

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «МГТУ»)**

**Методические указания
к самостоятельной работе аспирантов
по дисциплине Б1.В.05 Моделирование электромеханических систем
для подготовки аспирантов направления 13.06.01 Электро и
теплотехника
код и наименование направления подготовки (специальности)**

Электротехнические комплексы и системы
наименование профиля /специализаций/образовательной программы

Мурманск

2019

Составитель зав.кафедрой «Электрооборудование судов»

д.т.н., профессор Власов Анатолий Борисович

МУ к СР рассмотрены и одобрены на заседании кафедры – разработчика
«Электрооборудования судов»

протокол № 9 от 17.06.19

Рецензент – Урванцев В.И., доцент

ОГЛАВЛЕНИЕ

Наименование разделов	Стр.
Общие организационно – методические указания	4
Тематический план.....	5
Список рекомендуемой литературы.....	6
Содержание и методические указания к изучению тем дисциплины.....	7

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО - МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Данные методические указания составлены в соответствии с квалификационной характеристикой аспиранта ФГОС 878 от 30.07. 2014

Дисциплина "Моделирование электромеханических систем " изучается на 3 курсе.

В результате изучения курса будущий специалист должен знать:

- *Знать:*

- источники и виды электромагнитных помех, их характеристики, каналы распространения и способы защиты от них;

- особенности расчета электрических полей, индуцируемых различными источниками на судах;

- требования к качеству электрической энергии и способы измерения их характеристик;

- основные требования, предъявляемые к помехоустойчивости оборудования

Уметь:

- проектировать системы питания с учетом специфики работы при наличии электромагнитных полей;

- применять инженерные методы расчета и выбора средств защиты от помех;

- применять эффективные методы, устраняющие воздействие электромагнитных полей на технические средства и человека.

Обладать:

навыками анализа защиты электротехнических устройств, схем, аналоговых и цифровых приборов.

ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Номер и наименование раздела	Количество часов на самостоятельную работу	Форма контроля	№ семестра
Всего по дисциплине	108	зачет	4
Раздел1 Прикладные пакеты проектирования полупроводниковых систем электропривода	4		
Раздел2 Пакет MatLab. Непрерывные блоки. Дискретные блоки. Функции и таблицы Библиотека математических функций. Нелинейные блоки. Сигналы и системы. Виртуальные приборы для наблюдения и регистрации процессов. Источники сигналов.	8		
Раздел3 Пакет MatLab. Источники электрической энергии. Библиотека силовых элементов полупроводниковых преобразователей. Библиотека электрических машин.	8		
Раздел4 Пакет MatLab. Блоки связи. Блоки измерений. Блоки управления. Библиотеки трехфазных цепей.	8		
Раздел 5 Пакет MatLab. Техника построения блок-схем	8		
Раздел6 Пакет MatLab. Создание подсистем			
Раздел7 Основы компьютерного проектирования полупроводниковых электроприводов	8		
Раздел8 Моделирование управляемых выпрямителей	4		
Раздел 9 Моделирование транзисторных ШИП	8		
Раздел10 Моделирование АИН	8		
Раздел 11 Моделирование вентильной машины	8		
Итого по курсу	78		

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А.Б., Мухалев В.А. Моделирование электрооборудования и электромеханических систем. Методические рекомендации к лабораторному практикуму по курсам «Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации», «Моделирование электромеханических систем», «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2019. 231 с. (электронный вариант)

2. Власов А.Б. Силовая преобразовательная техника. Учебное пособие для самостоятельной работы по курсам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», для специальности 26.05.07 « Эксплуатация электрооборудования судов и средств автоматики », «Электротехнические комплексы и системы» для направления аспирантуры 13.06.01 Электро- и теплотехника, направленность «Электротехнические комплексы и системы», ФГБОУ ВО «МГТУ» 2019 , -297 с. (электронный вариант).

3. Власов А.Б. Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели). Учебное пособие, Мурманск, Изд-во МГТУ, 2005 г, -265 с. (230)

4. Власов, А. Б. Тепловизионная диагностика электротехнических комплексов и систем [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для курсантов и студентов по дисциплинам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», "Научные исследования в области судового электрооборудования и средств автоматики", "Основы экспериментальных исследований" для технических специальностей / А. Б. Власов, К. Б. Аллояров; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, ФГБОУ ВО "Мурман. гос. техн. ун-т". - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 4,16 Мб). - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2019. - 134 с. : ил. - Доступ из локальной сети Мурман. гос. техн. ун-та. - Загл. с экрана. В 58

5. Власов, А. Б. Тепловизионная диагностика электротехнических комплексов и систем : учеб. пособие для курсантов и студентов по дисциплинам "Судовая электроника и силовая преобразовательная техника", "Инфракрасная термография и тепловой контроль электротехнических систем морского транспорта" для техн. специальностей / А. Б. Власов; Федер. агентство по рыболовству, ФГБОУ ВО "Мурман. гос. техн. ун-т". - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2016. - 113 с. : ил. - Библиогр.: с. 111-113. - ISBN 978-5-86185-895-3 : 151-04.

31.32 - В 58 (50)

6. Власов А.Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики (учебник). М.: Колос, 2006. –280 с. (55)

Дополнительная литература

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. -320 с.

2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 +Simulink 4.5. Основы применения. Полное руководство пользователя. - М.: Солон- Пресс. -2002. – 768 с.

3. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.

4. Герман-Галкин С.Г. Линейные электрические цепи. Лабораторные работы. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА, принт, 2002. -320 с.

5. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника. Лабораторные работы. –СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА, принт, 2002. -304 с.

Перечень ресурсов информационно - телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. . Mirknig/ kom Учебники [http:// mirknig/ kom](http://mirknig/kom)

2. Электроэнергетический информационный центр: <http://www.elektrocentr.info/>

3. [http://www. google.ru](http://www.google.ru)

4. <http://yandex.ru>

5. <http://www.rambler.ru>

6. Электронная библиотечная система «Издательство Лань» [http:// e/lanbook.com](http://e/lanbook.com)

7. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека онлайн»
<http://biblioklub.ru>

СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Прикладные пакеты проектирования полупроводниковых систем электропривода

(Герман- Галкин С.Г. гл.1)

Методические указания.

Прежде всего следует ознакомиться с понятием и ориентацией прикладного пакета. Узнать, каким образом пакеты способны реализовывать математические функции. Поскольку современные пакеты содержат большие библиотеки функций их версии разбиты на блоки. Для моделирования схем силовой электроники использован пакет Simulink Matlab. Следует овладеть приемами работы с блоками библиотеки Simulink. (Герман- Галкин С.Г. гл.1).

Вопросы для самопроверки

1. Определения терминов Моделирование, Модель.
2. В чем заключается адекватность модели?
3. В чем состоит прямая задача моделирования?
4. В чем состоит обратная задача моделирования?
5. Когда применяется моделирование?
6. Классификация моделей.
7. Что такое гибридный вычислительный комплекс?
8. Что такое имитационное моделирование?
9. Виды обеспечения имитационных систем.

Раздел 2 Пакет MatLab. Непрерывные блоки. Дискретные блоки. Функции и таблицы Библиотека математических функций. Нелинейные блоки. Сигналы и системы. Виртуальные приборы для наблюдения и регистрации процессов.

Источники сигналов.(Дьяконов В.П. гл.1.р.2; Герман- Галкин А.С гл.1)

Методические указания. Необходимо ознакомиться с моделями различных полупроводниковых преобразователей. Уметь выбрать тип полупроводникового элемента в меню, научиться выбирать его параметры в полях Ron. Lon. Forward voltage.

Вопросы для самопроверки

1. Интерфейс основного окна MatLab.
2. Ввод формул в MatLab.
3. Задание переменных, векторов и матриц в MatLab.
4. Просмотр значений переменных в MatLab.
5. Построение графиков средствами MatLab.
6. Способы запуска Simulink.
7. Интерфейс окна Simulink.
8. Способ соединения блоков модели Simulink.
9. Как убрать из схемы блок без удаления его связей?
10. Способы копирования блоков в Simulink.

Раздел 3. Пакет MatLab. Источники электрической энергии. Библиотека силовых элементов полупроводниковых преобразователей. Библиотека электрических машин. (Дьяконов В.П. гл.1.р.2; Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.1)

Методические указания. Следует ознакомиться с методикой обработки сигналов типовых звеньев, набранных из библиотеки. Необходимо ознакомиться с моделями различных электрических машин. Уметь выбрать тип электрической машины в меню, научиться выбирать параметры машины для каждого значения момента нагрузки осуществляется моделирование. источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки *Power System Blockset /Extras/Electrical Sources*; измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Measurement*;

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите все типовые динамические звенья.
2. По заданной схеме на пассивных элементах (R/L/C) осуществите вывод передаточной функции.
3. Постройте схему на пассивных элементах (R/L/C), соответствующую заданной передаточной функции.
4. По заданной схеме на базе операционного усилителя осуществите вывод передаточной функции.
5. Постройте схему на операционном усилителе, соответствующую заданной передаточной функции.
6. Для заданного типового динамического звена нарисуйте переходный процесс, ЛАЧХ и ЛФЧХ. Как изменения параметров передаточной функции отражаются на них?

Раздел 4 .Блоки связи. Блоки измерений. Блоки управления. Библиотеки трехфазных цепей.(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2)

Методические указания Необходимо ознакомиться с моделями различных источников напряжения и тока.. Уметь выбрать тип источника в меню, научиться выбирать его параметры в полях *Ron. Lon. Forward voltage*. блок *RMS* для измерения действующего тока в источнике; блок *Display2* для количественного представления действующего тока в источнике (А) и скорости (рад/с); блок *Mux*, объединяющий два сигнала в один векторный;

Вопросы для самопроверки

1. Как определить постоянную времени для апериодического звена 1-го порядка и реального дифференцирующего звена по ЛФЧХ?
2. Какое максимальное количество графиков может отобразить LTI Viewer?
3. Какие графики может отображать LTI Viewer?
4. Опишите настройки компонента Score. Как нарисовать две кривые в одних осях? Как добавить дополнительную ось (дополнительный вход)?
5. Как сделать доступными настройки компонента Score? Как подготовить полученные с его помощью графики к печати (белый фон, темные кривые)?
6. Почему в работе не уделялось внимания амплитуде источника напряжения U_{in} ?
7. В чем различие между компонентами Series RLC Branch и Series RLC Load?
8. Назовите функции библиотеки *Continuons*.
9. Перечислите набор приборов для наблюдения и регистрации процессов в Simulink.

Раздел 5. Пакет MatLab. Техника построения блок-схем

Методические указания. Следует ознакомиться библиотекой математических функций Math ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2), а также с компонентами групп Sinks и Continuous. Необходимо уметь применить эти группы для просмотра и измерения параметров блоков, а также для наблюдения процессов. И получения графиков зависимостей.

Вопросы для самопроверки

- 1.Каким образом из постоянного напряжения удается создать переменное.
- 2.Библиотека Simulink. Компоненты групп Sinks и Continuous.
- 3.Назначение, основные параметры блоков Display, Scope, XY graph, Transfer Fcn, Integrator. Привести примеры использования блоков

Раздел 6. Создание подсистем

Методические указания. Создание подсистем необходимо для исследования электронномеханических систем, содержащих группы электрических машин и полупроводниковых преобразователей. Для этого необходимо ознакомиться с компонентами группы Electrical Sources и Machines.

Выполнить моделирование машины используя источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources; ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2), измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement; исследуемую трехфазную синхронную машину *Permanent Magnet Synchronous Machine* из библиотеки Power System Blockset/Machines, измеритель активной и реактивной мощности P1, Q1 из библиотеки Power System Blockset/Extras/Measurement; блок измерения переменных состояния машины *Machines Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Machines; блок *Display* для количественного представления измеренных мощностей (в трех первых окнах блока представлены активные мощности в каждой фазе машины, в трех последних - реактивные мощности);

Вопросы для самопроверки

1. Библиотека PowerSystems. Компоненты группы Electrical Sources и Machines. Назначение, основные параметры блоков AC Voltage Source, Battery, Controlled Voltage Source, Three-Phase Source, Asynchronous Machine SI Units. Привести примеры использования блоков.
2. Библиотека PowerSystems. Компоненты групп Elements, Measurements и Extra Measurements. Назначение, основные параметры блоков Series/Parallel RLC Branch/Load, Current Measurement, Voltage Measurement, Three-Phase V-I Measurement, Active & Reactive Power, Mean Value, RMS. Привести примеры использования блоков.
3. Проведение линейного анализа (Linear Analysis) в пакете MatLab. Порядок выполнения, настройки. Пример.
4. Компонент Scope. Настройки. Команды управления отображением. Построение кривых в одних осях. Добавление осей. Пример
5. Укажите последовательность действий для создания модели в среде Simulink на примере модели дизельгенератора.

Раздел 7. Основы компьютерного проектирования полупроводниковых электроприводов

Методические указания. Необходимо ознакомиться с компонентами группы Electrical Sources? Universal Bridge. ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2) Выполнить

моделирование используя источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources;
измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement;

Вопросы для самопроверки

1. Как изменятся кривые тока и напряжения на нагрузке, если в используемой в схеме автономного инвертора уменьшить несущую частоту ШИМ в 10 раз?
2. Что изменяет настройка *Scope Limit Data points to last*?
3. Как точно задать пределы оси ординат в *Scope*?
4. В какой момент запираются тиристоры плеч выпрямительного моста при активно-индуктивной нагрузке?
5. Почему $U_{cp}^* = 0$ при $\tau = \infty$ и $\alpha \geq 90$ для выпрямительного моста?
6. Как построить статическую характеристику для заданного блока средствами *MatLab*?
7. В какой части моделирования электропривода используют структурные модели?

РАЗДЕЛ 8 Моделирование управляемых выпрямителей

Методические указания. Ознакомиться с компонентами групп Sinks и Continuous с настройками *Scope Limit Data points to last*. ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2). Выполнить моделирование используя источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources;

Вопросы для самопроверки

1. Откуда в схеме управляемого выпрямителя берется фазовый сдвиг между напряжением питания и напряжением на нагрузке даже при чисто активной нагрузке?
2. Почему в опыте с управляемым выпрямителем при $R=0$ и значении управляющего сигнала 0 среднее напряжение на нагрузке отличается от двух других случаев?
3. Каким образом можно обеспечить автоматическое вычисление активных и реактивных мощностей АКД?
4. Библиотека Simulink. Компоненты групп Sinks и Continuous. Назначение, основные параметры блоков Display, Scope, XY graph, Transfer Fcn, Integrator. Привести примеры использования блоков.
5. Определите по характеристике $\eta = f(P_2)$ оптимальное значение отдаваемой в нагрузку мощности.
6. Почему рабочая характеристика $M = f(P_2)$ имеет такой вид?
7. Постройте виртуальную модель тиристорного выпрямителя. Используйте те блоки настройки для задания параметров источника питания, коммутации и снабберов.

РАЗДЕЛ 9 Моделирование транзисторных ШИП

Методические указания Необходимо ознакомиться с компонентами группы Electrical Sources и Machines. Выполнить моделирование машины используя источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources; ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2) измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement; исследуемую трехфазную синхронную машину *Permanent Magnet Synchronous Machine* из библиотеки Power System Blockset/Machines,

измеритель активной и реактивной мощности $P1$, $Q1$ из библиотеки Power System Blockset/Extras/Measurement;

блок измерения переменных состояния машины Machines *Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Machines;

блок *Display* для количественного представления измеренных мощностей (в трех первых окнах блока представлены активные мощности в каждой фазе машины, в трех последних - реактивные мощности);

Вопросы для самопроверки

1. Постройте виртуальную модель мостового транзисторного ШИП с R-L нагрузкой. Каким образом исследовать спектральный состав тока нагрузки?
2. Каким образом включается отображение сетки при построении графиков командой *plot* в *MatLab*?
3. Каким образом обеспечить вывод подписей к осям при построении графиков командой *plot* в *MatLab*?
4. Принципы моделирования двухполупериодного выпрямителя в *MatLab*..
5. Принципы моделирования автономного трехфазного инвертора в *MatLab*.
6. Принципы моделирования системы фазового управления выпрямителем в *MatLab*.
7. Принципы моделирования синхронного генератора в *MatLab*.
8. Принципы моделирования синхронного генератора в *MatLab*.
9. Какие блоки использовать для преобразования Кларка в модели управления ШИМ - инвертором?

РАЗДЕЛ10 Моделирование АИН

Методические указания Для этого необходимо ознакомиться с компонентами группы Electrical Sources и Machines. Выполнить моделирование машины используя источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources; ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2)

измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement;

исследуемую трехфазную синхронную машину *Permanent Magnet Synchronous Machine* из библиотеки Power System *Blockset/Machines*,

измеритель активной и реактивной мощности $P1$, $Q1$ из библиотеки Power System Blockset/Extras/Measurement;

блок измерения переменных состояния машины Machines *Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Machines;

блок *Display* для количественного представления измеренных мощностей (в трех первых окнах блока представлены активные мощности в каждой фазе машины, в трех последних - реактивные мощности);

Вопросы для самопроверки

1. Библиотека Simulink. Компоненты групп Sinks и Continuous. Назначение, основные параметры блоков Display, Scope, XY graph, Transfer Fcn, Integrator. Привести примеры использования блоков.
2. Принцип работы однофазного автономного инвертора. Применение ШИМ для улучшения качества выходного напряжения инвертора.
3. Принцип работы трехфазного мостового автономного инвертора.
4. Принцип работы управляемого выпрямителя. Работа схемы управления выпрямителем.
5. Пакет для математического моделирования *MatLab*. Интерфейс. Осуществление вычислений. Работа с векторами и матрицами.

6. Опишите принцип работы трехфазного мостового автономного инвертора, постройте временные диаграммы напряжения и тока в нагрузке, а также управляющих сигналов.
7. Для чего применяется широтно-импульсная модуляция управляющих инверторным мостом сигналов? Какой закон модулирования используется?

РАЗДЕЛ 11 Моделирование вентильной машины

Методические указания Для этого необходимо ознакомиться с компонентами группы Electrical Sources и Machines. Выполнить моделирование машины используя источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources; ..(Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А гл.2) измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement; исследуемую трехфазную синхронную машину *Permanent Magnet Synchronous Machine* из библиотеки Power System Blockset/Machines, измеритель активной и реактивной мощности *P1, Q1* из библиотеки Power System Blockset/Extras/Measurement; блок измерения переменных состояния машины *Machines Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Machines; блок *Display* для количественного представления измеренных мощностей (в трех первых окнах блока представлены активные мощности в каждой фазе машины, в трех последних - реактивные мощности);

Вопросы для самопроверки

1. Форма напряжения на выходе инвертора «ступенчатая». Почему форма тока в нагрузке имеет более сглаженный вид?
2. Как обеспечить моделирование вентиляторной нагрузки на валу АКД?
3. От чего зависит частота тока в обмотке ротора АКД?
4. Постройте качественно механическую характеристику АКД в двигательном режиме для двигателя, выбранного в соответствии с вариантом.
5. Назначение источника сигналов Sources для исследования электропривода в Simulink.
6. Какие типы моделей используются при моделировании полупроводниковых систем электропривода?