

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ"

Кафедра № 32

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель направления

доц., к.т.н., доц.

(должность, уч. степень, звание)

С.В. Солёный

(инициалы, фамилия)

  
(подпись)

«23» июня 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Электропривод прецизионных РТС»  
(Наименование дисциплины)

Код направления подготовки	15.04.06
Наименование направления подготовки	Мехатроника и робототехника
Наименование направленности	Компьютерные технологии управления в мехатронике и робототехнике
Форма обучения	очная

## Лист согласования рабочей программы дисциплины

Программу составил (а)

проф., д.т.н., доц.  
(должность, уч. степень, звание)

  
(подпись, дата)

С.А. Сериков  
(инициалы, фамилия)

Программа одобрена на заседании кафедры № 32

«26» апреля 2022 г., протокол № 9

Заведующий кафедрой № 32

к.т.н., доц.  
(уч. степень, звание)

  
(подпись, дата)

С.В. Солёный  
(инициалы, фамилия)

Ответственный за ОП ВО 15.04.06(01)

доц., к.т.н., доц.  
(должность, уч. степень, звание)

  
(подпись, дата)

О.Я. Соленая  
(инициалы, фамилия)

Заместитель директора института №3 по методической работе

старший преподаватель  
(должность, уч. степень, звание)

  
(подпись, дата)

Н.В. Решетникова  
(инициалы, фамилия)

### Аннотация

Дисциплина «Электропривод прецизионных РТС» входит в образовательную программу высшего образования – программу магистратуры по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» направленности «Компьютерные технологии управления в мехатронике и робототехнике». Дисциплина реализуется кафедрой «№32».

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

ПК-4 «Способен разрабатывать структуру управления манипуляторов и роботов»

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с применением современных электроприводов в прецизионных робототехнических системах, разработкой и оптимизацией систем управления прецизионных электроприводов.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости, промежуточная аттестация в форме экзамена.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

Язык обучения по дисциплине «русский».

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

### 1.1. Цели преподавания дисциплины

Целью дисциплины является формирование у студентов необходимых знаний и умений, направленных на применение современных электроприводов в прецизионных робототехнических системах, разработку и оптимизацию систем управления прецизионных электроприводов.

1.2. Дисциплина входит в состав части, формируемой участниками образовательных отношений, образовательной программы высшего образования (далее – ОП ВО).

1.3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОП ВО.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен обладать следующими компетенциями или их частями. Компетенции и индикаторы их достижения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень компетенций и индикаторов их достижения

Категория (группа) компетенции	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Профессиональные компетенции	ПК-4 Способен разрабатывать структуру управления манипуляторов и роботов	ПК-4.3.1 знает принципы работы, технические характеристики манипуляторов и роботов ПК-4.У.1 умеет разрабатывать манипуляторы роботов и их мехатронное обеспечение

## 2. Место дисциплины в структуре ОП

Дисциплина может базироваться на знаниях, ранее приобретенных обучающимися при изучении следующих дисциплин:

- «Математические методы и модели в научных исследованиях»,
- «Проектирование и эксплуатация полупроводниковых преобразователей для электромеханических систем».

Знания, полученные при изучении материала данной дисциплины, имеют как самостоятельное значение, так и могут использоваться при изучении других дисциплин:

- «Локальные системы управления»,
- «Производственная преддипломная практика».

## 3. Объем и трудоемкость дисциплины

Данные об общем объеме дисциплины, трудоемкости отдельных видов учебной работы по дисциплине (и распределение этой трудоемкости по семестрам) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Объем и трудоемкость дисциплины

Вид учебной работы	Всего	Трудоемкость по семестрам
		№2
1	2	3
<b>Общая трудоемкость дисциплины, ЗЕ/ (час)</b>	5/ 180	5/ 180
<b>Из них часов практической подготовки</b>	17	17
<b>Аудиторные занятия, всего час.</b>	34	34
в том числе:		
лекции (Л), (час)	17	17

практические/семинарские занятия (ПЗ), (час)	17	17
лабораторные работы (ЛР), (час)		
курсовой проект (работа) (КП, КР), (час)		
экзамен, (час)	36	36
<b>Самостоятельная работа</b> , всего (час)	110	110
<b>Вид промежуточной аттестации:</b> зачет, дифф. зачет, экзамен (Зачет, Дифф. зач, Экз.**)	Экз.	Экз.

Примечание: \*\* кандидатский экзамен

#### 4. Содержание дисциплины

4.1. Распределение трудоемкости дисциплины по разделам и видам занятий.

Разделы, темы дисциплины и их трудоемкость приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Разделы, темы дисциплины, их трудоемкость

Разделы, темы дисциплины	Лекции (час)	ПЗ (СЗ) (час)	ЛР (час)	КП (час)	СРС (час)
<b>Семестр 2</b>					
Раздел 1. Двигатель постоянного тока как объект управления. Тема 1.1. Математическая модель двигателя постоянного тока. Тема 1.2. Статические характеристики двигателя постоянного тока. Тема 1.3. Режимы работы двигателя постоянного тока. Тема 1.4. Динамические характеристики двигателя постоянного тока.	5	5			50
Раздел 2. Синтез цифрового регулятора электропривода постоянного тока. Тема 2.1. Преобразователь напряжения для питания ДПТ. Тема 2.2. Описание процесса управления в дискретной форме. Тема 2.3. Преобразование непрерывного ПИ-регулятора в дискретную форму. Тема 2.4. Использование пакета Simulink Design Optimization для настройки параметров непрерывного регулятора.	5	5			50
Раздел 3. Схема подчинённого регулирования координат в системе «Управляемый преобразователь – двигатель». Тема 3.1. Метод последовательной коррекции. Тема 3.2. Подчинённое регулирование координат. Тема 3.3. Синтез регулятора тока. Тема 3.4. Синтез регулятора скорости.	7	7			60
Итого в семестре:	17	17			110
Итого	17	17	0	0	110

Практическая подготовка заключается в непосредственном выполнении обучающимися определенных трудовых функций, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

#### 4.2. Содержание разделов и тем лекционных занятий.

Содержание разделов и тем лекционных занятий приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Содержание разделов и тем лекционного цикла

Номер раздела	Название и содержание разделов и тем лекционных занятий
1	Двигатель постоянного тока как объект управления. Математическая модель двигателя постоянного тока. Статические характеристики двигателя постоянного тока. Режимы работы двигателя постоянного тока. Динамические характеристики двигателя постоянного тока.
2	Синтез цифрового регулятора электропривода постоянного тока. Преобразователь напряжения для питания ДПТ. Описание процесса управления в дискретной форме. Преобразование непрерывного ПИ-регулятора в дискретную форму. Использование пакета Simulink Design Optimization для настройки параметров непрерывного регулятора.
3	Схема подчинённого регулирования координат в системе «Управляемый преобразователь – двигатель». Метод последовательной коррекции. Подчинённое регулирование координат. Синтез регулятора тока. Синтез регулятора скорости.

#### 4.3. Практические (семинарские) занятия

Темы практических занятий и их трудоемкость приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Практические занятия и их трудоемкость

№ п/п	Темы практических занятий	Формы практических занятий	Трудоемкость, (час)	Из них практической подготовки, (час)	№ раздела дисциплины
Семестр 2					
1	Математическая модель двигателя постоянного тока как объекта управления	занятия по моделированию реальных условий	10	5	1
2	Преобразователь напряжения для питания двигателя постоянного тока	занятия по моделированию реальных условий	4	2	2
3	Описание процесса управления в дискретной форме. Методы преобразования аналоговых регуляторов в дискретные.	занятия по моделированию реальных условий	4	2	2
4	Использование пакета Simulink Design Optimization для настройки параметров	занятия по моделированию реальных условий	2	1	2

	непрерывного регулятора				
5	Схема подчинённого регулирования координат в системе «управляемый преобразователь – двигатель»	занятия по моделированию реальных условий	14	7	3
Всего			17	17	

#### 4.4. Лабораторные занятия

Темы лабораторных занятий и их трудоемкость приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Лабораторные занятия и их трудоемкость

№ п/п	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость, (час)	Из них практической подготовки, (час)	№ раздела дисциплины
Учебным планом не предусмотрено				
Всего				

#### 4.5. Курсовое проектирование/ выполнение курсовой работы

Учебным планом не предусмотрено

#### 4.6. Самостоятельная работа обучающихся

Виды самостоятельной работы и ее трудоемкость приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Виды самостоятельной работы и ее трудоемкость

Вид самостоятельной работы	Всего, час	Семестр 2, час
1	2	3
Изучение теоретического материала дисциплины (ТО)	80	80
Курсовое проектирование (КП, КР)		
Расчетно-графические задания (РГЗ)		
Выполнение реферата (Р)		
Подготовка к текущему контролю успеваемости (ТКУ)	20	20
Домашнее задание (ДЗ)		
Контрольные работы заочников (КРЗ)		
Подготовка к промежуточной аттестации (ПА)	5	5
Всего:	110	110

#### 5. Перечень учебно-методического обеспечения

для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Учебно-методические материалы для самостоятельной работы обучающихся указаны в п.п. 7-11.

#### 6. Перечень печатных и электронных учебных изданий

Перечень печатных и электронных учебных изданий приведен в таблице 8.

Таблица 8– Перечень печатных и электронных учебных изданий

Шифр/ URL адрес	Библиографическая ссылка	Количество экземпляров в библиотеке (кроме электронных экземпляров)
УДК 621-83(075.8)	Бекишев, Р. Ф. Электропривод : учеб. пособие для академического бакалавриата / Р. Ф. Бекишев, Ю. Н. Дементьев. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 301 с	-
УДК: 621.3 (075)	Ерёмин М.Ю. Электротехника, электроника и электропривод : Учеб. пособие / М.Ю. Ерёмин, Д.Н. Афоничев, Н.А. Мазуха.– Воронеж: ВГАУ, 2018. – 165 с.	-
УДК: 62-83-53(075.8)	Дементьев Ю.Н. Электропривод типовых производственных механизмов : Учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, Л.С. Удут, В.М. Завялов, Н.В. Кояин. – М.: Издательство Юрайт, 2020. – 280 с.	-
УДК: 62-83-52 (075)	Макаров А.М. Автоматизированный электропривод : Учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2019. – 160 с.	-
УДК 62-83(075.8)	Боннет В.В. Электропривод и электрооборудование: Учебное пособие. / В.В. Боннет, А.Ю. Логинов, А.Ю. Прудников. – Молодёжный: Изд-во Иркутского ГАУ им. А.А. Ежовского, 2020. – 92 с.	-
УДК 681.51(075) А734	Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.	-
УДК 629.735(07) В752	Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций. Часть 1. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 171 с.	-
ISBN 978-5-16-009674-2	Теория электропривода: Учебник/Г.Б.Онищенко - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 294 с. <a href="http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=452841">http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=452841</a>	-

#### 7. Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

URL адрес	Наименование
-----------	--------------

## 8. Перечень информационных технологий

8.1. Перечень программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Перечень используемого программного обеспечения представлен в таблице 10.

Таблица 10– Перечень программного обеспечения

№ п/п	Наименование
1	MathWorks Matlab R2012b

8.2. Перечень информационно-справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Перечень используемых информационно-справочных систем представлен в таблице 11.

Таблица 11– Перечень информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование
	Не предусмотрено

## 9. Материально-техническая база

Состав материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине, представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Состав материально-технической базы

№ п/п	Наименование составной части материально-технической базы	Номер аудитории (при необходимости)
1	Лекционная аудитория	21-21
2	Компьютерный класс	31-04

## 10. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

10.1. Состав оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Состав оценочных средств для проведения промежуточной аттестации

Вид промежуточной аттестации	Перечень оценочных средств
Экзамен	Список вопросов к экзамену; Примерный перечень вопросов для тестов.

10.2. В качестве критериев оценки уровня сформированности (освоения) компетенций обучающимися применяется 5-балльная шкала оценки сформированности компетенций, которая приведена в таблице 14. В течение семестра может использоваться 100-балльная шкала модульно-рейтинговой системы Университета, правила использования которой, установлены соответствующим локальным нормативным актом ГУАП.

Таблица 14 – Критерии оценки уровня сформированности компетенций

Оценка компетенции	Характеристика сформированных компетенций
5-балльная шкала	

Оценка компетенции 5-балльная шкала	Характеристика сформированных компетенций
«отлично» «зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся глубоко и всесторонне усвоил программный материал;</li> <li>– уверенно, логично, последовательно и грамотно его излагает;</li> <li>– опираясь на знания основной и дополнительной литературы, тесно привязывает усвоенные научные положения с практической деятельностью направления;</li> <li>– умело обосновывает и аргументирует выдвигаемые им идеи;</li> <li>– делает выводы и обобщения;</li> <li>– свободно владеет системой специализированных понятий.</li> </ul>
«хорошо» «зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся твердо усвоил программный материал, грамотно и по существу излагает его, опираясь на знания основной литературы;</li> <li>– не допускает существенных неточностей;</li> <li>– увязывает усвоенные знания с практической деятельностью направления;</li> <li>– аргументирует научные положения;</li> <li>– делает выводы и обобщения;</li> <li>– владеет системой специализированных понятий.</li> </ul>
«удовлетворительно» «зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся усвоил только основной программный материал, по существу излагает его, опираясь на знания только основной литературы;</li> <li>– допускает несущественные ошибки и неточности;</li> <li>– испытывает затруднения в практическом применении знаний направления;</li> <li>– слабо аргументирует научные положения;</li> <li>– затрудняется в формулировании выводов и обобщений;</li> <li>– частично владеет системой специализированных понятий.</li> </ul>
«неудовлетворительно» «не зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся не усвоил значительной части программного материала;</li> <li>– допускает существенные ошибки и неточности при рассмотрении проблем в конкретном направлении;</li> <li>– испытывает трудности в практическом применении знаний;</li> <li>– не может аргументировать научные положения;</li> <li>– не формулирует выводов и обобщений.</li> </ul>

### 10.3. Типовые контрольные задания или иные материалы.

Вопросы для экзамена представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Вопросы для экзамена

№ п/п	Перечень вопросов для экзамена	Код индикатора
1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Математическая модель двигателя постоянного тока как объекта управления.</li> <li>2. Статические характеристики двигателя постоянного тока. Естественные и искусственные механическая и электромеханическая характеристики.</li> <li>3. Режимы работы двигателя постоянного тока. Двигательный режим. Рекуперативное торможение. Динамическое торможение. Торможение противовключением.</li> <li>4. Динамические характеристики двигателя постоянного тока.</li> <li>5. Передаточная функция ДПТНВ по управлению при регулировании скорости.</li> </ol>	ПК-4.3.1 ПК-4.У.1

	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Передаточная функция ДПТНВ по возмущению.</li> <li>7. Передаточная функция ДПТНВ по управлению при регулировании момента.</li> <li>8. Преобразователь напряжения для питания ДПТ. Функциональная схема преобразователя. Управление транзисторами в режиме широтно-импульсной модуляции. Использование «мёртвого времени».</li> <li>9. Передаточные функции реверсивного и нереверсивного преобразователей напряжения для питания ДПТ.</li> <li>10. Описание процесса управления в дискретной форме. Структура цифровой системы управления. Технология <i>oversampling</i>.</li> <li>11. Методы преобразования аналоговых регуляторов в дискретные. Методы левых и правых прямоугольников. Метод трапеций.</li> <li>12. Преобразование непрерывного ПИ-регулятора в дискретную форму. Структура дискретного ПИ-регулятора с неявно выраженными составляющими и ограничением выходного сигнала. Структура линейного дискретного ПИ-регулятора с отдельными пропорциональным и интегральными каналами и соответствующего регулятора с нелинейным ограничением.</li> <li>13. Метод последовательной коррекции. Выбор желаемой передаточной функции.</li> <li>14. Использование последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат при регулировании электропривода. Особенности системы подчинённого регулирования.</li> <li>15. Синтез регулятора тока якоря для ДПТНВ.</li> <li>16. Синтез контура регулирования скорости ДПТНВ для двухконтурной системы подчинённого регулирования с внутренним контуром тока.</li> <li>17. Оценка жёсткости механической характеристики ДПТНВ при замкнутом контуре управления по структурной схеме системы управления.</li> </ol>	
--	--	--

Вопросы (задачи) для зачета / дифф. зачета представлены в таблице 16.  
Таблица 16 – Вопросы (задачи) для зачета / дифф. зачета

№ п/п	Перечень вопросов (задач) для зачета / дифф. зачета	Код индикатора
	Учебным планом не предусмотрено	

Перечень тем для курсового проектирования/выполнения курсовой работы представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Перечень тем для курсового проектирования/выполнения курсовой работы

№ п/п	Примерный перечень тем для курсового проектирования/выполнения курсовой работы
	Учебным планом не предусмотрено

Вопросы для проведения промежуточной аттестации в виде тестирования представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Примерный перечень вопросов для тестов

№ п/п	Примерный перечень вопросов для тестов	Код индикатора
1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Математическая модель двигателя постоянного тока как объекта управления.</li> <li>2. Статические характеристики двигателя постоянного тока. Естественные и искусственные механическая и электромеханическая характеристики.</li> <li>3. Режимы работы двигателя постоянного тока. Двигательный режим. Рекуперативное торможение. Динамическое торможение. Торможение противовключением.</li> <li>4. Динамические характеристики двигателя постоянного тока.</li> <li>5. Передаточная функция ДПТНВ по управлению при регулировании скорости.</li> <li>6. Передаточная функция ДПТНВ по возмущению.</li> <li>7. Передаточная функция ДПТНВ по управлению при регулировании момента.</li> <li>8. Преобразователь напряжения для питания ДПТ. Функциональная схема преобразователя. Управление транзисторами в режиме широтно-импульсной модуляции. Использование «мёртвого времени».</li> <li>9. Передаточные функции реверсивного и нереверсивного преобразователей напряжения для питания ДПТ.</li> <li>10. Описание процесса управления в дискретной форме. Структура цифровой системы управления. Технология <i>oversampling</i>.</li> <li>11. Методы преобразования аналоговых регуляторов в дискретные. Методы левых и правых прямоугольников. Метод трапеций.</li> <li>12. Преобразование непрерывного ПИ-регулятора в дискретную форму. Структура дискретного ПИ-регулятора с неявно выраженными составляющими и ограничением выходного сигнала. Структура линейного дискретного ПИ-регулятора с отдельными пропорциональным и интегральным каналами и соответствующего регулятора с нелинейным ограничением.</li> <li>13. Метод последовательной коррекции. Выбор желаемой передаточной функции.</li> <li>14. Использование последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат при регулировании электропривода. Особенности системы подчинённого регулирования.</li> <li>15. Синтеза регулятора тока якоря для ДПТНВ.</li> <li>16. Синтез контура регулирования скорости ДПТНВ для двухконтурной система подчинённого регулирования с внутренним контуром тока.</li> <li>17. Оценка жёсткости механической характеристики ДПТНВ при замкнутом контуре управления по структурной схеме системы управления.</li> </ol>	<p>ПК-4.3.1 ПК-4.У.1</p>

Перечень тем контрольных работ по дисциплине обучающихся заочной формы обучения, представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Перечень контрольных работ

№ п/п	Перечень контрольных работ
1	<p><b>1.</b> Для двигателя постоянного тока с параметрами, согласно варианту задания, разработать и отладить m-программу, обеспечивающую:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– построение естественных механических и электромеханических характеристик;</li> <li>– построение искусственных механических и электромеханических характеристик, полученных при:           <ul style="list-style-type: none"> <li>а). напряжении обмотки якоря равном <math>0,8 \cdot U_H</math> и <math>0,6 \cdot U_H</math>;</li> <li>б). потоке возбуждения <math>0,8 \cdot \Phi_H</math> и <math>0,6 \cdot \Phi_H</math>;</li> <li>в). введении в цепь якоря добавочного сопротивления <math>R_D = 0,5 \cdot R_{я}</math> и <math>R_D = 1,5 \cdot R_{я}</math>.</li> </ul> </li> <li>– построение зависимостей электромагнитной мощности и мощности, потребляемой цепью якоря от сети от скорости вращения ротора при номинальных значениях напряжения цепи якоря и потока возбуждения;</li> <li>– на естественных механических и электромеханических характеристиках, а также на графике мощности обозначить номинальный режим работы;</li> <li>– расчёт и вывод на экран величин пускового тока, пускового момента, скорости холостого хода и коэффициента жёсткости механической характеристики при номинальных значениях напряжения и тока якорной обмотки и потока возбуждения.</li> </ul> <p><b>2.</b> Определить установившуюся скорость вращения ротора двигателя, если зависимость момента сопротивления от скорости вращения имеет вид:</p> $M_C = 0,8 \cdot M_{C0} + 0,002 \cdot \omega^2.$ <p><b>3.</b> Разработать и отладить m-программу, обеспечивающую построение переходного процесса по скорости при номинальном значении потока возбуждения, нулевых начальных условиях и ступенчатом изменении напряжения цепи якоря от 0 до <math>U_H</math> и момента сопротивления вращению от 0 до <math>M_{C0}</math>.</p> <p><b>4.</b> Для двигателя постоянного тока с параметрами, согласно варианту задания, разработать Simulink – модель. При создании модели могут быть использованы следующие блоки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Simulink/Commonly Used Blocks/Gain</li> <li>Simulink/Commonly Used Blocks/Sum</li> <li>Simulink/Continuous/Integrator</li> <li>Simulink/Continuous/Transfer Fcn</li> <li>Simulink/Signal Routing/From</li> <li>Simulink/Signal Routing/Goto</li> <li>Simulink/Signal Routing/Mux</li> <li>Simulink/Sinks/Scope</li> <li>Simulink/Sources/Step</li> </ul> <p>Выполнить моделирование для случая, когда управляющее напряжение <math>u_{я} = U_H</math> подключается к цепи якоря через время <math>t_u = 10</math> с, а момент силы сопротивления вращению <math>M_C = M_{C0}</math> – через время <math>t_m = 60</math> с после начала моделирования.</p> <p>Для контроля результатов моделирования обеспечить вывод графических зависимостей <math>u_{я} = f(t)</math>, <math>M_C = f(t)</math>, <math>\omega = f(t)</math>.</p>

	<p>Сделать вывод о соответствии результатов работы Simulink – модели и результатов, полученных при выполнении пунктов 1 и 3 задания.</p> <p>5. При помощи Simulink – модели исследовать влияние включения в цепь якоря добавочного сопротивления <math>R_d = 0,5 \cdot R_{я}</math> и <math>R_d = 1,5 \cdot R_{я}</math> на характер переходного процесса.</p>
2	<p>1. Создать Simulink-модель системы стабилизации скорости вращения ротора ДПТНВ с параметрами, согласно варианту задания. При создании модели могут быть использованы следующие блоки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Simulink/Commonly Used Blocks/Gain;</li> <li>Simulink/Commonly Used Blocks/Saturation;</li> <li>Simulink/Commonly Used Blocks/Sum;</li> <li>Simulink/Continuous/Integrator;</li> <li>Simulink/Continuous/Transfer Fcn;</li> <li>Simulink/Signal Routing/From;</li> <li>Simulink/Signal Routing/Goto;</li> <li>Simulink/Signal Routing/Mux;</li> <li>Simulink/Sinks/Scope;</li> <li>Simulink/Sources/Step.</li> </ul> <p>Параметры модели должны задаваться отдельной m-программой. Выполнить моделирование для проверки работоспособности модели.</p> <p>2. Для настройки параметров ПИ-регулятора:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– подключить к выходу Simulink-модели блок Check Step Response Characteristics библиотеки Simulink &gt; Simulink Design Optimization &gt; Signal Constraints;</li> <li>– дважды щёлкнув кнопкой мыши на блоке Check Step Response Characteristics открыть вкладку Bounds, в которой задать ограничения для переходного процесса. Например: Step time = tu; Initial value = 0; Rise time = 5 c; Settling time = 10 c; Overshoot = 20%; Final value = wzd. Нажав кнопку Show Plot проконтролировать введенные ограничения;</li> <li>– нажав кнопку Response Optimisation... открыть вкладку Response Optimisation на которой в пункте Design Variables Set открыть окно Create Design Variables Set.</li> </ul> <p>В правом открывшемся списке параметров модели выделить параметры <math>K_p</math> и <math>K_i</math>, которые необходимо оптимизировать, и перенести их в левое окно при помощи кнопки-стрелки. Нажать кнопку ОК.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– нажав кнопку Evaluate Requirements на вкладке Response Optimisation построить переходной процесс для начальных значений параметров и проконтролировать его расположение относительно коридора ограничений.</li> <li>– в меню Options &gt; Optimization Options <ul style="list-style-type: none"> <li>• выбрать метод и алгоритм оптимизации;</li> <li>• задать допустимые отклонения параметров и функции оптимизации;</li> <li>• задать максимальное количество итераций.</li> </ul> </li> </ul> <p>(Можно оставить параметры, заданные по умолчанию. Максимальное количество итераций можно уменьшить до 30).</p> <p>Нажать кнопку ОК.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– нажав кнопку Пуска (зелёный треугольник) запустить процесс настройки параметров.</li> <li>– по окончании процесса настройки узнать полученные значения параметров регулятора, введя их имена в командном окне MatLAB.</li> </ul> <p>Занести данные параметры в m-программу установки параметров модели. В</p>

	<p>дальнейшем мы будем работать с этими параметрами.</p> <p><b>3.</b> Произвести преобразование аналогового регулятора в дискретный используя метод левых прямоугольников, метод правых прямоугольников и метод трапеций с периодом дискретизации <math>T = 0,2</math> с.</p> <p><b>4.</b> Записать передаточную функцию аналогового регулятора и преобразовать её в дискретную форму с периодом дискретизации <math>T = 0,2</math> с применяя специальные функции MatLAB:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– с использованием экстраполятора нулевого порядка (<i>внутри интервала дискретизации сигналы аппроксимируются постоянной величиной, равной значению сигнала в начале интервала дискретизации</i>). Метод задаётся параметром 'zoh';</li> <li>– с использованием экстраполятора первого порядка (<i>внутри интервала дискретизации сигналы аппроксимируются отрезками прямых, проходящих через концы кривой сигнала в интервале дискретизации</i>). Метод задаётся параметром 'foh';</li> <li>– с использованием билинейной аппроксимации Тастина внутри интервала дискретизации. Метод задаётся параметром 'tustin'.</li> </ul> <p>Построить графики АЧХ и ФЧХ непрерывного ПИ-регулятора, а также полученных в данном пункте трёх форм представления дискретного ПИ-регулятора.</p> <p><b>5.</b> Сравнить реакцию непрерывного и дискретных ПИ-регуляторов, полученных в пунктах 2, 3 и 4, на единичное ступенчатое воздействие и синусоидальное колебание с линейно-изменяющейся частотой. Для этого создать Simulink-модели, содержащие следующие блоки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Simulink/Continuous/Transfer Fcn;</li> <li>Simulink/Discrete/Discrete Transfer Fcn;</li> <li>Simulink/Signal Routing/Mux;</li> <li>Simulink/Sinks/Scope;</li> <li>Simulink/Sources/Chirp Signal.</li> <li>Simulink/Sources/Step.</li> </ul> <p><b>6.</b> Произвести преобразование непрерывного ПИ-регулятора в дискретный для периода дискретизации <math>T = T_{шум}</math> с использованием произвольного метода преобразования.</p> <p>Создать Simulink-модель системы стабилизации скорости вращения ротора ДПТНВ с дискретным ПИ-регулятором.</p> <p>Выполнить моделирование для проверки работоспособности модели.</p> <p><b>7.</b> Построить схему определения среднеквадратичного значения ошибки регулирования, обусловленной дискретизацией регулятора.</p> <p>При создании модели могут быть использованы следующие блоки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Simulink/Commonly Used Blocks/Delay;</li> <li>Simulink/Discrete/Zero-Order Hold;</li> <li>Simulink/Math Operations/Divide;</li> <li>Simulink/Math Operations/Math Function;</li> <li>Simulink/Sinks/Display;</li> <li>Simulink/Sources/Constant.</li> </ul> <p>Провести вычислительные эксперименты для определения зависимости СКО от периода дискретизации при изменении периода дискретизации от 0,001 с до 1,0 с. Построить график данной зависимости.</p>
3	<p><b>1.</b> Разработать и отладить m-программу, обеспечивающую построение переходного процесса для объекта с разомкнутой передаточной функцией <math>W_{ж.раз}(p)</math> при <math>T_{\mu} = 1</math> мс, значениях коэффициента <math>a = 1, 2</math> и <math>4</math>, при наличии</p>

единичной обратной связи по регулируемой координате и единичном скачке задающего воздействия.

**2.** Разработать, отладить и исследовать модель регулятора тока якоря ДПТНВ с параметрами, согласно варианту задания. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

**2.1.** Рассчитать коэффициенты ПИ-регулятора, соответствующие желаемой передаточной функции разомкнутого контура регулирования

$$W_{\text{ж.раз}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)},$$

где  $T_{\mu} = T_{II} = T_{\text{ШИМ}}$ .

**2.2.** Рассчитать коэффициент положительной обратной связи по скорости вращения ротора ДПТНВ для компенсации ЭДС вращения.

**2.3.** Построить и отладить Simulink-модель системы регулирования тока якоря, включающую:

- модель регулятора тока;
- модель DC/DC преобразователя напряжения с ШИМ управлением;
- модель ДПТНВ с подключенным рабочим органом;
- желаемую передаточную функцию контура регулирования тока;
- модели задающего и возмущающего воздействий;
- средства отображения результатов моделирования.

При моделировании ток задания принять равным номинальному току обмотки якоря, а момент сопротивления – равным нулю.

Для удобства наблюдения начальной стадии переходного процесса время подачи задающего воздействия целесообразно задать равным 0,001 с (Step/Step time = 0.001).

Задание параметров модели и вычисление соответствующих коэффициентов целесообразно реализовать при помощи соответствующей m-программы, которую необходимо исполнять перед запуском Simulink-модели.

**2.4.** Получить графические зависимости, описывающие

- заданное, желаемое и действительное изменения тока якоря;
- величину управляющего воздействия (скважность импульсов ШИМ) и его составляющих;
- напряжение, подаваемое на обмотку якоря, величину ЭДС вращения и падение напряжения на активном сопротивлении и индуктивности якорной обмотки.

Пояснить отличие тока якоря в модели регулирования ДПТНВ и на выходе желаемой передаточной функции.

Увеличивая напряжение сети постоянного тока  $U_{DC}$  добиться ситуации, когда требуемая скважность импульсов ШИМ не выходит за пределы допустимого диапазона [0, 1]. Убедиться, что в этом случае изменение тока якоря точно соответствует изменению тока на выходе желаемой передаточной функции, поскольку модель стала линейной.

Очевидно, что точного соответствия изменения тока якоря модели желаемому изменению можно добиться также соответствующим изменением верхнего и нижнего ограничений управляющего воздействия в блоке Saturation.

**2.5.** Определить значение скорости вращения ротора двигателя, при котором поддержание требуемого тока якоря становится невозможным в силу того, что ЭДС вращения достигает величины напряжения сети  $U_{DC}$ , питающей обмотку якоря ( $U_{DC}$  задано согласно варианту задания).

**3.** Разработать, отладить и исследовать модель регулятора скорости вращения

ротора ДПТНВ с параметрами, согласно варианту задания. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

**3.1.** Рассчитать коэффициент преобразования П-регулятора скорости.

**3.2.** Построить и отладить Simulink-модель системы регулирования скорости вращения ротора ДПТНВ, включающую:

- модель регулятора скорости;
- подчинённый контур регулятора тока;
- модель механической части ДПТНВ с подключенным рабочим органом;
- желаемую передаточную функцию контура регулирования скорости;
- модели задающего и возмущающего воздействий;
- средства отображения результатов моделирования.

Величины задающего ( $\omega_{зад}$ ) и возмущающего ( $M_C$ ) воздействий определяются вариантом задания.

Определение параметров модели и вычисление соответствующих коэффициентов целесообразно реализовать при помощи соответствующей m-программы, которую необходимо исполнять перед запуском Simulink-модели.

**3.3.** Промоделировать работу регулятора скорости ДПТНВ при  $M_C = 0$  и отсутствии ограничений на управляющие воздействия.

Убедиться, что характер переходного процесса достаточно близко соответствует желаемому. Некоторое незначительное отличие объясняется теми упрощениями, которые были приняты при синтезе регулятора скорости.

**3.4.** Промоделировать работу регулятора скорости ДПТНВ при  $M_C = 0$  и наличии ограничений на управляющие воздействия:  $0 \leq i_{зад} \leq (1,5 \cdot I_H)$ ;  $0 \leq \gamma \leq 1$ .

Дать пояснение ухудшению параметров переходного процесса.

Убедиться в наличии статической ошибки регулирования скорости

**3.5.** Промоделировать работу регулятора скорости ДПТНВ (с учётом ограничений на управляющие воздействия) при наличии момента сопротивления, величина которого определена в задании. Нагрузка прикладывается к валу двигателя по окончании переходного процесса отработки задания скорости (примерно 0,25 с.)

**3.6.** По результатам моделирования определить величину коэффициента жёсткости механической характеристики при замкнутом контуре управления и сравнить её с расчётным значением.

10.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания индикаторов, характеризующих этапы формирования компетенций, содержатся в локальных нормативных актах ГУАП, регламентирующих порядок и процедуру проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся ГУАП.

## 11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

11.1. Методические указания для обучающихся по освоению лекционного материала

Основное назначение лекционного материала – логически стройное, системное, глубокое и ясное изложение учебного материала. Назначение современной лекции в рамках дисциплины не в том, чтобы получить всю информацию по теме, а в освоении фундаментальных проблем дисциплины, методов научного познания, новейших достижений научной мысли. В учебном процессе лекция выполняет методологическую, организационную и информационную функции. Лекция раскрывает понятийный аппарат

конкретной области знания, её проблемы, дает цельное представление о дисциплине, показывает взаимосвязь с другими дисциплинами.

Планируемые результаты при освоении обучающимися лекционного материала:

- получение современных, целостных, взаимосвязанных знаний, уровень которых определяется целевой установкой к каждой конкретной теме;
- получение опыта творческой работы совместно с преподавателем;
- развитие профессионально-деловых качеств, любви к предмету и самостоятельного творческого мышления.
- появление необходимого интереса, необходимого для самостоятельной работы;
- получение знаний о современном уровне развития науки и техники и о прогнозе их развития на ближайшие годы;
- научиться методически обрабатывать материал (выделять главные мысли и положения, приходить к конкретным выводам, повторять их в различных формулировках);
- получение точного понимания всех необходимых терминов и понятий.

Лекционный материал может сопровождаться демонстрацией слайдов и использованием раздаточного материала при проведении коротких дискуссий об особенностях применения отдельных тематик по дисциплине.

Структура предоставления лекционного материала:

- получение современных, целостных, взаимосвязанных знаний, уровень которых определяется целевой установкой к каждой конкретной теме;
- получение опыта творческой работы совместно с преподавателем;
- развитие профессионально-деловых качеств, любви к предмету и самостоятельного творческого мышления.
- появление необходимого интереса, необходимого для самостоятельной работы;
- получение знаний о современном уровне развития науки и техники и о прогнозе их развития на ближайшие годы;
- получение навыков обработки материала научных исследований (выделять главные мысли и положения, приходить к конкретным выводам, повторять их в различных формулировках);
- получение точного понимания всех необходимых терминов и понятий.

#### 11.2. Методические указания для обучающихся по прохождению практических занятий

Практическое занятие является одной из основных форм организации учебного процесса, заключающаяся в выполнении обучающимися под руководством преподавателя комплекса учебных заданий с целью усвоения научно-теоретических основ учебной дисциплины, приобретения умений и навыков, опыта творческой деятельности.

Целью практического занятия для обучающегося является привитие обучающимся умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Планируемые результаты при освоении обучающимися практических занятий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

### Требования к проведению практических занятий

Практические занятия проводятся в компьютерном классе с использованием пакета MatLab и предполагают разработку математических прецизионных моделей электромеханических устройств и их систем управления согласно индивидуальному варианту задания, составление и отладку программ, проведение вычислительных экспериментов.

По результатам каждого практического задания должен быть подготовлен отчёт, содержащий необходимые теоретические сведения, листинги m-программ, построенные в процессе выполнения работы графические зависимости и т.п. Каждый отчёт должен содержать выводы по проделанной работе и список используемых дополнительных источников.

Каждое практическое занятие завершается собеседованием с преподавателем по представленному отчёту с выставлением оценки.

#### 11.3. Методические указания для обучающихся по прохождению самостоятельной работы

В ходе выполнения самостоятельной работы, обучающийся выполняет работу по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

В процессе выполнения самостоятельной работы, у обучающегося формируется целесообразное планирование рабочего времени, которое позволяет им развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, помогает получить навыки повышения профессионального уровня.

Методическими материалами, направляющими самостоятельную работу обучающихся являются:

- учебно-методический материал по дисциплине.

#### 11.4. Методические указания для обучающихся по прохождению текущего контроля успеваемости

Текущий контроль успеваемости предусматривает контроль качества знаний обучающихся, осуществляемого в течение семестра с целью оценивания хода освоения дисциплины.

Контроль качества знаний проводится в форме индивидуального собеседования по материалу отдельных разделов дисциплины, а также проверки отчётов о выполнении практических заданий, представленных в таблице 5. Оценивание текущего контроля успеваемости, оценивается по системе зачет/ не зачет. Положительный результат текущего контроля успеваемости дает студенту дополнительный балл при проведении промежуточной аттестации.

Результаты текущего контроля могут учитываться при проведении промежуточной аттестации.

Система оценок при проведении промежуточной аттестации осуществляется в соответствии с требованиями Положений «О текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов ГУАП, обучающихся по программам высшего образования» и «О модульно-рейтинговой системе оценки качества учебной работы студентов в ГУАП».

#### 11.5. Методические указания для обучающихся по прохождению промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация обучающихся предусматривает оценивание промежуточных и окончательных результатов обучения по дисциплине. Она проводится в форме экзамена.

Экзамен – форма оценки знаний, полученных обучающимся в процессе изучения всей дисциплины или ее части, навыков самостоятельной работы, способности применять их для решения практических задач. Экзамен, как правило, проводится в период экзаменационной сессии и завершается аттестационной оценкой «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Система оценок при проведении промежуточной аттестации осуществляется в соответствии с требованиями Положений «О текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов ГУАП, обучающихся по программам высшего образования» и «О модульно-рейтинговой системе оценки качества учебной работы студентов в ГУАП».

Промежуточная аттестация оценивается по результатам текущего контроля успеваемости. Список вопросов (таблица 15) к промежуточной аттестации утверждается кафедрой и выдается студентам для ознакомления. В случае, если студент по уважительной причине не выполнил требования текущего контроля, ему предоставляется возможность сдать задолженности по пропущенным темам. Форма проведения промежуточной аттестации – письменная.

## Лист внесения изменений в рабочую программу дисциплины

Дата внесения изменений и дополнений. Подпись внесшего изменения	Содержание изменений и дополнений	Дата и № протокола заседания кафедры	Подпись зав. кафедрой