
$P_{н}, кВт$	$n_{н}, об/мин$	$U_{н}, В$	$I_{н}, А$	$M_{н}, Н·м$	$GD^2, кг·м^2$	$\lambda$	$2p$	$R_{я}, Ом$	$2a$	$R_{д}, Ом$	$K_J$	$T_{уст}, сек$		
20	МИ41	1,1	1500	110	13,0	7,15	0,16	4	4	0,42	2	0,25	0,5	0,004
21	МИ42	1,6	1500	110	18,2	10,4	0,26	4	4	0,133	2	0,19	0,5	0,008
22	МИ31	0,37	2000	110	4,4	1,8	0,036	4	4	0,757	2	0,403	1	0,004

Номер варианта	Двигатель											Кратность момента инерции исполнительного механизма к моменту инерции двигателя	Постоянная времени управляемого силового преобразователя	
	Тип	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховый момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные				
										Обмотки якоря				Обмотки добавочных полюсов
										Сопротивление при 15 °С	Число параллельных ветвей			Сопротивление добавочных полюсов
$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$M_n$ , Н·м	$GD^2$ , кг·м <sup>2</sup>	$\lambda$	$2p$	$R_{я}$ , Ом	$2a$	$R_{дп}$ , Ом	$K_J$	$T_{уст}$ , сек		
23	МИ32	0,76	2500	110	8,2	2,96	0,053	4	4	0,237	2	0,154	1	0,007
24	МИ41	1,6	2500	110	19,2	6,25	0,16	4	4	0,147	2	0,102	1	0,008
25	МИ42	0,32	2500	110	36,3	12,5	0,26	4	4	0,06	2	0,0285	1	0,005
26	МИ31	0,45	3000	110	5,6	1,46	0,036	4	4	0,345	2	0,24	1	0,004
27	ПСТ51	0,18	1000	110	2,4	1,75	0,032	4	2	3,9	2	3,1	0,5	0,004
28	ПСТ52	0,25	1000	110	3,2	2,44	0,04	4	2	2,4	2	1,7	0,5	0,005
29	ПСТ53	0,37	1000	110	4,3	3,6	0,046	4	2	1,47	2	1,12	0,5	0,005
30	ПСТ42	0,18	1500	110	2,3	1,17	0,015	4	2	2,6	2	1,75	0,5	0,004
31	ПСТ51	0,25	1500	110	3,2	1,62	0,032	4	2	2,1	2	1,3	0,5	0,004
32	ПСТ52	0,37	1500	110	4,4	2,4	0,04	4	2	1,25	2	0,76	1	0,005
33	ПСТ53	0,55	1500	110	6,2	3,58	0,046	4	2	0,77	2	0,58	1	0,007
34	ПСТ42	0,25	2200	110	3,1	1,17	0,015	4	2	1,4	2	0,96	0,5	0,005
35	ПСТ51	0,37	2200	110	4,4	1,64	0,035	4	2	1,13	2	0,9	0,5	0,006
36	ПСТ52	0,55	2200	110	6,2	2,44	0,04	4	2	0,66	2	0,48	0,5	0,007
37	ПСТ53	0,75	2200	110	8,2	3,32	0,046	4	2	0,365	2	0,3	0,5	0,008
38	ПСТ31	0,18	3000	110	2,4	0,58	0,010	4	2	2,2	2	1,75	1	0,005
39	ПСТ41	0,25	3000	110	3,2	0,83	0,012	4	2	1,2	2	0,96	1	0,004
40	ПСТ42	0,37	3000	110	4,4	1,2	0,015	4	2	0,77	2	0,55	1	0,005

Силовая схема тиристорного электропривода представлена на рис. 3, содержит силовой трансформатор TV, шесть тиристоров VS1-VS6, два ограничивающих реактора L1, L2 и якорь М двигателя постоянного тока.

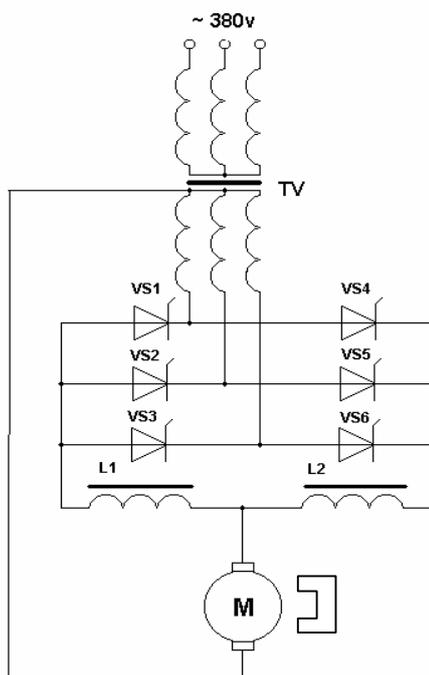


Рис. 3. Силовая схема тиристорного электропривода

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

### 1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ»

#### 1.1. Расчет мощности силового трансформатора TV

Схема «тиристорный преобразователь-двигатель» предусматривает использование трансформатора с соединением обмоток звезда/звезда и первичным напряжением 380 В.

Теоретическое значение ЭДС вторичной обмотки:  $E_2 = K_H \cdot U_H$  [В].

Напряжение вторичной обмотки:  $U_2 = K_U \cdot K_\alpha \cdot K_R \cdot E_2$  [В].

Ток вторичной обмотки:  $I_2 = K_i \cdot K_{T2} \cdot I_H$  [А].

Ток первичной обмотки:  $I_1 = \frac{K_i \cdot K_{T1}}{\left(\frac{220}{U_2}\right)} \cdot I_H$  [А].

Расчетная мощность трансформатора:

$$P_T = K_M \cdot K_U \cdot K_\alpha \cdot K_i \cdot U_H \cdot I_H \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]}.$$

По мощности  $P_T$  выбирается типовой трансформатор из серии ТТ.

#### 1.2. Выбор силовых тиристоров VS

Среднее значение тока вентиль:  $I_{BH} = K_{TB} \cdot I_H$  [А].

Максимальная величина обратного напряжения:

$$U_{OB\_MAX} = K_{HB} \cdot K_U \cdot K_\alpha \cdot K_R \cdot U_H \text{ [В]}.$$

Тип тиристора выбирается по среднему значению тока вентиль и максимальной величине обратного напряжения, прикладываемого к вентиллю [5].

#### 1.3. Определение индуктивности и активного сопротивления якорной цепи

Индуктивность обмотки якоря (определяется по приближенной формуле):  $L_{я} = \frac{K_L \cdot U_H}{2 \cdot \rho \cdot n_H \cdot I_H}$  [Гн].

Индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока:  $X_T = U_L \frac{U_2}{I_2}$  [Ом].

Индуктивность трансформатора, приведенная к контуру двигателя:

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} \text{ [Гн]}.$$

Индуктивность одного реактора при двух ограничивающих реакторах с ограничением уравнительного тока до 30% от номинального:

$$L_Y = 1,4 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H} \text{ [Гн]},$$

тогда индуктивность якорной цепи будет:  $L_{яц} = L_Y + L_T + L_Y$  [Гн].

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока:  $R_T = \frac{U_2}{I_2} \cdot U_a$  [Ом].

Сопротивление, вносимое за счет перекрытия анодных токов:

$$R_{\Pi} = \frac{3 \cdot X_T}{2 \cdot \pi} \text{ [Ом]}.$$

Сопротивление щеточного контакта:  $R_{щ} = \frac{2}{I_H}$  [Ом].

Сопротивление реактора:  $R_Y = 2 \cdot L_Y$  [Ом],

тогда суммарное сопротивление цепи якоря:

$$R_{яц} = 1,2 \cdot R_{яд} + R_T + R_{\Pi} + R_{щ} + R_Y \text{ [Ом]},$$

где  $R_{яд} = R_Y + R_d$  [Ом].

Суммарное эквивалентное сопротивление якорной цепи:

$$R_{\Sigma} = 1,2 \cdot R_{яд} + X_T + R_{\Pi} + R_{щ} + R_Y \text{ [Ом]}.$$

#### 1.4. Определение статических и динамических параметров силового преобразователя и двигателя

Электромагнитная постоянная времени двигателя:  $T_Y = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$  [с].

Суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J = J_d + J_M \text{ [кг} \cdot \text{м}^2 \text{]},$$

где  $J_d = \frac{GD^2}{4}$  [кг · м<sup>2</sup>] – момент инерции двигателя;

$J_M = K_J \cdot J_d$  [кг · м<sup>2</sup>] – момент инерции исполнительного механизма, приведенный к валу двигателя.

Электромеханическая постоянная времени двигателя:

$$T_M = \frac{J \cdot R_{\Sigma}}{(C_d \Phi)^2} \text{ [с]},$$

где  $C_d \Phi = \frac{U_H - I_H \cdot 1,2 \cdot R_{яд}}{\omega_H}$  [Вс/рад], где  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$  [рад/с].

Коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию:

$$K_{дв} = \frac{1}{C_d \Phi} \text{ [рад/Вс]}.$$

Коэффициент передачи управляемого силового преобразователя, тиристорного преобразователя:

$$K_{всп} = \frac{U_H}{U_{PT\_MAX}} = \frac{U_H}{10},$$

где  $U_{PT\_MAX}$  – максимальное напряжение на выходе регулятора тока.

Коэффициент передачи тахогенератора-датчика скорости:

$$K_{BR} = K_{ДС} = \frac{U_{BR}}{\omega_{BR}} = \frac{20}{105} \text{ [Вс]}.$$

Коэффициент передачи двигателя по возмущающему воздействию:

$$K_{дв} = \frac{R_{яц}}{(C_d \Phi)^2} \text{ [рад/сНм]}.$$

## 2. РАСЧЕТ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА ТОКА ПО УСЛОВИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОПТИМУМА

Структурная схема контура тока представлена на рис. 4.

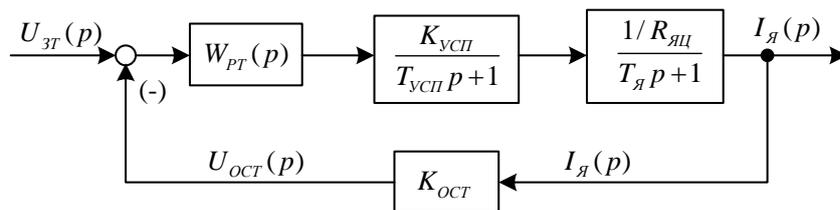


Рис. 4. Структурная схема контура тока

Настроим контур тока на технический оптимум. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура будет иметь вид:

$$W_{рж}^{ТО}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{усп} \cdot p \cdot (T_{усп} \cdot p + 1)},$$

где  $T_{усп} = T_{\mu t}$ , так как принимаем  $T_{усп}$  за малую постоянную времени токового контура, а  $T_{я}$  – за большую постоянную времени.

В качестве датчика обратной связи по току используем сопротивление добавочных полюсов:

$K_{дт} = R_{д}$  [Ом] – коэффициент передачи датчика тока.

Из структурной схемы следует, что передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_p(p) = W_{рт}(p) \cdot \frac{K_{усп}}{(T_{усп} \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{\frac{R_{яц}}{T_{я} \cdot p + 1}} \cdot K_{ост}.$$

Приравняем правые части выражений  $W_{рж}^{ТО}(p)$  и  $W_p(p)$  и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора тока  $W_{рт}(p)$ :

$$W_{рт}(p) = \frac{T_{я} \cdot p + 1}{\frac{2 \cdot T_{усп} \cdot K_{усп} \cdot K_{ост} \cdot p}{R_{яц}}}.$$

Из этого выражения следует, что регулятор тока должен быть реализован схемой ПИ-регулятора, приведенной на рис. 5.

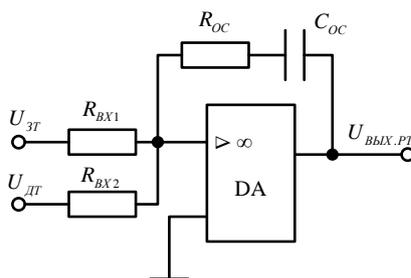


Рис. 5. Принципиальная схема регулятора тока

В схеме регулятора тока используются два входа операционного усилителя с входными сопротивлениями  $R_{вх1}$  и  $R_{вх2}$ , предназначенные, соответственно, для подачи задающего сигнала  $U_{зт}$  и сигнала обратной связи по току  $U_{дт}$ . В структурной схеме на рис. 2 эти воздействия суммируются непосредственно, в связи с чем необходимо выполнить эквивалентное приведение сигналов к одному входу. При подаче напряжения обратной связи по току на второй вход соответствующая составляющая напряжения на выходе операционного усилителя

$$U_{вых.рт}(p) = U_{дт}(p) \cdot \frac{Z_{ос}(p)}{R_{вх2}}.$$

Так как

$$U_{\text{ВЫХ.РТ}}(p) = U_{\text{ДТ}}(p) \cdot \frac{Z_{\text{ОС}}(p)}{R_{\text{ВХ1}}} \cdot \frac{R_{\text{ВХ1}}}{R_{\text{ВХ2}}},$$

поэтому такой же сигнал  $U_{\text{ВЫХ.РТ}}(p)$  создается при подаче на первый вход воздействия

$$U_{\text{ДТ}}(p) \cdot \frac{R_{\text{ВХ1}}}{R_{\text{ВХ2}}}.$$

Отсюда следует, что для приведения к первому входу достаточно увеличить сигнал обратной связи  $U_{\text{ДТ}}$  в  $R_{\text{ВХ1}}/R_{\text{ВХ2}}$  раз, принимая вместо  $U_{\text{ДТ}}$ , величину  $U_{\text{ОСТ}}$ , т.е.  $U_{\text{ОСТ}} = U_{\text{ДТ}} \cdot \frac{R_{\text{ВХ1}}}{R_{\text{ВХ2}}}$ .

Зная, что  $U_{\text{ОСТ.МАХ}} = U_{\text{ЗТ.МАХ}}$ , а максимально допустимый ток якоря равен  $I_{\text{Я.МАХ}} = I_{\text{Н}} \cdot \lambda$ , получим

$$K_{\text{ОСТ}} = \frac{U_{\text{ОСТ.МАХ}}}{I_{\text{Я.МАХ}}} = \frac{10}{\lambda \cdot I_{\text{Н}}} \text{ [Ом]},$$

причем  $K_{\text{ОСТ}} = K_{\text{ДТ}} \cdot \frac{R_{\text{ВХ1}}}{R_{\text{ВХ2}}}$ , так как  $U_{\text{ОСТ}} = U_{\text{ДТ}} \cdot \frac{R_{\text{ВХ1}}}{R_{\text{ВХ2}}}$ .

Передаточная функция ПИ-регулятора на базе операционного усилителя с RC-цепью обратной связи относительно сигнала на первом входе примет вид:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{R_{\text{ОС}} \cdot C_{\text{ОС}} \cdot p + 1}{R_{\text{ВХ1}} \cdot C_{\text{ОС}} \cdot p}.$$

Приравнивая теперь соответствующие коэффициенты при  $p$  в выражениях  $W_{\text{РТ}}(p)$  и  $W_{\text{ПИ}}(p)$ , получим систему выражений:

$$\begin{cases} R_{\text{ОС}} \cdot C_{\text{ОС}} = T_{\text{Я}} \\ R_{\text{ВХ1}} \cdot C_{\text{ОС}} = \frac{2 \cdot T_{\text{УСП}} \cdot K_{\text{УСП}} \cdot K_{\text{ОСТ}}}{R_{\text{ЯЦ}}} \end{cases}$$

Добавляя выражение

$$\frac{K_{\text{ОСТ}}}{K_{\text{ДТ}}} = \frac{R_{\text{ВХ1}}}{R_{\text{ВХ2}}},$$

можно рассчитать параметры  $R$  и  $C$  регулятора тока, задавшись, например, емкостью  $C_{\text{ОС}} = 1..2$  мкФ (выбирается студентом произвольно из заданного диапазона), по следующим выражениям:

$$R_{\text{ОС}} = \frac{T_{\text{Я}}}{C_{\text{ОС}}} \text{ [Ом]},$$

$$R_{\text{ВХ1}} = \frac{2 \cdot K_{\text{УСП}} \cdot K_{\text{ОСТ}} \cdot T_{\text{УСП}}}{R_{\text{ЯЦ}} \cdot C_{\text{ОС}}} \text{ [Ом]},$$

$$R_{\text{ВХ2}} = R_{\text{ВХ1}} \cdot \frac{K_{\text{ДТ}}}{K_{\text{ОСТ}}} \text{ [Ом]}.$$

### 3. РАСЧЕТ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ПО УСЛОВИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОПТИМУМА

Структурная схема контура скорости представлена на рис. 6.

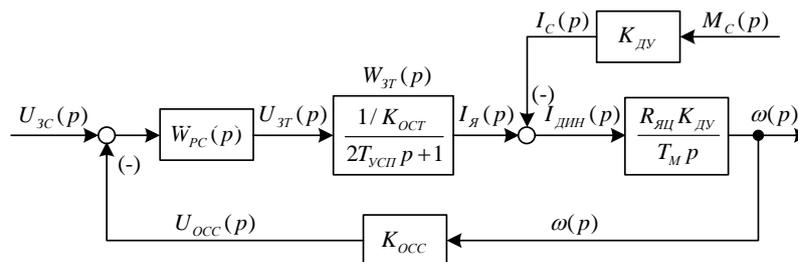


Рис. 6. Структурная схема контура скорости

Настроим контур скорости на технический оптимум (ТО). Так как  $T_M > 2T_{УСП}$ , то примем  $2T_{УСП}$  за малую постоянную времени контура скорости  $T_{\mu c}$ , а электромеханическую постоянную времени  $T_M$  – за большую постоянную времени контура скорости.

Известно, что желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет следующий вид:

$$W_{РЖ}^{TO}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{УСП} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{УСП} \cdot p + 1)}.$$

Из структурной схемы скоростного контура (см. рис. 4) следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_p(p) = W_{PC}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCT} \cdot (2T_{УСП} \cdot p + 1)} \cdot \frac{R_{ЯЦ} \cdot K_{ДВ}}{T_M \cdot p} K_{OCC}.$$

Приравняем правые части выражений  $W_{PC}^{TO}(p)$  и  $W_p(p)$  и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора скорости  $W_{PC}^{TO}(p)$ :

$$W_{PC}^{TO}(p) = \frac{K_{OCT} \cdot T_M}{4 \cdot T_{УСП} \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДВ} \cdot K_{OCC}}.$$

Из этого выражения видно, что регулятор скорости представляет собой П-регулятор, то есть

$$W_{PC}^{TO}(p) = K_{PC}.$$

Принципиальная схема регулятора скорости представлена на рис. 7.

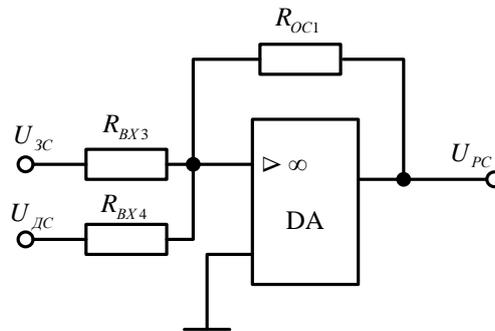


Рис. 7. Принципиальная схема регулятора скорости при настройке на ТО

Рассчитаем параметры схемы, допуская, что  $U_{3C\_MAX} = U_{OCC\_MAX} = 10$  В. Рассуждая аналогично тому, как при расчете в контуре тока сигнал обратной связи по скорости, приведенный к первому входу регулятора скорости равен:

$$U_{OCC} = K_{BR} \cdot \frac{R_{BX3}}{R_{BX4}} \cdot \omega.$$

Задаваясь  $R_{BX3} = 5..10$  кОм (выбирается студентом произвольно из заданного диапазона), получим

$$R_{BX4} = \frac{K_{DC} \cdot R_{BX3}}{K_{OCC}} \text{ [Ом]},$$

так как  $K_{DC} = K_{BR}$ , то  $K_{OCC} = K_{DC} \cdot \frac{R_{BX3}}{R_{BX4}}$ ,

где  $K_{OCC} = \frac{U_{OCC\_MAX}}{\omega_H} = \frac{10}{\omega_H}$ , а  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$  [рад/Вс].

Известно, что  $R_{OС1} = K_{PC} \cdot R_{BX3}$ , поэтому можно определить

$$R_{OС1} = \frac{K_{OCT} \cdot T_M}{4T_{УСП} \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДВ} \cdot K_{OCC}} \cdot R_{BX3} \text{ [Ом]}.$$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА СКОРОСТИ, НАСТРОЕННОГО НА ТЕХНИЧЕСКИЙ ОПТИМУМ

Падение скорости  $\Delta\omega_3$ , вызванное действием нагрузки  $M_c = M_H$ :

$$\Delta\omega_3 = \frac{4T_{ycп}}{T_M} \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2 \cdot M_H.$$

Соответствующая относительная ошибка  $\varepsilon_1$  на нижнем пределе диапазона регулирования скорости:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta\omega_3 \cdot D}{\omega_H} \times 100\%.$$

Если  $\varepsilon_1 > \varepsilon_{доп}$ , то такая настройка контура скорости не обеспечивает требуемых статических свойств, предъявляемых к электроприводу, и необходимо выполнить расчет по п. 5.

## 5. РАСЧЕТ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ПО УСЛОВИЯМ СИММЕТРИЧНОГО ОПТИМУМА

При настройке на симметричный оптимум (СО) желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{рж}^{CO}(p) &= \frac{4 \cdot 2T_{ycп} \cdot p + 1}{4 \cdot 2T_{ycп} \cdot p} \times \frac{1}{2 \cdot 2T_{ycп} \cdot p \cdot (2T_{ycп} \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{8T_{ycп} \cdot p + 1}{32T_{ycп}^2 \cdot p^2 \cdot (2T_{ycп} \cdot p + 1)} \end{aligned}$$

Из структурной схемы скоростного контура (см. рис. 4) следует, что передаточная функция разомкнутого скоростного контура:

$$W_p(p) = W_{pc}^{CO}(p) \cdot \frac{1}{K_{ост} \cdot (2T_{ycп} \cdot p + 1)} \cdot \frac{R_{яц} \cdot K_{дв} \cdot K_{occ}}{T_M \cdot p}.$$

Приравнявая правые части этих выражений  $W_{рж}^{CO}(p)$  и  $W_p(p)$ , из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{pc}^{CO}(p) = \left[ \frac{8T_{ycп} \cdot p + 1}{\frac{32T_{ycп}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв} \cdot K_{occ}}{K_{ост} \cdot T_M}} \right] \cdot p.$$

Из этого выражения следует, что регулятор скорости представляет собой ПИ-регулятор.

Принципиальная схема ПИ-регулятора представлена на рис. 8, а его передаточная функция:

$$W_{пи}(p) = \frac{R_{oc1} \cdot C_{oc1} \cdot p + 1}{R_{bx3} \cdot C_{oc1} \cdot p}.$$

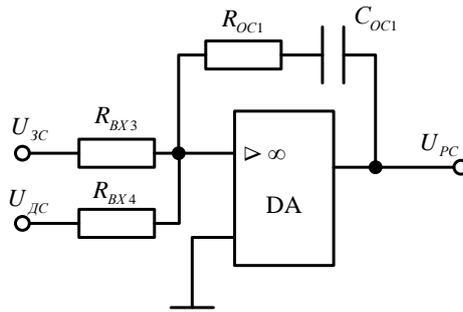


Рис. 8. Принципиальная схема регулятора скорости при настройке на СО

Приравнявая коэффициенты при  $p$  в последних двух выражениях  $W_{pc}^{CO}(p)$  и  $W_{пи}(p)$ , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} R_{oc1} \cdot C_{oc1} = 8T_{ycп} \\ R_{bx3} \cdot C_{oc1} = \frac{32T_{ycп}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв} \cdot K_{occ}}{K_{ост} \cdot T_M} \end{cases}$$

Задаваясь той же величиной сопротивления ( $R_{bx3}$ ), что и в варианте настройки на технический оптимум, рассчитаем сопротивление  $R_{bx4}$  по выражению:

$$R_{bx4} = \frac{K_{дс} \cdot R_{bx3}}{K_{occ}} [\text{Ом}],$$

а затем, используя вышеприведенную систему двух уравнений, рассчитаем последовательно сначала емкость  $C_{OC1}$ , а потом сопротивление  $R_{OC1}$ :

$$C_{OC1} = \frac{32T_{УСП}^2 \cdot R_{ЯЦ} \cdot K_{ДУ} \cdot K_{OCC}}{K_{OCT} \cdot T_M \cdot R_{ВХЗ}} [\Phi],$$

$$R_{OC1} = \frac{8 \cdot T_{УСП}}{C_{OC1}} [\text{Ом}].$$

## 6. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО УПРАВЛЯЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЛЯ КОНТУРА СКОРОСТИ, НАСТРОЕННОГО НА СИММЕТРИЧНЫЙ ОПТИМУМ

Структурная схема контура скорости имеет вид, представленный на рис. 9.

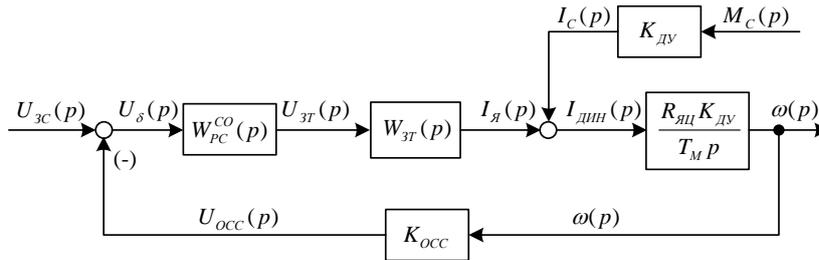


Рис. 9. Структурная схема контура скорости

По этой схеме можно определить передаточную функцию замкнутого контура скорости по управляющему воздействию  $U_{3C}$ :

$$W_{3C}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{3C}(p)} = \frac{\frac{W_{РЖ}^{CO}(p)}{K_{OCC}}}{1 + \frac{W_{РЖ}^{CO}(p)}{K_{OCC}}} = \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{8T_{\mu c}^3 \cdot p^3 + 8T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 4T_{\mu c} \cdot p + 1},$$

так как  $W_{РЖ}^{CO}(p) = \frac{4T_{\mu c} \cdot p + 1}{8T_{\mu c}^2 \cdot p^2 (T_{\mu c} \cdot p + 1)}$ ,

где  $T_{\mu c} = 2T_{УСП}$ ,

или

$$W_{3C}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{3C}(p)} = \frac{4T_{\mu c} \cdot p + 1}{K_{OCC} \cdot (4T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu c} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu c} \cdot p + 1)}.$$

Тогда выражение для скорости будет иметь вид:

$$\omega(p) = W_{3C}(p) \cdot U_{3C}(p) = \frac{4T_{\mu c} \cdot p + 1}{K_{OCC} \cdot (4T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu c} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu c} \cdot p + 1)} \cdot \frac{1}{p},$$

где  $U_{3C}(p) = \frac{1}{p}$ .

Расчет отклика  $\omega(t)$  на единичный скачок задающего воздействия  $U_{3C}$  производится по параметрам изображения  $\omega(p)$  на компьютере по методике, изложенной в §1.2 и 2.4 [8].

## 7. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЛЯ КОНТУРА СКОРОСТИ, НАСТРОЕННОГО НА СИММЕТРИЧНЫЙ ОПТИМУМ

Структурная схема контура скорости имеет вид, представленный на рис. 10.

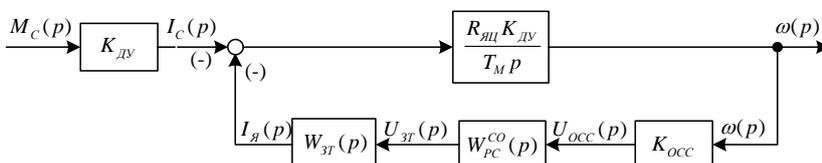


Рис. 10. Структурная схема контура скорости по возмущающему воздействию

По этой схеме можно определить передаточную функцию замкнутого контура скорости по возмущающему воздействию  $M_C$ :

$$W_B(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(p)} = -\frac{R_{яц} \cdot K_{дв}^2}{T_M \cdot p} \cdot \frac{1}{1 + W_{РЖ}^{CO}(p)} =$$

$$= -\frac{8T_{\mu c}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2}{T_M} \cdot p \cdot \frac{T_{\mu c} \cdot p + 1}{8T_{\mu c}^3 \cdot p^3 + 8T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 4T_{\mu c} \cdot p + 1},$$

или

$$W_B(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(p)} = -\frac{8T_{\mu c}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2}{T_M} \cdot p \cdot \frac{T_{\mu c} \cdot p + 1}{(4T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu c} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu c} \cdot p + 1)}.$$

Тогда выражение для скорости будет иметь вид:

$$\omega(p) = W_B(p) \cdot M_C(p) = -\frac{8T_{\mu c}^2 \cdot R_{яц} \cdot K_{дв}^2 \cdot M_H}{T_M} \cdot \frac{T_{\mu c} \cdot p + 1}{(4T_{\mu c}^2 \cdot p^2 + 2T_{\mu c} \cdot p + 1) \cdot (2T_{\mu c} \cdot p + 1)},$$

где  $M_C(p) = \frac{M_H}{p}$ .

Расчет отклика  $\omega(t)$  на скачок возмущающего воздействия  $M_C$  производится по параметрам изображения  $\omega(p)$  на компьютере по методике, изложенной в §1.2 и 2.5 [8].

## 8. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УПРОЩЕННОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 11 в качестве примера приведена упрощенная принципиальная схема двухконтурной системы регулирования скорости реверсивного тиристорного электропривода с регулированием тока якоря. Силовые цепи показаны в схеме условно, в однолинейном исполнении. Системы импульсно-фазового управления (СИФУ-В и СИФУ-Н) осуществляют согласованное регулирование напряжения обеих групп преобразователей (условно ТВ и ТН), получая общий управляющий сигнал от ПИ-регулятора тока РТ. Сигнал обратной связи по току якоря снимается с выхода датчика тока ДТ и подается на входное сопротивление  $r_{\text{вх}2}$  РТ. Назначением ДТ, включенного на шунт  $r_{\text{ш}}$ , является преобразование тока якоря в пропорциональное ему напряжение, соответствующее уровню стандартного напряжения элементов системы управления, а также гальваническая развязка якорной цепи двигателя и цепей управления. Сигнал задания с выхода ПИ-регулятора скорости РС подается на другой вход РТ с сопротивлением  $r_{\text{вх}1}$ . Напряжение обратной связи по скорости с якоря тахогенератора ТГ поступает на вход РС с сопротивлением  $r_{\text{вх}4}$ , а напряжение задания скорости – с выхода задатчика интенсивности ЗИ или непосредственно на входное сопротивление  $r_{\text{вх}3}$ . Ограничение максимального тока якоря осуществляется с помощью блока ОУТ [1]. При выборе ПИ-регулятора скорости на его входе, как правило, используется входной фильтр.

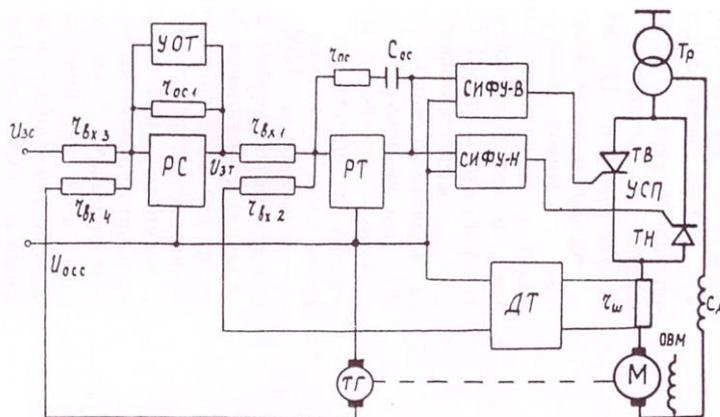


Рис. 11. Упрощенная принципиальная схема двухконтурной СПР.

## **Задание 1**

Расчет основных параметров схемы «тиристорный преобразователь-двигатель».

Расчет и выбор силового трансформатора.

Расчет и выбор управляемых клапанов.

Расчет индуктивности и активного сопротивления якорной цепи.

Определение статических и динамических характеристик силового преобразователя и двигателя.

## **Задание 2**

Расчет и реализация регулятора тока по условиям технического оптимума.

Расчет и реализация регулятора скорости по условиям технического оптимума.

## **Задание 3**

Определение статических свойств контура скорости, настроенного на технический оптимум.

Расчет и реализация регулятора скорости по условиям симметричного оптимума.

## **Задание 4**

Построение графика переходной характеристики по управляющему воздействию для контура скорости, настроенного на симметричный оптимум.

Построение графика переходной характеристики по возмущающему воздействию для контура скорости, настроенного на симметричный оптимум.

Описание работы упрощенной принципиальной схемы системы автоматического управления электропривода постоянного тока.

### Сведения о контрольных точках

№ контр. точки	Наименование оценочного средства	Вес оценочного средства	Критерии оценки	Дата сдачи контрольной точки
1	Контрольное задание № 1 на самостоятельную работу студентов	25%	Полнота и точность решения; качество оформления отчетов; своевременность представления отчетов.	На практическом занятии № 2
2	Контрольное задание № 2 на самостоятельную работу студентов	25%		На практическом занятии № 3
3	Контрольное задание № 3 на самостоятельную работу студентов	25%		На практическом занятии № 4
4	Контрольное задание № 4 на самостоятельную работу студентов	25%		На практическом занятии № 5

### 3. Перечень вопросов к экзамену.

1. Динамические свойства, структурная схема и передаточная функция двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
2. Условия технического (модульного) оптимума переходных процессов в СПР.
3. Расчет и реализация регулятора тока по условиям ТО.
4. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям ТО.
5. Статические свойства контура скорости, настроенного на ТО.
6. Обоснование настройки контура скорости на СО. Построение графика ЛАХ  $L^{CO} рж$ .
7. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям СО.
8. Расчет и реализация регулятора скорости по условиям нетипового СО.
9. Определение передаточной функции контура скорости по условиям СО по управляющему воздействию и обоснование необходимости фильтра на входе скоростного контура. График переходного процесса по управляющему воздействию.
10. Определение передаточной функции контура скорости по условиям СО по возмущающему воздействию и график переходного процесса по возмущающему воздействию.
11. Простейшая потенциометрическая следящая система и ее структурная схема в статике.
12. Статический расчет астатической следящей системы.
13. Принцип инвариантности в следящей системе. Условие абсолютной инвариантности в линейной следящей системе и пример ее реализации.
14. Позиционная следящая система. Эквивалентная структурная схема трехконтурной СПР. Выбор регулятора положения при отработке малых перемещений в позиционной следящей системе.
15. Выбор нелинейного регулятора положения при отработке больших перемещений в позиционной следящей системе.
16. Диаграммы момента и мощности при однозонном и двухзонном регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
17. Контур регулирования ЭДС. Определение передаточной функции регулятора ЭДС в системе двухзонного регулирования скорости электропривода постоянного тока .
18. Контур регулирования тока возбуждения. Определение передаточной функции регулятора тока возбуждения в системе двухзонного регулирования скорости электропривода постоянного тока .
19. Конструкция и принцип работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
20. Основные уравнения по Г-образной схеме замещения асинхронного двигателя.
21. Определение критического скольжения и момента ( $s_{к}; M_{к}$ ) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
22. Определение формулы Клосса асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
23. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по формуле Клосса. Жесткость механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
24. Структурная схема и передаточная функция асинхронного двигателя при частотном регулировании.

## **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ В 8 СЕМЕСТРЕ**

Расчет контурной системы программного управления следящего электропривода подачи одной координаты. Исходные данные для расчета берутся из табл. 1 по заданному номеру варианта.

В контрольных заданиях должны быть решены следующие вопросы:

1. Синтез контура положения без схемы компенсации скоростной ошибки.
2. Определение параметров эквивалентной схемы комбинированного управления.
3. Определение передаточной функции регулятора положения и его реализация на операционном усилителе.
4. Расчет контурной ошибки при воспроизведении окружности.

## Методические указания 1. Описание работы схемы

Блочно-функциональная схема, воспроизводящая части системы ЧПУ представлена на рис.1.

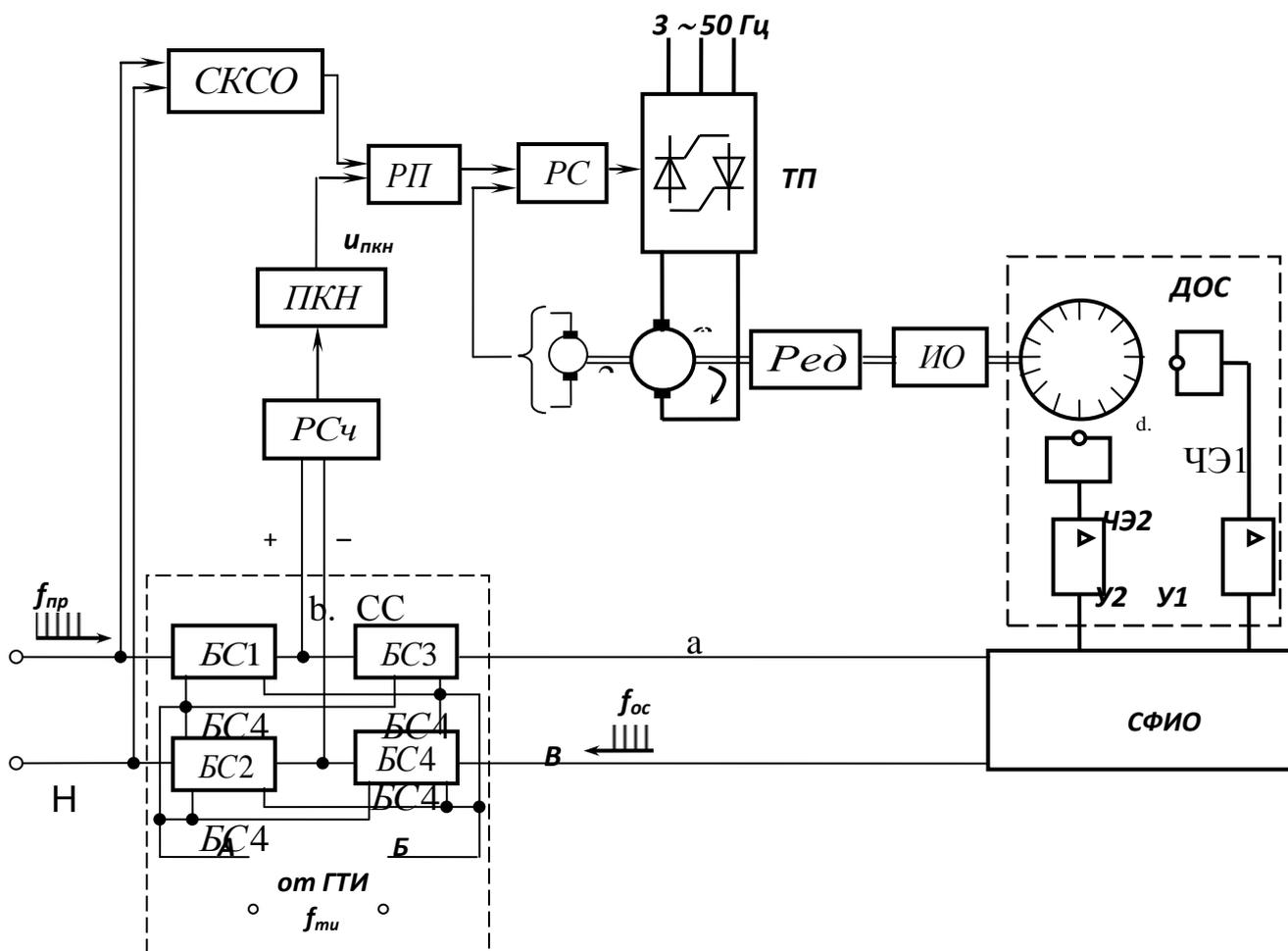


Рис. 1.

Программная автоматическая система управления электроприводом (АСУ ЭП) одной координаты с импульсным датчиком положения, для случая контурной обработки изделия, содержит внутренний аналоговый контур регулирования скорости с регулятором  $РС$  и внешний цифровой контур регулирования положения. Сигнал ошибки по положению после преобразования его преобразователем «код - напряжение» (ПКН) в аналоговое напряжение  $u_{ПКН}$

воздействует на вход регулятора положения (**РП**).

Ошибка фиксируется реверсивным счетчиком (**РСч**) как разность числа программных импульсов, поступающих от интерполятора, и импульсов отработки с датчика обратной связи (**ДОС**) и схемы формирования импульсов отработки (**СФИО**). Интервалы между импульсами определяются характером задания и отработки его электроприводом. Поэтому вполне реален случай, когда импульсы задания и отработки совпадают по времени. Для того чтобы исключить возможность неправильной работы РСч в результате одновременного поступления импульсов на оба его входа, предусмотрена схема синхронизации (**СС**). Она обеспечивает наличие обязательного временного интервала между импульсами, поступающими на входы сложения (+) и вычитания (–) счётчика. Этот интервал составляет не менее половины периода тактовых импульсов, поступающих на СС от генератора тактовых импульсов (**ГТИ**). Тактовые импульсы поступают на входы блоков синхронизации (**БС1-БС4**) в виде двух последовательностей А и Б частоты  $f_{mi}$ , сдвинутых относительно друг друга на половину периода. Программные импульсы синхронизируются импульсами последовательности А при движении «Вперёд» блоком БС1, а «Назад» - блоком БС2. Импульсы отработки синхронизируются в БС3 или БС4 импульсами последовательности Б.

Логическая часть схемы построена на триггерах с отдельными входами (RS-триггеры). При отсутствии входных импульсов нулевые состояния триггеров подтверждаются тактовыми импульсами соответственно А и Б.

Преобразователь «код - напряжение» (**ПКН**) преобразует ошибку, вычисляемую РСч, в дискретном виде в управляющее напряжение переменного тока  $u_{ПКН}$ .

Схема компенсации скоростной ошибки (**СКСО**) формирует аналоговый сигнал, пропорциональный частоте входных импульсов, и представляет собой дискретно – аналоговый преобразователь типа «частота-напряжение». Задаваемая скорость по координате пропорциональна частоте входных импульсов. Таким образом для электропривода СКСО выполняет роль формирователя сигнала, пропорционального входной скорости, т.е. производной от основной входной величины – перемещения. Система электропривода при этом становится комбинированной, содержащей, кроме основного замкнутого контура по пути, еще канал управления по входной скорости.

## 2. Синтез контура положения

Упрощённая структурная схема следящего электропривода по одной координате представлена на рис.2.

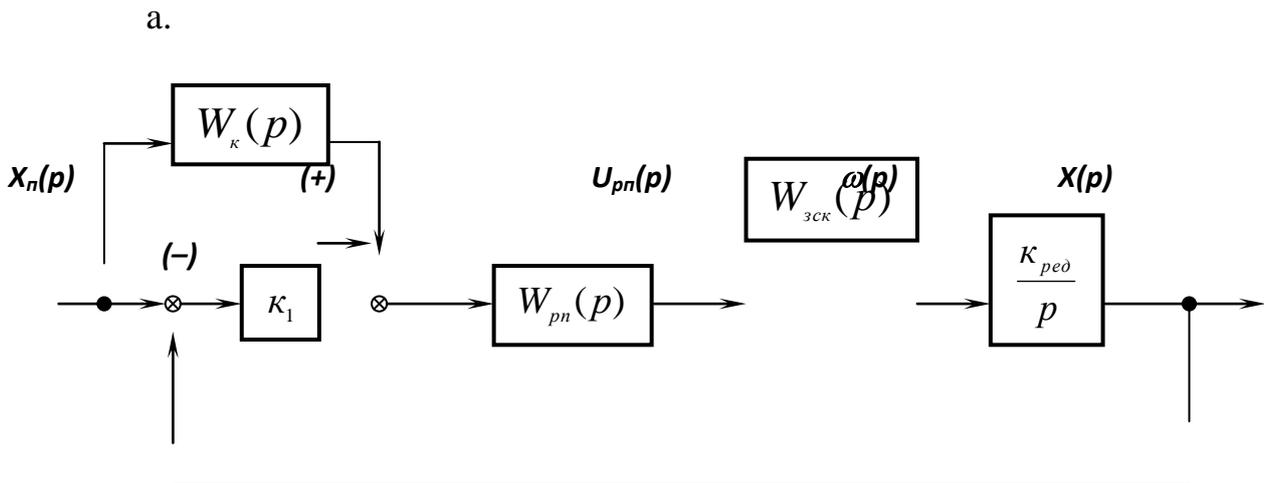


Рис. 2.

В случае синтеза по методу подчиненного регулирования контур положения настраивается обычно на оптимум по модулю. При частотном синтезе широкое распространение получил синтез по заданной точности воспроизведения входного воздействия при типовых режимах следящего электропривода. Одним из таких типовых режимов является воспроизведение входного гармонического воздействия. Применительно к контурным системам программного управления, следящий электропривод одной координаты работает в режиме воспроизведения гармонического воздействия в случае движения рабочего органа по окружности с постоянной результирующей (тангенциальной) скоростью.

Если входное воздействие по координате равно

$$x_n = x_m \sin \omega_k t,$$

то ошибка по координате в квазиустановившемся режиме линейной системы будет равна

$$\delta(t) = \delta_m \sin(\omega_\kappa t - \varphi_\delta),$$

где  $x_m$  – амплитуда входного воздействия, численно равная радиусу воспроизводимой окружности  $x_m = R$ ;  $\delta_m$  – амплитуда ошибки по координате;  $\omega_\kappa$  – круговая частота обхода окружности;  $\varphi_\delta$  – разность фаз по ошибке (фазовая ошибка).

Амплитуда ошибки равна:

$$\delta_m = |\Phi_\delta(j\omega_\kappa)|x_m = \frac{x_m}{|1 + W(j\omega_\kappa)|},$$

где  $W(j\omega_\kappa)$  – частотная передаточная функция разомкнутой системы;  $\Phi_\delta(j\omega_\kappa)$  – частотная передаточная функция по ошибке замкнутой системы.

Так как обычно амплитуда ошибки значительно меньше амплитуды входного сигнала, т.е.  $\delta_m \ll x_m$ , то справедливо  $|W(j\omega_\kappa)| \gg 1$ . Поэтому можно использовать приближенное выражение

$$\delta_m \cong \frac{x_m}{|W(j\omega_\kappa)|} \quad (1).$$

Выражение (1) используется для синтеза низкочастотной части ЛАХ контура положения.

На первом этапе синтез контура положения выполняется без учета СКСО на том основании, что она не влияет на устойчивость следящего контура, т.е. если следящий электропривод спроектирован устойчивым без СКСО, то он будет устойчив и при подключении схемы компенсации. Но известно, что СКСО увеличивает эквивалентную добротность контура положения по скорости и уменьшает скоростную ошибку. Это обстоятельство на первом этапе синтеза учитывается завышенным значением допустимой координатной ошибки, используемой при выборе низкочастотной части желаемой ЛАХ.

## 2.1. Синтез контура положения без схемы компенсации скоростной ошибки.

Синтез желаемой ЛАХ контура положения без учета схемы компенсации скоростной ошибки выполняется в следующем порядке:

2.1.1. Определяются координаты контрольной точки  $A_k$  (рис.3) и строится запретная зона, ниже которой не может проходить желаемая ЛАХ. Частота контрольной точки выбирается из условия обхода окружности заданного радиуса  $R$  с результирующей тангенциальной скоростью, равной максимальной рабочей скорости подачи  $V_{Pmax}$

$$\omega_k = \frac{V_{Pmax}}{R}; \quad T_1 = \frac{1}{\omega_k}$$

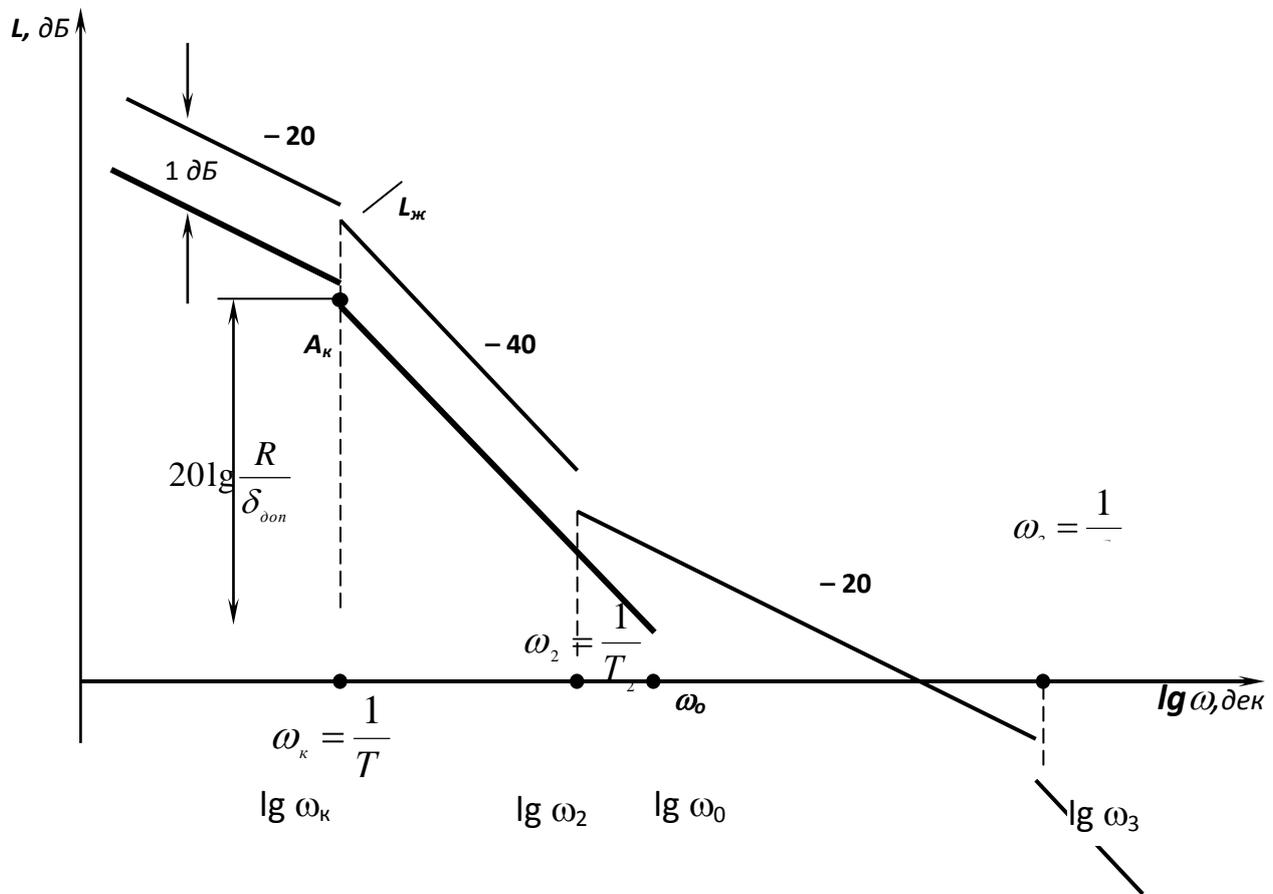


Рис. 3

Ордината точки  $A_k$  находится на основании выражения (1) для амплитуды ошибки при замене ее на допустимую ошибку, т.е. при замене требуемого неравенства  $\delta_m < \delta_{дон}$  предельным равенством

$$|W(j\omega_k)| = \frac{x_m}{\delta_{\text{дон}}} = \frac{R}{\delta_{\text{дон}}};$$

следовательно в плоскости ЛАХ ордината  $A_k$  будет равна

$$20\lg|W(j\omega_k)| = 20\lg\frac{x_m}{\delta_{\text{дон}}} = 20\lg\frac{R}{\delta_{\text{дон}}}.$$

Допустимая ошибка окончательно спроектированного следящего электропривода координаты не должна превышать удвоенной цены импульса. Для синтеза на первом этапе принимается завышенное значение условно допустимой ошибки:

$$\delta_{\text{дон}} = (2 \div 4) \frac{h}{\gamma},$$

где  $\gamma$  – заданная степень компенсации скоростной ошибки.

Запретная зона частотной области определяется двумя прямыми: прямой, проведенной влево от контрольной точки  $A_k(\omega_k; 20\lg\frac{R}{\delta_{\text{дон}}})$  под наклоном  $-20\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$  и прямой, проведенной вправо от этой точки до оси абсцисс под наклоном  $-40\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$  (рис. 3). Точка пересечения этой прямой с осью определяет значение граничной частоты  $\omega_o$ . Желаемая ЛАХ в низкочастотной области должна проходить на  $1\text{дБ}$  выше запретной зоны.

2.1.2. Синтез среднечастотной части желаемой ЛАХ.

Выбираем показатель колебательности  $M = 1,2$ , а по нему постоянные времени, соответствующие сопрягающим частотам:

$$T_2 = \frac{1}{\omega_o} \sqrt{\frac{M}{M-1}}; \quad T_3 = \frac{\sqrt{M(M-1)}}{\omega_o(M+1)}.$$

В диапазоне частот от  $\omega_2 = \frac{1}{T_2}$  до  $\omega_3 = \frac{1}{T_3}$  желаемая ЛАХ среднечастотной части проводится под наклоном

$-20\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ . Слева эта прямая может быть ограничена сопряжением с характеристикой низкочастотной области, проходящей над запретной зоной с наклоном  $-40\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ . В этом случае частота среза получается графически и требуется проверка по запасу устойчивости по амплитуде, который должен находиться примерно в пределах  $(9 \div 15)\text{дБ}$  на частоте  $\omega_2$  и в пределах  $(-4 \div -10)\text{дБ}$  на частоте  $\omega_3$ .

2.1.3. В высокочастотной области при  $\omega > \omega_3$  желаемая ЛАХ проводится под наклоном  $-40\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ .

2.1.4. Строится ЛАХ нескорректированной разомкнутой системы по контуру положения на основании структурной схемы на рис. 2, которая имеет вид:

$$W_{\text{нс}}(p) = \kappa_l W_{\text{зс}}(p) \frac{\kappa_{\text{ред}}}{p} = \frac{\kappa_l \kappa_{\text{ред}}}{\kappa_{\text{осс}} p} \cdot \frac{I}{4T_{\text{учл}} p + I},$$

где  $W_{zc}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{pn}(p)} = \frac{1/\kappa_{occ}}{4T_{ycn}p + 1}$ .

Параметры нескорректированной системы определяются следующим образом:

– коэффициент передачи дискретно-аналогового преобразователя  $\kappa_1$

$$\kappa_1 = \kappa_{\text{дн}} \kappa_{\text{ан}} = \frac{U_{1\text{max}}}{N_{\text{и}} h},$$

где  $U_{1\text{max}} = 10B$ ;  $N_{\text{и}}$  – ширина полузона квазилинейной части преобразователя "код – напряжение", зависящая от числа двоичных разрядов реверсивного счетчика.

– коэффициент передачи редуктора  $\kappa_{ред}$

$$\kappa_{ред} = \frac{V_{P\text{max}}}{\omega_n}.$$

Определяем коэффициент передачи нескорректированной разомкнутой системы:

$$\kappa_p = \frac{\kappa_1 \kappa_{ред}}{\kappa_{occ}}, \text{ где } \kappa_{occ} = \frac{U_{zc\text{max}}}{\omega_n} = \frac{10B}{\omega_n}.$$

По найденным параметрам нескорректированной системы строим ЛАХ. ЛАХ строится в следующем порядке:

а) определяется  $20\lg\kappa_p$  [дБ];

б) находится частота сопряжения  $\lg\omega_c = \lg\frac{1}{4T_{ycn}}$  [дек];

в) через точку  $20\lg\kappa_p$  на оси ординат проводится прямая под наклоном  $-20\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$  до частоты сопряжения  $\lg\omega_c$ , т.к. в передаточной функции нескорректированной системы присутствует одно интегрирующее звено;

г) на частоте сопряжения  $\lg\omega_c$ , прямая меняет наклон с  $-20\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$  на  $-40\frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ , что определяется наличием апериодического звена в передаточной функции нескорректированной системы.

2.1.5. Строится ЛАХ регулятора положения, как разность желаемой ЛАХ и ЛАХ нескорректированной системы (см. рис 4).

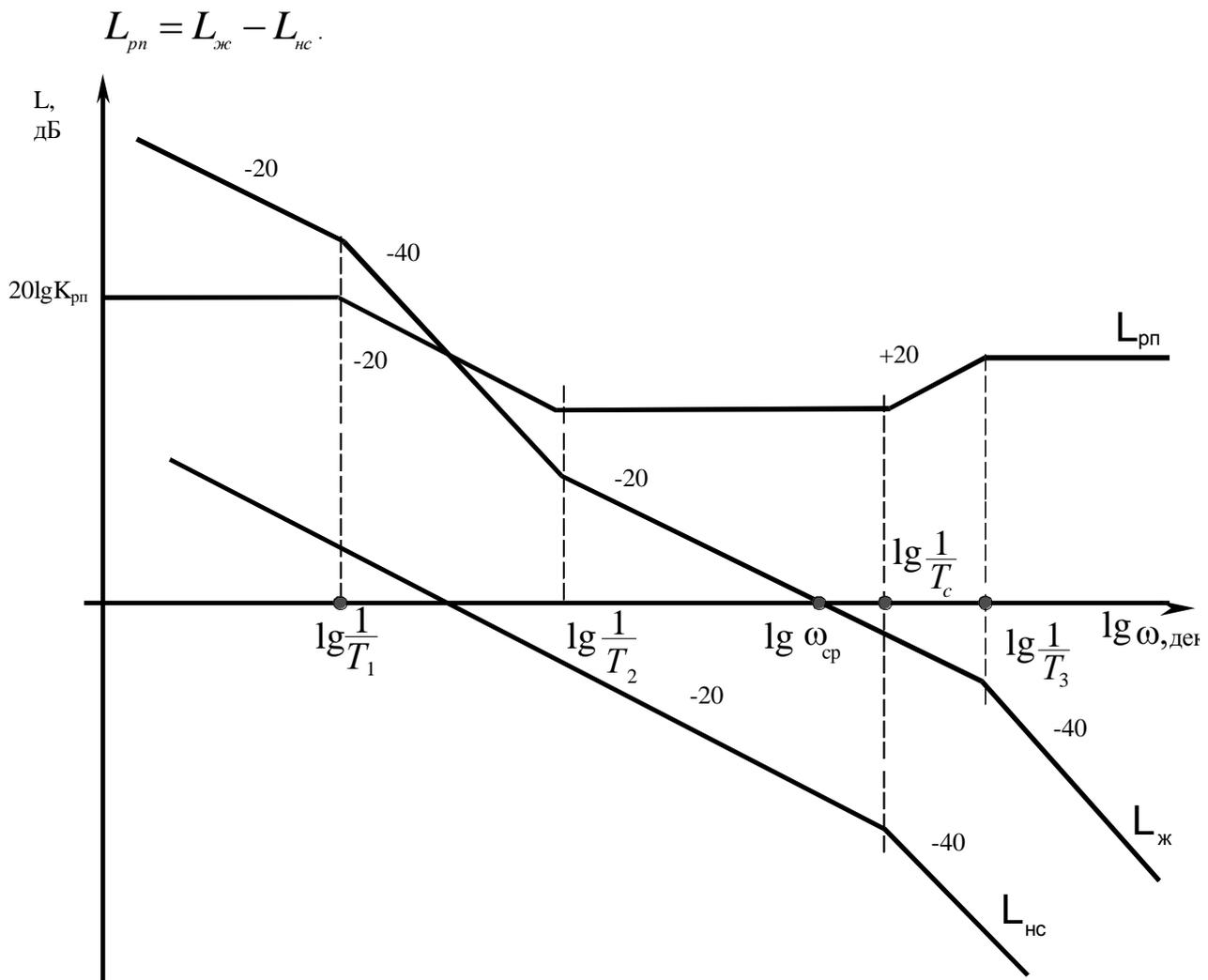


Рис. 4

2.1.6. По виду ЛАХ регулятора положения определяется соответствующая ему передаточная функция  $W_{pn}(p)$  и её параметры.

$$W_{pn}(p) = K_{pn} \frac{(T_2 p + 1)(T_c p + 1)}{(T_3 p + 1)(T_1 p + 1)} ; (*)$$

2.1.7. По виду передаточной функции регулятора положения выполняется его реализация на операционном усилителе с расчётом R-С элементов его схемы.

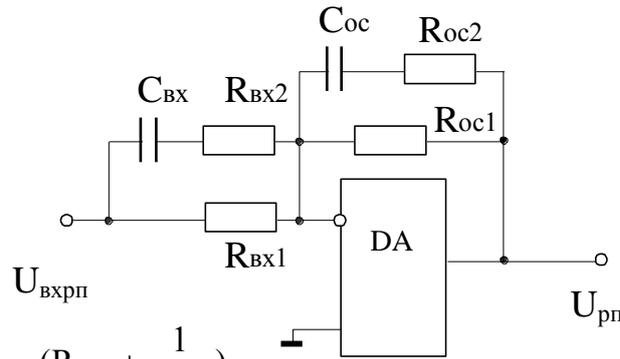


рис. 5.

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{z_{\text{oc}}(p)}{z_{\text{вх}}(p)} = \frac{\frac{R_{\text{oc1}}(R_{\text{oc2}} + \frac{1}{C_{\text{oc}}p})}{R_{\text{oc1}} + R_{\text{oc2}} + \frac{1}{C_{\text{oc}}p}}}{\frac{R_{\text{вх1}}(R_{\text{вх2}} + \frac{1}{C_{\text{вх}}p})}{R_{\text{вх1}} + R_{\text{вх2}} + \frac{1}{C_{\text{вх}}p}}} = \frac{R_{\text{oc1}}}{R_{\text{вх1}}} \frac{(R_{\text{oc2}}C_{\text{oc}}p+1)((R_{\text{вх1}}+R_{\text{вх2}})C_{\text{вх}}p+1)}{(R_{\text{вх2}}C_{\text{вх}}p+1)((R_{\text{oc1}}+R_{\text{oc2}})C_{\text{oc}}p+1)}; (**)$$

$$W_{\text{рп}}(p) = K_{\text{рп}} \frac{(T_2p+1)(T_cp+1)}{(T_3p+1)(T_1p+1)};$$

Сравнивая соответствующие коэффициенты при операторе  $p$  в передаточных функциях (\*) и (\*\*) получим систему уравнений для расчета R-С элементов схемы регулятора положения.

$$\begin{cases} K_{\text{рп}} = \frac{R_{\text{oc1}}}{R_{\text{вх1}}}; & T_1 = (R_{\text{oc1}} + R_{\text{oc2}})C_{\text{oc}}; \\ T_2 = R_{\text{oc2}}C_{\text{oc}}; & T_3 = R_{\text{вх2}}C_{\text{вх}}; \\ T_c = (R_{\text{вх1}} + R_{\text{вх2}}) \cdot C_{\text{вх}} \end{cases} (***)$$

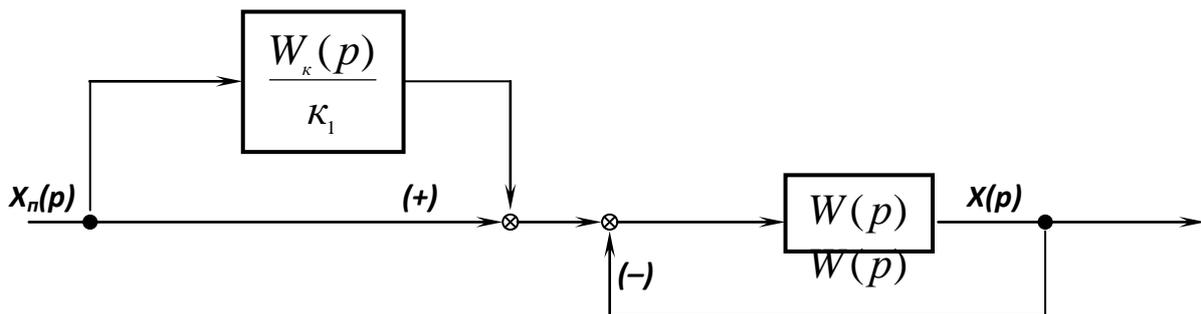
$$\begin{cases} R_{\text{oc1}} = K_{\text{рп}} R_{\text{вх1}}; & C_{\text{вх}} = (T_c - T_3) / R_{\text{вх1}}; \\ R_{\text{вх2}} = \frac{T_3}{C_{\text{вх}}}; & C_{\text{oc}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{oc1}}}; \\ R_{\text{oc2}} = T_2 / C_{\text{oc}}. \end{cases}$$

Задавшись  $R_{\text{вх1}} = 5 \dots 10$  кОм с помощью системы уравнений (\*\*\*) определить  $R_{\text{oc1}}, C_{\text{вх}}, R_{\text{вх2}}, C_{\text{oc}}, R_{\text{oc2}}$  по выражениям:

## 2.2. Определение параметров эквивалентной схемы комбинированного управления

СКСО превращает следящий электропривод координат в комбинированную систему управления, в которой наряду с замкнутым по положению каналом появляется дополнительно разомкнутый канал, позволяющий в принципе сделать систему инвариантной к входному воздействию.

Упрощенная структурная схема комбинированной системы показана на рисунке 2. Преобразуем эту схему (рис. 4) и запишем передаточную функцию, соответствующую этой схеме и учитывающую влияние замкнутого и разомкнутого каналов.



**Рис. 6**

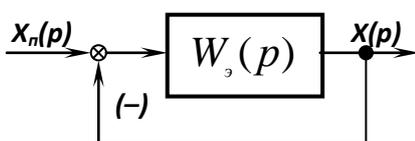
$$\Phi_s(p) = \frac{X(p)}{X_n(p)} = \frac{W(p) \left[ \frac{W_\kappa(p)}{\kappa_1} + 1 \right]}{1 + W(p)}, \quad (2)$$

где  $W(p) = \kappa_1 \frac{\kappa_{ред}}{p} W_{pn}(p) W_{zc}(p)$ .

Запишем выражение (2) как

$$\Phi_s(p) = \Phi(p) \left[ \frac{W_\kappa(p)}{\kappa_1} + 1 \right],$$

где  $\Phi(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)}$  – передаточная функция контура положения в замкнутом состоянии без схемы компенсации.



Для удобства анализа и синтеза комбинированной системы она может быть представлена одноконтурной замкнутой системой с некоторой эквивалентной передаточной функцией в разомкнутом состоянии  $W_s(p)$  (рис. 5).

Эта эквивалентная передаточная функция находится из условия:

$$\Phi_{\gamma}(p) = \frac{W_{\gamma}(p)}{1+W_{\gamma}(p)} = \Phi(p) \left[ \frac{W_{\kappa}(p)}{\kappa_1} + 1 \right]$$

и равна

$$W_{\gamma}(p) = \frac{\Phi(p) \left[ \frac{W_{\kappa}(p)}{\kappa_1} + 1 \right]}{1 - \Phi(p) \left[ \frac{W_{\kappa}(p)}{\kappa_1} + 1 \right]}. \quad (3)$$

Пусть при синтезе следящего электропривода асимптотическая ЛАХ скорректированной разомкнутой системы имеет вид  $-20, -40, -20, -40$  дБ/дек (рис. 3). Тогда

$$W(p) = \frac{\kappa_v (T_2 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)};$$

$$\Phi(p) = \frac{\kappa_v (T_2 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_3 p + 1) + \kappa_v (T_2 p + 1)},$$

где  $\kappa_v$  – добротность по скорости одноконтурной следящей системы;  $T_1, T_2, T_3$  – постоянные времени, соответствующие сопрягающим частотам.

Добротность по скорости  $\kappa_v$  и эти постоянные времени определяются непосредственно по асимптотической ЛАХ скорректированной одноконтурной системы (рис. 6).

Следует учесть, что  $W_{\kappa}(p) = \nu p$  – передаточная функция схемы компенсации скоростной ошибки. Значение размерного коэффициента  $\nu$  зависит от заданной степени компенсации  $\gamma$ , которая равна отношению проектируемой скоростной ошибки в комбинированной системе к скоростной ошибке в той же системе без учета схемы компенсации, т.е.  $\nu = (1 - \gamma) \frac{\kappa_1}{\kappa_v}$ . (4)

С учетом выражения (4), после некоторых преобразований, получим

$$W_{\gamma} = \frac{\kappa_v (T_2 p + 1) \left( \frac{1 - \gamma}{\kappa_v} p + 1 \right)}{p(T_1 T_3 p^2 + (T_1 + T_3 - T_2(1 - \gamma))p + \gamma)}. \quad (5)$$

Разделим числитель и знаменатель в последней формуле на  $\gamma$  и представим полученный многочлен знаменателя в виде произведения двух сомножителей с эквивалентными постоянными времени

$$W_{\gamma}(p) = \frac{\kappa_{\gamma} (T_{\gamma 1} p + 1)(T_{\gamma 2} p + 1)}{p(T_{\gamma 1} p + 1)(T_{\gamma 2} p + 1)},$$

где  $\kappa_3 = \frac{\kappa_V}{\gamma}$  – эквивалентная добротность по скорости с учетом действия

схемы компенсации скоростной ошибки;  $T_4, T_{\text{э}1}, T_{\text{э}2}$  – эквивалентные постоянные времени

$$T_4 = \frac{1 - \gamma}{\kappa_V};$$

$$T_{\text{э}1} = \frac{T_1 + T_3 - (1 - \gamma)T_2}{2\gamma} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4\gamma T_1 T_3}{(T_1 + T_3 - (1 - \gamma)T_2)^2}} \right);$$

$$T_{\text{э}2} = \frac{T_1 + T_3 - (1 - \gamma)T_2}{2\gamma} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4\gamma T_1 T_3}{(T_1 + T_3 - (1 - \gamma)T_2)^2}} \right);$$

Теперь, по полученным значениям  $\kappa_3, T_{\text{э}1}, T_{\text{э}2}, T_4$  строятся ЛАФЧХ эквивалентной системы  $20\lg|W_s(j\omega)|, \arg W_s(j\omega)$  (рис. 6).

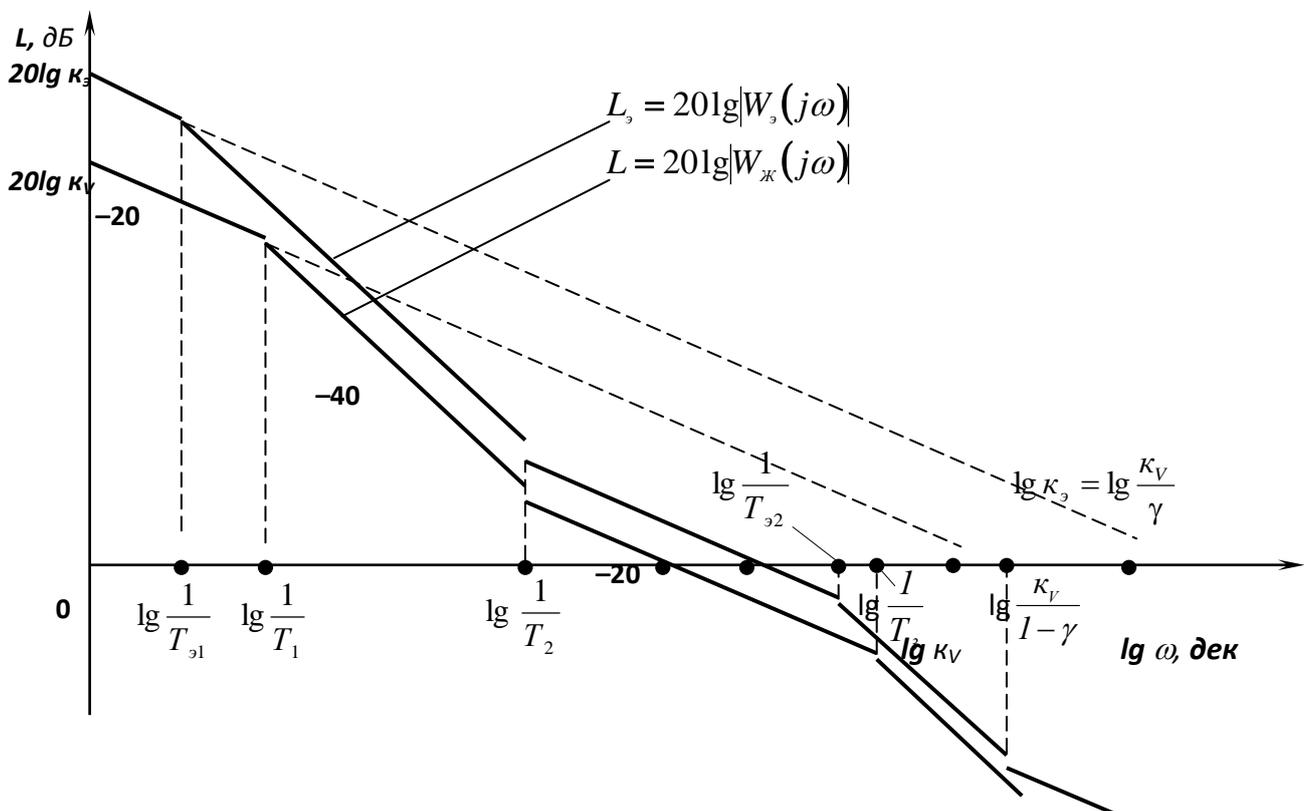


Рис. 8.

В дальнейших расчетах в качестве скорректированной разомкнутой системы следящего электропривода одной координаты следует считать эквивалентную передаточную функцию  $W_s(p)$ .

### 3. Расчёт контурной ошибки при воспроизведении окружности.

В общем случае, когда передаточные функции следящих электроприводов по координатам  $X$  и  $Y$  различны, при воспроизведении окружности на плоскости фактически получается эллипс. В этом случае контурная ошибка вычисляется либо в экстремальных точках, либо при всех  $\alpha(t) = \omega_k t$  от  $0$  до  $2\pi$  как разность между заданным радиусом  $R$  и текущим значением вектора  $\rho(t)$ :

$$\delta_k(t) = R - \rho(t).$$

Если передаточные функции следящих электроприводов в замкнутом состоянии по координатам и совпадают на всем диапазоне частот, т.е.  $\Phi_X(p) = \Phi_Y(p)$ , то при воспроизведении окружности заданного радиуса  $R$  на плоскости  $X-Y$  получается также окружность, но большего или меньшего радиуса  $\rho$ , равного:

$$\rho = R|\Phi(j\omega)|.$$

Контурная ошибка в этом случае для определенной круговой частоты обхода окружности будет постоянной и равной

$$\delta_k(\omega_k) = R[1 - |\Phi(j\omega_k)|]. \quad (6)$$

Для выявления влияния радиуса окружности и линейной скорости обхода на величину контурной ошибки, выражение (6) обычно представляют в виде:

$$\delta_k(\omega_k) = \frac{V}{\omega_k} [1 - |\Phi(j\omega_k)|]$$

и вычисляют при  $V = const$  на определенном диапазоне частот, зависящем от реального радиуса воспроизводимой окружности.

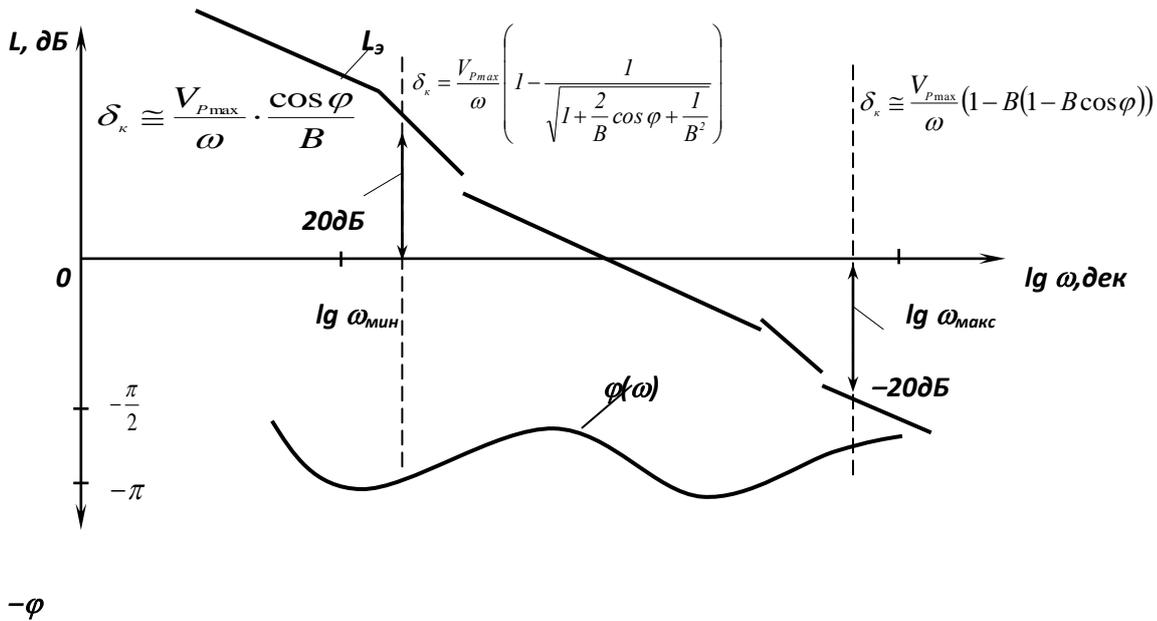
Величина  $F = |\Phi(j\omega_k)|$  обычно определяется по номограмме замыканий, устанавливающей связь амплитуды и фазы замкнутой системы через амплитуду и фазу разомкнутой системы. Однако в случае определения контурной ошибки использование номограммы замыкания не обеспечивает требуемой точности вычислений. Поэтому рекомендуется вычислять эту величину непосредственно по

формуле 
$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{B(\omega)} \cos \varphi(\omega) + \frac{1}{[B(\omega)]^2}}},$$

где  $B(\omega) = |W(j\omega)|$  определяется по логарифмической амплитудной характеристике разомкнутой скорректированной системы (рис. 7) из условия:

$\log B = \frac{L_s}{20}$ ;  $\varphi(\omega)$  — определяется по фазовой характеристике той же системы

при соответствующей частоте, причем  $\varphi < 0, |\varphi| > \frac{\pi}{2}$ , поэтому  $\cos \varphi < 0$ .



Необходимо также построить кривую зависимости контурной ошибки от круговой частоты обхода окружности при постоянной линейной скорости, равной максимальной скорости рабочей подачи. При этом примерный диапазон частот рекомендуется выбрать от  $\omega_{мин} = 0,1\omega_1$  до  $\omega_{макс} = \omega_3$ , где  $\omega_1 = \omega_{\kappa} = \frac{1}{T_1}$ .

Контурная ошибка определяется по формуле:

$$\delta_{\kappa} = \frac{V_{Pmax}}{\omega} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{B} \cos \varphi + \frac{1}{B^2}}} \right)$$

Для упрощения вычислений величины  $\delta_{\kappa}$  можно воспользоваться ее приближенными значениями в следующих случаях:

если  $L_3 \geq 20\text{дБ}$ , то  $F \cong 1 - \frac{\cos \varphi}{B}$ , а  $\delta_{\kappa} = \frac{V_{Pmax}}{\omega} \cdot \frac{\cos \varphi}{B}$ ;

если  $L_3 \leq -20\text{дБ}$ , то  $F \cong B(1 - B \cos \varphi)$ , а  $\delta_{\kappa} = \frac{V_{Pmax}}{\omega(1 - F)}$ .

Примерный вид кривой  $\delta_{\kappa} = f(\omega)$  при  $V = const$  показан на рис. 8.

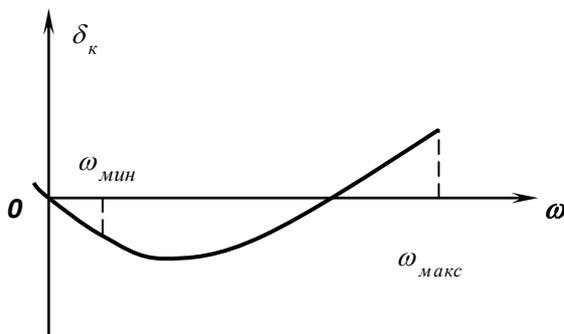


Таблица вариантов на контрольные задания

Номер варианта	Двигатель	Номинальная мощность	Номинальная частота вращения	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Номинальный момент	Маховой момент	Перегрузочная способность	Число полюсов	Обмоточные данные		Максимальная скорость рабочей подачи	Цена	
										Обмотки якоря				Обмотки добавочных полюсов
										Сопrotивление при 15 С	Число параллельных ветвей			
1	2ПБВ100М	0,8	1000	47	20	7,5	0,076	7	4	0,22	2	0,7 Ря	15	0,04
2	ДК1-5,2	0,55	1000	110	6,5	5,2	0,056	7	4	2,1	2	0,7 Ря	12	0,03
3	МИ32	0,37	1000	110	4,2	3,61	0,053	4	4	1,46	2	0,75	20	0,03
4	2ПБВ112М	2	1000	69	35	18,5	0,168	7	4	0,123	2	0,7 Ря	24	0,08
5	ПСТ42	0,18	1500	110	2,3	1,17	0,025	4	2	2,6	2	1,75	9	0,04
6	МИ41	1,1	1500	110	13	7,15	0,16	4	4	0,42	2	0,25	12	0,03
7	МИ42	1,6	1500	110	18,2	10,4	0,26	4	4	0,133	2	0,19	20	0,03
8	ДК1-3,5	0,74	2000	65	7,5	3,5	0,084	7	4	1,15	2	0,7 Ря	20	0,03
9	ПСТ53	0,37	1000	110	4,3	3,6	0,046	4	2	1,47	2	1,12	14	0,04
10	ПСТ52	0,37	1500	110	4,4	2,4	0,04	4	2	1,25	2	0,76	15	0,04
11	ПСТ53	0,55	1500	110	6,2	3,58	0,076	4	2	0,77	2	0,58	9	0,03
12	ПСТ51	0,37	2200	110	4,4	1,64	0,064	4	2	1,13	2	0,9	12	0,03
13	ПСТ53	0,75	2200	110	8,2	3,32	0,092	4	2	0,365	2	0,3	24	0,08
14	ПБВ100М	0,75	1000	52	18	7,16	0,08	4	4	0,222	2	0,266	12	0,03
15	ДК1-1,7	0,27	1500	36	8	1,7	0,048	7	4	0,75	2	0,7 Ря	20	0,03
16	ДК1-2,3	0,36	1500	48	7,5	2,3	0,056	7	4	0,95	2	0,7 Ря	12	0,03
17	ПСТ42	0,25	2200	110	3,1	1,17	0,035	4	2	1,4	2	0,96	21	0,08
18	ПСТ51	0,25	1500	110	3,2	1,62	0,032	4	2	2,1	2	1,3	12	0,03
19	ПСТ52	0,55	2200	110	6,2	2,44	0,04	4	2	0,66	2	0,48	20	0,03

## **Задание 1**

Синтез контура положения без схемы компенсации скоростной ошибки.

## **Задание 2**

Определение параметров эквивалентной схемы комбинированного управления.

## **Задание 3**

Определение передаточной функции регулятора положения и его реализация на операционном усилителе.

## **Задание 4**

Расчет контурной ошибки при воспроизведении окружности.

№ контр. точки	Наименование оценочного средства	Вес оценочного средства	Критерии оценки	Дата сдачи контрольной точки
1	Контрольное задание № 1 на самостоятельную работу студентов	25%	Полнота и точность решения; качество оформления отчетов; своевременность представления отчетов.	На практическом занятии № 2
2	Контрольное задание № 2 на самостоятельную работу студентов	25%		На практическом занятии № 3
3	Контрольное задание № 3 на самостоятельную работу студентов	25%		На практическом занятии № 4
4	Контрольное задание № 4 на самостоятельную работу студентов	25%		На практическом занятии № 5

### 3. Перечень вопросов к зачёту с оценкой по дисциплине «Теория электропривода».

- Определение структурной схемы динамики асинхронного двигателя при частотном регулировании и передаточные функции асинхронного двигателя.
- Т-образная схема замещения асинхронного двигателя при частотном регулировании.
- Определение тока  $I_2$  роторной цепи Т-образная схема замещения асинхронного двигателя при частотном регулировании.
- Определение R-X параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя.
- Определение формулы для момента асинхронного двигателя при законе частотного регулирования  $\frac{U_1}{f} = const$ .
- Графики механических характеристик при законе частотного регулирования  $\frac{U_1}{f} = const$ .
- Определение формулы для момента  $M_k$  и  $\omega_{pk}$  при законе частотного регулирования постоянстве потокосцепления статора  $\Psi_1=const$ .
- Определение уравнения механических характеристик при законе частотного регулирования постоянстве потокосцепления статора  $\Psi_1=const$ , а также графики и жесткость  $\beta$ .
- Определение уравнения механических характеристик при законе частотного регулирования постоянстве потокосцепления ротора  $\Psi_2=const$ , а также графики и жесткость  $\beta$ .
- Структурная схема математической модели асинхронного двигателя при векторном управлении.
- Функциональная схема системы векторного управления.
- Математические преобразования в блоках функциональной схемы системы.

- СПР при векторном управлении.
- Расчёт контура регулирования фазного тока.
- Расчёт контура регулирования потокосцепления ротора.
- Расчёт контура регулирования момента асинхронного двигателя.
- Расчёт контура регулирования скорости.
- Электромеханические характеристики синхронного двигателя.
- Динамические свойства синхронного двигателя.
- Компенсирующая способность синхронного двигателя.

## **Шкала и процедура текущей аттестации в накопительной системе оценивания учебных достижений обучающихся**

Для текущей аттестации используется накопительная система оценивания учебных достижений обучающихся, основанная на использовании совокупности контрольных точек. В накопительной системе применяются оценки «5», «4», «3» и «2» независимо от формы промежуточной аттестации по дисциплине. Расчет итоговой оценки по текущей аттестации в электронном журнале выполняется автоматически при условии введения в него всех контрольных точек, весового коэффициента каждой из них в процентах и наличия проставленных оценок.

Оценка «5» выставляется обучающимся за правильные и полные ответы на вопросы контрольных заданий, оформление отчетов в соответствии с установленными требованиями и своевременном их представлении на проверку преподавателю.

Оценка «4» выставляется обучающимся за правильные, но неполные ответы на вопросы контрольных заданий, оформление отчетов с отдельными отклонениями от установленных требований и незначительными нарушениями сроков их представления на проверку преподавателю.

Оценка «3» выставляется обучающимся, допустившим неточности и неполноту ответов на вопросы контрольных заданий, несоблюдение требований к оформлению отчетов и нарушение сроков их представления на проверку преподавателю, но обладающим уровнем подготовки, достаточным для устранения допущенных недочетов под руководством преподавателя.

Оценка «2» выставляется обучающимся, обнаружившим пробелы в знаниях основного учебного материала, допустившим принципиальные ошибки при выполнении контрольных заданий.

Контрольная точка считается успешно пройденной, если обучающийся получил оценку «5», «4» или «3». При получении оценки «2» контрольная точка считается не пройденной.

Расчет итоговой оценки по текущей аттестации в электронном журнале выполняется автоматически при условии введения в него всех контрольных точек, весового коэффициента каждой из них в процентах и наличия проставленных оценок.

## **Шкала и процедура оценивания сформированности компетенций**

На этапе промежуточной аттестации используется система оценки успеваемости обучающихся, которая позволяет преподавателю оценить уровень освоения материала обучающимися. Критерии оценивания сформированности планируемых результатов обучения (дескрипторов) представлены в карте компетенции ОПОП.

Форма оценки индивидуальных достижений обучающихся на практических занятиях: оценка - 5 «отлично»; 4 «хорошо»; 3 «удовлетворительно»; 2 «неудовлетворительно». Форма оценки отчетов по индивидуальным домашним заданиям и лабораторным работам – «зачет» / «незачет». Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 7 семестре в форме экзамена, а в 8 семестре - в форме зачета с оценкой: оценка 5 - «отлично»; 4 - «хорошо»; 3 - «удовлетворительно»; 2 - «неудовлетворительно».

**Шкала оценивания:**

**«Зачет»** – выставляется, если сформированность заявленных дескрипторов компетенций более чем на 50% оценивается не ниже «удовлетворительно» при условии отсутствия критерия «неудовлетворительно». Выставляется, когда обучающийся показывает хорошие знания изученного учебного материала; самостоятельно, логично и последовательно излагает и интерпретирует материалы учебного курса; полностью раскрывает смысл предлагаемого вопроса; владеет основными терминами и понятиями изученного курса; показывает умение переложить теоретические знания на предполагаемый практический опыт.

**«Отлично»** – выставляется, если сформированность заявленных дескрипторов компетенций (в соответствии с картами компетенций ОПОП) оценивается критериями «хорошо» и «отлично» в пределах от 86% до 100%, при условии отсутствия оценки «неудовлетворительно»: студент показал прочные знания основных положений фактического материала, умение самостоятельно решать конкретные практические задачи повышенной сложности, свободно использовать справочную литературу, делать обоснованные выводы из результатов анализа конкретных ситуаций;

**«Хорошо»** – выставляется, если сформированность заявленных дескрипторов компетенций (в соответствии с картами компетенций ОПОП) оценивается критериями «хорошо» и «отлично» в пределах от 61% до 85%, при условии отсутствия оценки «неудовлетворительно», допускается оценка «удовлетворительно»: обучающийся показал прочные знания основных положений фактического материала, умение самостоятельно решать конкретные практические задачи, предусмотренные рабочей программой, ориентироваться в рекомендованной справочной литературе, умеет правильно оценить полученные результаты анализа конкретных ситуаций;

**«Удовлетворительно»** – выставляется, если сформированность заявленных дескрипторов компетенций (в соответствии с картами компетенций ОПОП) оценивается критериями «удовлетворительно», «хорошо» и «отлично» в пределах от 51% до 60%: обучающийся показал знание основных положений фактического материала, умение получить с помощью преподавателя правильное решение конкретной практической задачи из числа предусмотренных рабочей программой, знакомство с рекомендованной справочной литературой;

**«Неудовлетворительно», «Незачет»** – выставляется, если сформированность заявленных дескрипторов компетенций (в соответствии с картами компетенций ОПОП) менее чем на 51% оценивается критериями «удовлетворительно», «хорошо» и «отлично»: при ответе обучающегося выявились существенные пробелы в знаниях основных положений фактического материала, неумение с помощью преподавателя получить правильное решение конкретной практической задачи из числа предусмотренных рабочей программой учебной дисциплины.

Ответы и решения обучающихся оцениваются по следующим общим критериям: распознавание проблем; определение значимой информации; анализ проблем; аргументированность; использование стратегий; творческий подход; выводы; общая грамотность.

Соответствие критериев оценивания сформированности планируемых результатов обучения (дескрипторов) системам оценок представлено в табл. 4.

Таблица 4

## Интегральная оценка

Критерии	Традиционная оценка
5	5
4	4
3	3
2 и 1	2, Незачет
5, 4, 3	Зачет

Обучающиеся обязаны сдавать все задания в сроки, установленные преподавателем. Оценка «Удовлетворительно» по дисциплине может выставляться и при неполной сформированности компетенций в ходе освоения отдельной учебной дисциплины, если их формирование предполагается продолжить на более поздних этапах обучения, в ходе изучения других учебных дисциплин.