

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»  
(ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники

## **Математическое моделирование силовых электротехнических устройств**

**Учебно-методическое пособие  
для проведения практических занятий  
и самостоятельной работы**

Разработчик:  
профессор каф. ПрЭ  
С. Г. Михальченко

Томск 2018

## **Михальченко С.Г.**

Математическое моделирование силовых электротехнических устройств: Учебно-методическое пособие для проведения практических занятий и самостоятельной работы / С. Г. Михальченко; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 26 с.: прил. – Библиогр.: с. 21.

Настоящее руководство имеет целью получение профессиональных компетенций в области математического моделирования, исследования и создания интеллектуальных устройств силовой электроники, электротехнических комплексов и систем.

Руководство может быть использовано для проведения практических занятий как в контактной форме, так и в режиме самоподготовки.

Наличие вариантов индивидуальных заданий, контрольных вопросов и тестов позволяет использовать настоящее руководство для проведения контрольных работ и итогового тестирования.

Рекомендуется для организации самостоятельной работы студентов.

© Михальченко С.Г., 2018

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Цели и задачи дисциплины .....	4
1. Математическая модель импульсно-модуляционного преобразователя в базисе коммутационно-разрывных функций. Этапы синтеза структуры, математическое описание в условиях неопределенности.....	6
2. Построение решения математической модели импульсно-модуляционного преобразователя на участках непрерывности коммутационной функции. Виды модуляции, математическое описание обратной связи.....	7
3. Подходы линейного программирования для существенно нелинейных (жестких) систем. Методы решения экстремальных задач .....	8
4. Математическое описание компонентов электротехнических комплексов и систем. Электропривод .....	9
5. Методы анализа устойчивости (по Ляпунову) нелинейных систем с коммутационно-разрывными функциями. Теория бифуркаций. Теория хаоса .....	10
6. Математические основы моделирования переходных процессов в измерительных и управляющих системах. Синтез корректирующих звеньев в условиях нелинейных систем. Методы гармонического анализа .....	11
7. Асимптотические методы исследования математических моделей силовых преобразователей электрической энергии .....	12
8. Материально-техническое обеспечение дисциплины и требуемое программное обеспечение	13
9. Содержание оценочных материалов и методические рекомендации .....	14
Вопросы для самоподготовки .....	14
Тестовые задания для самопроверки.....	16
Список литературных источников .....	21
Учебно-методические пособия .....	23
Периодические издания.....	23
Варианты индивидуальных заданий .....	24

## ВЕДЕНИЕ

### Цели и задачи дисциплины

#### **Цели дисциплины:**

Формирование у обучающегося знаний в области математического моделирования электротехнических комплексов, устройств силовой электроники и принципов преобразования электрической энергии. Овладение навыками моделирования, разработки и проведения теоретических и экспериментальных исследований электротехнических систем, силовых преобразователей электрической энергии, создания новых преобразователей, систем их автоматики, управления и защиты, обладающих высокой энергетической эффективностью, технологичностью, безопасностью в эксплуатации, удовлетворяющих требованиям по защите окружающей среды.

#### **Задачи дисциплины**

- изучение средств математического моделирования законов преобразования электрической энергии, различных видов модуляции;
- формирование навыков синтеза математических моделей, планирования и проведения численных экспериментов и анализа полученных результатов;
- приобретение опыта интерпретации результатов моделирования и соотнесение их с данными теоретических и экспериментальных исследований силовых преобразователей электрической энергии;
- получение опыта создания новых силовых преобразователей, систем их автоматики, управления и защиты, с повышенными показателями энергоэффективности, технологичности, безопасности и экологичности.
- освоить навыки проектирования программных комплексов управления периферийными устройствами централизованных и распределенных систем;
- получить навыки проведения комплексной отладки и тестирования систем управления электротехнических комплексов и систем.

#### **Требования к результатам освоения дисциплины**

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

##### **– *знать:***

- принципы построения программных продуктов;
- основы алгоритмизации распределенных и централизованных систем;
- методы и средства физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования преобразователей электрической энергии;
- методы структурного и параметрического синтеза с применением средств компьютерного моделирования и сквозного проектирования устройств силовой электроники;
- численные методы, способы планирования и проведения вычислительного эксперимента, методы верификации результатов, способы интерпретации результатов и соотнесения их с данными физических экспериментальных исследований;
- методы бифуркационного анализа, представление о динамической устойчивости нелинейных систем преобразования энергии.

##### **– *уметь:***

- синтезировать математические модели физических объектов, в том числе импульсно-модуляционных преобразователей электрической энергии;
- проводить имитационное и компьютерное моделирование цифровых систем управления потоками энергии в преобразователе;
- математически описывать различные законы модуляции, управления с учетом методов мягкой коммутации полупроводниковых приборов;
- планировать численный эксперимент и исследовать физические объекты посредством имитационного моделирования;
- верифицировать и интерпретировать результаты и соотносить их с данными физических экспериментальных исследований;

- синтезировать алгоритмы управления электротехническими комплексами и системами; производить оценку эффективности алгоритмов управления;
- оценить устойчивость и надежность алгоритма;
- синтезировать системы электропривода с регуляторами и с наблюдателями.

– *владеть*

– средствами математического описания импульсно-модуляционных преобразователей электрической энергии посредством коммутационно-разрывных функций и модуляционных функций;

– программными средствами компьютерного моделирования и сквозного проектирования (САПР) электронных схем;

– методами нелинейной теории автоматического управления, бифуркационного анализа и анализа динамической устойчивости силовых преобразователей;

– средствами интерпретации полученных данных и анализа результатов.

– методами синтеза эффективных алгоритмов управления; навыками проведения комплексной отладки и тестирования алгоритмов управления компонентами электротехнических комплексов и систем;

– навыками синтеза и исследования систем электропривода с регуляторами и наблюдателями; методами и инструментами синтеза оптимальной МПСУ электропривода.

# 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В БАЗИСЕ КОММУТАЦИОННО-РАЗРЫВНЫХ ФУНКЦИЙ. ЭТАПЫ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Содержательная часть дисциплины, представленная на лекциях, посвящена теоретическому изучению следующего материала:

Математическая модель: термины, определения. Этапы синтеза модели: описание объекта, концептуальная постановка задачи, постановка математической задачи, выбор методов решения, алгоритмизация, проверка адекватности модели. Анализ результатов. Моделирование в условиях неопределенности. Теория нечетких множеств. Стохастические методы - проверка гипотез. Марковские процессы. Хаотизация.

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [2, 4, 9, 16, 26-29, 41-44].

## Практическая работа №1.

### *Построение математической модели силового преобразователя.*

#### **Ход работы:**

1. В соответствии с индивидуальным заданием, выдаваемым преподавателем из списка вариантов (Приложение - или предложенным по своему усмотрению, провести работу по проектированию структурной схемы силового преобразователя.
2. Синтез структуры силового преобразователя импульсно-модуляционного типа по индивидуальному заданию.
3. Формулировка ТЗ – задания на расчет входных и выходных параметров преобразователя электрической энергии: мощностные и частотные характеристики.
4. Рассмотреть режимы работы преобразователя, предусмотреть приборы (адаптеры) для согласования уровней и типов сигналов.
5. Разработать структурную схему аппаратной части силового преобразователя.
6. Построить систему дифференциальных уравнений, описывающих силовую цепь импульсно-модуляционного преобразователя.
7. Создать математическую модель законов управления коммутационными элементами схемы в виде временных циклов.

Выполнение практической работы завершается подготовкой отчета по практической работе, включающего математическую модель силовой цепи преобразователя по выбранному варианту индивидуального задания.

## **2. ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА УЧАСТКАХ НЕПРЕРЫВНОСТИ КОММУТАЦИОННОЙ ФУНКЦИИ. ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

Для изучения дисциплины в рамках лекций, необходимо освоить следующий материал:

Математическое описание импульсно-модуляционного преобразователя, схема замещения. Построение системы дифференциальных уравнений, описывающих силовую цепь импульсно-модуляционного преобразователя. Математическая модель системы управления. Коммутационные разрывные функции, математическое описание обратной связи. Виды модуляции: широтно-импульсная (ШИМ), амплитудно-импульсная (АИМ), фазово-импульсная (ФИМ), частотно-импульсная (ЧИМ, ЧШИМ), многозонная импульсная модуляция (МИМ) и др. Построение решения СДУ на участках непрерывности коммутационной функции. Алгоритмы поиска и уточнения моментов коммутации. Построение стробоскопического отображения по аналогии с Пуанкаре. Бифуркационная диаграмма.

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [3, 14, 15, 24, 30, 46, 48, 49, 51].

### **Практическая работа №2.**

#### ***Математическая модель импульсно-модуляционного звена***

#### **Ход работы:**

1. В соответствии с индивидуальным заданием и составленным выше ТЗ, провести работу по проектированию каналов импульсно-модуляционного управления работой коммутационных элементов силового преобразователя.
2. Построить математическую модель системы управления силовым преобразователем в базисе коммутационных разрывных функций.
3. Произвести математическое описание обратной связи, выбор и расчет регулятора методами теории автоматического управления для линеаризованной модели.
4. Обосновать выбор вида модуляции. Сформулировать алгоритм формирования импульсной последовательности.
5. Построить решения системы дифференциальных уравнений на участках непрерывности коммутационной функции.
6. Составить уравнения для поиска коммутационных точек, построить алгоритмы поиска и уточнения моментов коммутации.
7. Отработать алгоритм построения решений методом установления.
8. Подобрать необходимое время преобразования. Определиться с тактовой частотой МПСУ и остальными параметрами математической модели.
9. Произвести численный эксперимент по методу установления (численного анализа).
10. При необходимости построить имитационную модель преобразователя в известной САПР и произвести сравнение результатов.

Выполнение практической работы завершается подготовкой отчета по практической работе, который должен включать результаты расчетов и найденные режимы работы преобразователя по выбранному варианту индивидуального задания.

### 3. ПОДХОДЫ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ СУЩЕСТВЕННО НЕЛИНЕЙНЫХ (ЖЕСТКИХ) СИСТЕМ. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Начать изучение настоящего раздела, представленного на лекциях, необходимо с изучения следующего материала:

Математическое описание выпуклых множеств в Евклидовом пространстве. Теорема отделимости. Экстремальный анализ, достаточное условие оптимальности. Теорема Лагранжа. Теория линейного программирования, смешанные ограничения. Конечные методы решения задач линейного программирования. Вопросы устойчивости в математическом программировании. Метод штрафных функций. Метод покоординатной (одномерной) минимизации. Релаксационные процессы. Теоремы об оценках. Методы спусков и направлений. Ограничения. Градиентные методы. Метод множителей Лагранжа. Метод модифицированных функций Лагранжа.

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [1, 6, 7, 11, 35, 36, 47, 50].

#### Практическая работа №3.

##### *Решение оптимизационной задачи для нелинейной системы*

##### **Ход работы:**

1. Построить приближенное решение системы дифференциальных уравнений с разрывными (коммутационными) функциями методом установления при различном наборе параметров.
2. Произвести параметрический синтез преобразователя с точки зрения поиска оптимума по заданному перечню целевых функций.
3. Осмыслить принципы построения бифуркационной диаграммы при вариации параметров устройства.
4. Произвести оценку адекватности модели посредством сравнения расчетных параметров, вычислительных результатов и экспериментальных данных.
5. Построить стробоскопическое отображение системы уравнений импульсно-модуляционного преобразователя, по аналогии с отображением Пуанкаре.
6. Принять во внимание при моделировании тип импульсной модуляции и характер узловых точек.
7. Спланировать численный эксперимент по выявлению и классификации всех периодических движений –  $m$ -циклов.
8. Разработать алгоритм построения бифуркационной диаграммы, основывающийся на стробоскопическом отображении типа Пуанкаре.
9. Построить динамические характеристики – вычислить параметры переходных процессов при сбросе/набросе нагрузки.

Выполнение практической работы завершается подготовкой отчета по практической работе, который должен включать математическую модель, перечень всех найденных динамических режимов, бифуркационную диаграмму и переходные характеристики преобразователя по выбранному варианту индивидуального задания.



#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ. ЭЛЕКТРОПРИВОД

Содержательная часть дисциплины, представленная на лекциях, посвящена теоретическому изучению следующего материала:

Математическое описание объектов и систем. Векторно-матричное описание электротехнических комплексов. Электропривод (ЭП) как сложный электромеханический объект. Алгоритмы управления электроприводами – компонентами электротехнических комплексов и систем. Модальное управление. Оптимальное управление. Синтез модальных регуляторов. Синтез оптимальных регуляторов. Построение наблюдающих устройств. Построение электроприводов по принципу «объект-наблюдатель-регулятор».

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [5, 8, 13, 17-19, 25, 32-35, 50].

##### Практическая работа №4.

##### *Математическая модель электропривода*

##### Ход работы:

1. Получить индивидуальное задание на построение математической модели электропривода из списка вариантов. Если в индивидуальном задании отсутствует электропривод, то задание на проектирование ЭП выдается преподавателем дополнительно.
2. Провести работу по моделированию электромеханической части ЭП.
3. С учетом заданной точности позиционирования рабочего тела электропривода разработать СУ электроприводом.
4. Рассчитать статические и динамические характеристики электропривода.
5. Спроектировать регулятор, настроенный на тот или иной оптимум, в зависимости от требуемого характера движения рабочего тела: рассчитать корректирующее звено.
6. Рассмотреть вопрос модального ПИ-регулятора.
7. Проработать измерение переменных состояний в электроприводе.
8. Спроектировать наблюдающие устройства полного (или пониженного) порядка в структуре систем управления электроприводом.
9. Построить динамические характеристики скорости и нагрузочного момента при сбросе-набросе-реверсе нагрузки. Постановка и решение оптимальной задачи по точности электропривода.
10. Рассмотреть вариант решения оптимизационной задачи в условиях ограничения координат (скорости, тока якоря). Постановка и решение оптимальной задачи по быстрдействию системы.
11. Построение СУ с адаптацией к возмущению. Построение системы «Объект – астатическое наблюдающее устройство – регулятор с компенсационным каналом».
12. Построение системы управления электроприводом как адаптивной системы с переменной структурой.

Выполнение практической работы завершается подготовкой отчета по практической работе, который содержит расчет электропривода и его математическое моделирование в любой известной САПР по выбранному варианту индивидуального задания.

## 5. МЕТОДЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ (ПО ЛЯПУНОВУ) НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С КОММУТАЦИОННО-РАЗРЫВНЫМИ ФУНКЦИЯМИ. ТЕОРИЯ БИФУРКАЦИЙ. ТЕОРИЯ ХАОСА

Для изучения дисциплины в рамках лекций, необходимо освоить следующий материал:

Теория Ляпунова устойчивости движения. Анализ устойчивости для линейных систем (единственное решение). Концепция устойчивости движения для нелинейных систем - множественность решений, устойчивость каждого движения в отдельности. Построение стробоскопического отображения СДУ импульсно-модуляционного преобразователя, по аналогии с Пуанкаре. Алгоритм построения бифуркационной диаграммы. Решение для периодического движения -  $m$ -цикла. Построение мультипликаторов Ляпунова для основной матрицы  $m$ -цикла. Соотнесение поведения  $m$ -цикла и бифуркационных точек. Взаимозависимость решений СДУ между собой, сценарии потери и обретения устойчивости движения, хаотизация.

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [2, 8, 10, 12, 37-40].

### Практическая работа №5.

#### *Устойчивость импульсно-модуляционных преобразователей*

#### Ход работы:

1. В соответствии с ТЗ, провести работу по математическому моделированию преобразователя и анализа его устойчивости
2. Рассмотреть модель устойчивости каждого периодического движения ( $m$ -цикла) в отдельности. (Периодические движения найдены в ходе выполнения Практической работы № -
3. Построить мультипликаторы Ляпунова для основной матрицы каждого  $m$ -цикла. Проанализировать сценарии потери и обретения устойчивости каждым из периодических режимов преобразователя.
4. Соотнести полученные результаты с известными режимами бифуркационных переходов.
5. Построить описание поведения  $m$ -циклов вблизи бифуркационных точек.
6. Проанализировать взаимозависимость решений СДУ между собой, сценарии потери и обретения устойчивости движения, выявить элементы хаотизации.
7. Определить рабочую зону в пространстве параметров преобразователя, с точки зрения бифуркационного анализа.
8. Построить внутренние области притяжения  $m$ -циклов в фазовом пространстве и соотнести их с вероятной величиной внешних воздействий.
9. Рассчитать запас по устойчивости преобразователя.

Выполнение практической работы завершается подготовкой отчета по практической работе, который содержит результаты анализа устойчивости и бифуркационного анализа по выбранному варианту индивидуального задания.

## **6. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ. СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ. МЕТОДЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Начать изучение настоящего раздела, представленного на лекциях, необходимо с изучения следующего материала:

Математические основы моделирования переходных процессов в измерительных и управляющих системах. Синтез корректирующих звеньев в условиях нелинейных систем. Методы гармонического анализа. Спектральный анализ. Полиномиальная и квадратичная (для бигармонического сигнала) аппроксимация ВАХ. Представление выходного сигнала в виде рядов или интегралов Фурье. Тригонометрические ряды, преобразование Фурье, почти периодические функции, ряды Дирихле.

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [3, 4, 20-24, 31, 36-40, 49].

### **Практическая работа №6.**

*Теория автоматического управления сложными системами - переходные процессы, установление, устойчивость.*

#### **Ход работы:**

1. В соответствии с ТЗ, провести работу по анализу динамических процессов в преобразователе.
2. Провести моделирование переходных процессов в измерительных и управляющих системах в соответствии с вариантом.
3. Провести синтез корректирующих звеньев с учетом нелинейности системы.
4. Используя математические инструменты гармонического анализа, провести спектральный анализ найденных  $m$ -циклов.
5. Проверить адекватность модели, учитывая дрейф характеристик и помехи измерения.
6. Построить модель динамических погрешностей и внешних воздействий, включающих задачи управления.
7. Соотнести рабочую зону в пространстве параметров преобразователя с величинами предполагаемой деградации параметров.
8. Построить внутренние области притяжения  $m$ -циклов в фазовом пространстве и соотнести их с вероятной величиной внешних воздействий.
9. Произвести расчет надежности.

Выполнение практической работы завершается подготовкой отчета по практической работе, который содержит расчеты устойчивости, спектральный анализ режимов, расчеты погрешностей и расчет надежности преобразователя.

## 7. АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Содержательная часть дисциплины, представленная на лекциях, посвящена теоретическому изучению следующего материала:

Модель разделения движений регулярно возмущенных систем. Теорема Пуанкаре. Разделение движений в модели с малым параметром. Сингулярно возмущенные системы. Теорема Тихонова. Алгоритм разложения возмущенных систем. Интерпретация результатов моделирования с точки зрения синтеза нормальных структур преобразователя, имеющего единственный устойчивый  $m$ -цикл в рабочей области пространства параметров. Построение области нормального движения в пространстве параметров модели. Соотнесение результатов математического моделирования с данными теоретических и экспериментальных исследований силовых преобразователей электрической энергии. Создание нормальных структур силовых преобразователей, систем их автоматики, управления и защиты, с устойчивыми режимами работы и, как следствие, с повышенными показателями энергоэффективности, технологичности, безопасности и экологичности.

Для получения данного объема знаний необходимо изучить следующие литературные источники: [36-40, 49-51].

### Практическая работа №7.

#### *Асимптотические методы исследования динамики преобразователя*

#### **Ход работы:**

1. В соответствии с ТЗ провести работу по проектированию зоны нормальной работы преобразователя в пространстве параметров.
2. Построить область нормального движения рабочей точки в пространстве параметров модели силового преобразователя с точки зрения бифуркационного анализа.
3. Произвести синтез нормальных структур силовых преобразователей.
4. С учетом нормальности структуры спроектировать систему автоматики, управления и защиты силового преобразователя.
5. Произвести описание параметров и среды эксплуатации преобразователя, гарантирующих нормальный, устойчивый режим работы.
6. Определить для преобразователя показатели энергоэффективности, технологичности, безопасности и экологичности.
7. Произвести испытания или тестирование на эмуляторах.
8. Подготовить протокол испытаний (или эксперимента на эмуляторах).

*Итоговый отчет по курсу* складывается из отчетов по соответствующим практическим работам и защищается в конце второго семестра работы над проектом.

Итоговый отчет оформляется в соответствии с актуальными документами ГОСТ и ЕСКД и положениями ТУСУР.

## 8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ И ТРЕБУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Материально-техническое и программное обеспечение для практических занятий расположено в *Лаборатория робототехники и ЧПУ* кафедры ПрЭ ТУСУР, оно обеспечивается следующим технологическим оборудованием:

- Персональные компьютеры (5 шт.);
- Робот учебный УР7/3;
- Цифровой осциллограф DSO 3062A (4 шт.);
- Учебный лабораторный комплекс «Силовые цепи энергетической электроники» включает лабораторные стенды:
  - "Для исследования асинхронных электроприводов" (2шт.),
  - "Для исследования вентильных электроприводов" (2шт.),
  - "Для исследования электроприводов постоянного тока".

Лаборатория оснащена персональными компьютерами со следующим программным обеспечением:

- Adobe Acrobat Reader
- Far Manager
- Google Chrome
- LTspice 4
- LibreOffice
- Mathworks Matlab
- Mathworks Simulink 6.5
- Microsoft Visual Studio
- Microsoft Windows XP
- PTC Mathcad13, 14

## 9. СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Для оценки степени сформированности и уровня освоения закрепленных за дисциплиной компетенций используются оценочные материалы в составе:

### Вопросы для самоподготовки

1. Этапы синтеза модели: описание объекта, концептуальная постановка задачи
2. Постановка математической задачи
3. Выбор методов решения, алгоритмизация
4. Проверка адекватности модели.
5. Анализ результатов. Системный анализ.
6. Моделирование в условиях неопределенности.
7. Теория нечетких множеств.
8. Стохастические методы - проверка гипотез.
9. Марковские процессы.
10. Хаотизация.
11. Математическое описание выпуклых множеств в Евклидовом пространстве.
12. Теорема отделимости.
13. Экстремальный анализ, достаточное условие оптимальности.
14. Теорема Лагранжа.
15. Теория линейного программирования, смешанные ограничения.
16. Конечные методы решения задач линейного программирования.
17. Вопросы устойчивости в математическом программировании.
18. Метод штрафных функций.
19. Метод покоординатной (одномерной) минимизации.
20. Релаксационные процессы.
21. Теоремы об оценках.
22. Методы спусков и направлений.
23. Ограничения. Градиентные методы.
24. Метод множителей Лагранжа.
25. Метод модифицированных функций Лагранжа
26. Модели роста, хищник-жертва
27. Модели хаотических колебаний
28. Аттрактор Лоренца.
29. Регулятор. Задачи стабилизации.
30. Математические модели измерительной информации. Адекватность модели.
31. Дрейф характеристик, помехи измерения.
32. Модель динамических погрешностей.
33. Модель линеаризации.
34. Моделирование измерительной информации в реальном масштабе времени.
35. Модель разделения движений регулярно возмущенных систем.
36. Теорема Пуанкаре.
37. Метод Ван-дер-Поля.
38. Методы линеаризации, осреднения.
39. Разделение движений в модели с малым параметром.
40. Сингулярно возмущенные системы. Теорема Тихонова.
41. Алгоритм разложения возмущенных систем.
42. Задачи функционального проектирования управляемых систем преобразования энергии
43. Формализованное представление импульсно-модуляционного преобразователя энергии
44. Структура компьютерной модели управляемых систем преобразования энергии
45. Алгоритм автоматизированного эксперимента над сложными технологическими управляемыми системами

46. Назначение метода коммутационных разрывных функций
47. Методика построения решения системы уравнений, описывающих импульсно-модуляционную систему на участках непрерывности коммутационной функции
48. Алгоритм поиска моментов коммутации
49. Принципы построения импульсной последовательности для разных видов импульсной модуляции
50. Вычислительная модель сложной технологической управляемой системы
51. Принципы построения импульсной последовательности для разных преобразователей
52. Многоуровневая компонентная цепь сложной технологической управляемой системы
53. Методика формирования решения в узлах импульсной последовательности
54. Правила формирования математико-алгоритмических конструкций
55. Принцип, методика построения бифуркационной диаграммы
56. Методы анализа устойчивости решения нелинейного импульсного преобразователя
57. Построение стробоскопического отображения
58. Представление алгоритмов решения задач многовариантного анализа
59. Представление алгоритмов параметрической оптимизации
60. 21. Средства сопряжения многоуровневой компьютерной модели с реальным техническим (технологическим) объектом
61. Теория устойчивости Ляпунова для линейных и нелинейных систем
62. Концепция устойчивости Ляпунова для периодических решений. Устойчивость  $m$ -цикла.
63. Алгоритмы моделирования случайных величин.
64. Алгоритм моделирования случайного гауссовского вектора в задаче вычисления многомерного интеграла методом Монте Карло.
65. В чем состоит основная идея математического анализа устойчивости линейных и нелинейных систем?
66. В чем состоит метод описания импульсно-модуляционной системы при помощи коммутационных разрывных функций
67. Математические модели замкнутых следящих систем с нелинейным дискриминатором.
68. Система слежения за временным положением сигнала.
69. Анализу какого явления посвящена теория Ляпунова?
70. Система фазовой автоподстройки частоты.
71. Типы импульсной модуляции и их математические модели.
72. Методы статистической теории проверки гипотез в задаче экспериментальной оценки адекватности математических моделей.
73. Функциональные модели для комплексной огибающей сигнала.
74. Опишите процесс бифуркации сложной динамической системы. Как он связан с теорией устойчивости?
75. Опишите задачу моделирования случайной величины с заданной плотностью распределения вероятностей.
76. Типы математических моделей функциональных блоков силового преобразователя, сигналов и помех.
77. Опишите принципы формирования импульсной последовательности управления силовыми ключами.
78. Объясните свойства марковского случайного сигнала.
79. Запишите соотношения, определяющие математическую модель линейной динамической системы в форме системы разностных уравнений для переменных состояния.
80. Запишите соотношения, определяющие математическую модель линейной динамической системы на основе дискретной аппроксимации соотношения, определяющего связь выхода и входа этой системы во временной области.
81. Опишите механизм потери устойчивости сложной динамической системы.
82. Запишите соотношения, определяющие математическую модель линейной динамической системы на основе дискретной аппроксимации соотношения, определяющего связь выхода и входа этой системы в частотной области.

## Тестовые задания для самопроверки

1. Асимптотой математической модели называется
  - линейная модель в пределе приближающаяся к исходной;
  - прямая, стремящаяся к нулю на бесконечности;
  - математическая модель, сходящаяся с течением времени;
  - математическая модель, расходящаяся с течением времени.
2. Эксперимент, в котором задействуются только математические и/или имитационные модели, носит название
  - физического эксперимента;
  - математического эксперимента;
  - технического эксперимента;
  - вычислительного эксперимента.
3. Как называется процесс разбиения объекта или системы на взаимосвязанные элементы и установка характера связей между ними?
  - агрегирование;
  - декомпозиция;
  - идентификация;
  - постановка задачи моделирования.
4. Случайный процесс называется марковским, если:
  - для любого момента времени вероятностные характеристики процесса в будущем не зависят от его состояния в данный момент, а зависят от того, когда и как система пришла в это состояние;
  - для любого момента времени вероятностные характеристики процесса в прошлом зависят только от его состояния в данный момент и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние;
  - для любого момента времени вероятностные характеристики процесса в будущем зависят только от его состояния в данный момент и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние;
  - для будущего момента времени вероятностные характеристики процесса не зависят от его состояния в данный момент стационарный случайный процесс.
5. Процесс поиска значений параметров модели, при которых она адекватно описывает процессы, протекающие в реальном объекте, называется
  - повышением мобильности;
  - повышением быстродействия;
  - повышением адекватности;
  - повышением наглядности.
6. Устройства, осуществляющие измерение текущих значений наблюдаемых переменных, называются
  - измерительные устройства;
  - исполнительные устройства;
  - управляющие устройства;
  - возмущающие устройства.
7. Вид моделирования, предполагающий формирование и решение системы алгебро-дифференциальных уравнений, составленной из компонентных и топологических уравнений, называется
  - натурным моделированием;
  - математическим моделированием;
  - физическим моделированием;
  - имитационным моделированием.



8. Градиентные методы поиска экстремума основаны на
- интегрировании ошибки вычислений;
  - свойствах дифференциала системы уравнений;
  - суммировании ошибки по каждому направлению.
9. Устройства, осуществляющие энергетические воздействия на объект, пропорциональные сигналам устройства управления, носят название
- измерительных устройств;
  - исполнительных устройств;
  - управляющих устройств;
  - возмущающих устройств.
10. Методом Монте-Карло называют:
- численные методы решения математических задач при помощи моделирования дискретных величин;
  - аналитический метод решения математических задач при помощи системы дифференциальных уравнений;
  - численные методы решения математических задач при помощи моделирования случайных величин;
  - аналитический метод решения математических задач при помощи системы алгебраических линейных уравнений.
11. Модулем комплекса программ, осуществляющих интерпретацию модели с графического языка в машинный язык, является
- транслятор;
  - вычислитель;
  - интерпретатор;
  - редактор.
12. Системой массового обслуживания называют:
- системы, предназначенные для решения однотипных задач;
  - системы, предназначенные для многократного использования при решении однотипных задач;
  - системы, предназначенные для однократного решения однотипных задач;
  - системы, предназначенные для обслуживания облачных потребителей.
13. Почему для линейных систем рассматривается вопрос об устойчивости системы, а для нелинейных – устойчивости состояния (равновесия) системы или режима ее работы? Потому что для линейных систем (в отличие от нелинейных) справедлив принцип
- детерминизма;
  - адаптивности;
  - суперпозиции.
14. С точки зрения автоматизации систем управления существуют ли различия между терминами «управление» и «передача информации»?
- да, существуют;
  - нет, это синонимы.
15. Цель линеаризации математической модели состоит в
- сведении системы к первому порядку;
  - получении точного решения системы;
  - размыкании обратных связей замкнутой системы;
  - методе линейного программирования.
16. Соотношение понятий «оптимизация» и «адаптация» в теории управления состоит в следующем:
- эти понятия являются синонимами;
  - термин «оптимизация» является более общим по сравнению с понятием «адаптация»;
  - термин «адаптация» является более общим по сравнению с понятием «оптимизация»;
  - понятия «адаптация» и «оптимизация» соотносятся также как понятия «цель» и «средство».

17. Что является неотъемлемыми атрибутами задачи линейного экстремального анализа?
- модель, целевая функция, ограничения, выпуклость множества параметров;
  - модель, целевая функция, ограничения, начальные условия;
  - модель, целевая функция, выпуклость множества параметров;
  - модель, ограничения, выпуклость множества параметров, начальные условия.
18. Точное решение математической модели, описывающей динамику нелинейной системы при фиксированных параметрах
- всегда устойчиво;
  - никогда не устойчиво;
  - система может обладать как устойчивыми, так и неустойчивыми решениями.
19. Принципиальное отличие интеллектуальных систем управления от других типов САУ состоит в следующем:
- ИСУ обладают искусственным интеллектом;
  - ИСУ обладают свойством «интеллектуальности в малом»;
  - ИСУ обладают свойством «интеллектуальности в большом»;
  - внешняя среда для ИСУ является не только источником возмущений, но и источником информации.
20. Бифуркационным называется явление, в котором при изменении параметров системы происходит
- количественное изменение выходных значений сигнала по амплитуде;
  - количественное изменение выходных значений сигнала по фазе;
  - качественное изменение выходного сигнала по форме (топологии);
  - изменение будущего состояния сигнала в зависимости от изменения его в прошлом.
21. Переменными вектора состояния электропривода ТП–Д являются:
- скорость вращения двигателя, ЭДС двигателя, ток якорной цепи;
  - скорость вращения двигателя, ЭДС тиристорного преобразователя, ток якорной цепи;
  - скорость вращения двигателя, ЭДС тиристорного преобразователя, ток якорной цепи, момент двигателя.
22. К достоинствам модального управления можно отнести:
- возможность получить любое быстродействие «в большом»;
  - возможность получить любое быстродействие «в малом»;
  - возможность получить любое быстродействие при средних перемещениях.
23. К недостаткам модального управления можно отнести:
- желаемая динамика достижима только «в малом»;
  - желаемая динамика достижима только «в большом»;
  - желаемая динамика достижима только при средних перемещениях.
24. Модальный регулятор для электромеханического объекта пятого порядка предполагает введение:
- обратных связей по трем координатам или их оценкам;
  - обратной связи по одной координате или ее оценке;
  - обратных связей по пяти координатам или их оценкам.
25. Наблюдающее устройство полного порядка позволяет оценить в электроприводе:
- часть переменных состояния;
  - все переменные состояния;
  - неизмеряемые переменные состояния.
26. Наблюдающее устройство пониженного порядка:
- оценивает параметры электропривода;
  - фильтрует измеряемые переменные состояния;
  - оценивает неизмеряемые переменные состояния.
27. Недостатком введения в систему электропривода прямой связи по возмущающему воздействию

является:

- значительное влияние на динамику системы;
- невозможность в ряде случаев измерить или оценить возмущающее воздействие;
- значительное ухудшение реакции на возмущающее воздействие.

28. К достоинствам модального ПИ-регулятора можно отнести:

- возможность не ухудшать реакцию на задающее воздействие по сравнению с подчиненным регулированием;
- возможность полностью исключить влияние возмущения на работу электропривода;
- возможность в два раза уменьшить статическую ошибку по возмущающему воздействию.

29. Быстродействие наблюдателя по сравнению с быстродействием системы «объект-регулятор» рекомендуется выбирать:

- более низкое;
- аналогичное;
- более высокое.

30. Астатическое наблюдающее устройство для системы электропривода позволяет точно оценить:

- все переменные и возмущение только в динамическом режиме;
- все переменные и возмущение как в динамическом, так и в статическом режиме;
- все переменные и возмущение только в установившемся режиме.

31. Динамику системы электропривода можно настраивать на стандартную форму:

- Баттерворта;
- биномиальную;
- любую желаемую.

32. Параметрическая оптимизация системы электропривода предполагает определение:

- структуры и параметров регулятора;
- только структуры системы;
- только параметров регулятора.

33. Для синтеза оптимальных систем электропривода необходимо знать:

- динамические показатели качества управления;
- статические показатели;
- критерии качества.

34. Решение уравнения Риккати является основной процедурой при синтезе оптимальной системы управления электроприводом по:

- быстродействию;
- точности;
- расходу электроэнергии.

35. Оптимальной системой электропривода называется система:

- наилучшая;
- наиболее эффективная;
- наилучшая с точки зрения заданного критерия.

36. Адаптивные принципы построения системы электропривода применяются, когда:

- требуемые показатели качества невозможно обеспечить жесткими настройками;
- система многомерная;
- параметры системы в процессе работы незначительно изменяются.

37. Система электропривода с моделью-эталоном в скользящем режиме становится нечувствительной к изменению:

- параметров электропривода;
- нагрузочного момента;
- ошибок измерения.

38. Весовые коэффициенты в квадратичном функционале качества:

- выбираются из каталога;

- подбираются самостоятельно;
- определяются по формулам.

39. Если модальный регулятор рассчитывается исходя из настройки динамики системы электропривода на биномиальную стандартную форму, то наблюдатель для этой системы настраивается на стандартную форму:

- обязательно биномиальную;
- обязательно Баттерворта;
- любую.

40. При реализации модального регулятора ограничение тока обеспечить:

- невозможно;
- возможно;
- нет необходимости

## Список литературных источников

1. Теоретические основы автоматизированного управления: Учебник / Ехлаков Ю. П. - 2001. 338 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/668>
2. Морозов Виктор Михайлович, Системное моделирование и методы исследования математических моделей / Морозов В.М. - М. [Электронный ресурс]: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 243 с. 60x90 1/16 ISBN 978-5-906818-32-4 - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=544536>
3. Карманов Владимир Георгиевич, Математическое программирование [Электронный ресурс] [Электронный ресурс]: Учебное пособие / В. Г. Карманов. - 6-е изд., испр. - М. ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 264 с. - ISBN 978-5-9221-0983-3. - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=544747>
4. Учебное пособие «Основы математического моделирования» [Электронный ресурс]: Для направления подготовки 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» / Зариковская Н. В. - 2012. 247 с. - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/4601>
5. Компьютерное моделирование и проектирование [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Саликаев Ю. Р. - 2012. 94 с. - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/2548>
6. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах / Капля Е.В., Кузеванов В.С., Шевчук В.П. - М. [Электронный ресурс]: Физматлит, 2009. - 512 с. ISBN 978-5-9221-1131-7 - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=544737>
7. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов / Казарян М.Л., Музаев И.Д., Гиоева Е.Г. - М. НИЦ ИНФРА-М, 2018. - 150 с. 60x90 1/16 ISBN 978-5-16-106772-7 - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=972756>
8. Кобелев, Н. Б. Качественная теория больших систем и их имитационное моделирование [Электронный ресурс] [Электронный ресурс]: пособие для разработчиков имитационных моделей и пользователей / Н. Б. Кобелев. - М. Принт Сервис, 2009. - 85 с. - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=414753>
9. Учебное пособие «Основы математического моделирования»: Для направления подготовки 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» / Зариковская Н. В. - 2012. 247 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4601>
10. Компьютерное моделирование и проектирование: Учебное пособие / Саликаев Ю. Р. - 2012. 94 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/2548>
11. Учебное пособие «Математическое моделирование систем»: Для направления подготовки 230100.62 «Информатика и вычислительная техника» и 230400.62 «Информационные системы и технологии» / Зариковская Н. В. - 2014. 168 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4648>
12. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Сборник научных трудов / Казарян М.Л., Музаев И.Д., Гиоева Е.Г. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2018. - 150 с.: 60x90 1/16 ISBN 978-5-16-106772-7: В другом месте, <http://znanium.com/bookread2.php?book=972756>
13. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах / Капля Е.В., Кузеванов В.С., Шевчук В.П. - М.: Физматлит, 2009. - 512 с.: ISBN 978-5-9221-1131-7 [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=544737>
14. Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Дякин А.С., Семенов В.Д. Импульсно-модуляционные системы: Учебное пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2015. — 193 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ie.tusur.ru/docs/svd/ims.rar>
15. Иванчура, В. И. Быстродействующие импульсные стабилизаторы напряжения [Электронный ресурс] : монография / В. И. Иванчура, Д. В. Капулин, Ю. В. Краснобаев. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 172 с. - ISBN 978-5-7638-2317-2. : В другом месте, <http://znanium.com/bookread2.php?book=441448>
16. Энергетическая электроника: Учебное пособие / Семенов В. Д., Коновалов Б. И., Кобзев А. В. - 2010. 164 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/810>
17. Микропроцессорные устройства и системы: Учебное пособие / Русанов В. В., Шевелев

- М. Ю. - 2012. 184 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/867>
18. Основы микропроцессорной техники: Учебное пособие / Шарапов А. В. - 2008. 240 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/834>
19. Бородин К. В. Микропроцессорные устройства и системы : учебное пособие / К. В. Бородин. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2016. – 137 с.: В другом месте, [http://ie.tusur.ru/docs/bkv/mpus\\_up.pdf](http://ie.tusur.ru/docs/bkv/mpus_up.pdf)
20. Селяев А.Н. Электромагнитная совместимость устройств промышленной электроники: Учебное пособие. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2011. — 245 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ie.tusur.ru/docs/sva/ems.rar>
21. Учебное пособие : "Магнитные элементы электронных устройств" / Легостаев Н. С. - 2014. 186 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/4272>
22. Спектры и анализ: Учебное пособие / Татаринов С. А., Татаринов В. Н. - 2012. 323 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1490>
23. Электромагнитная совместимость РЭС: Учебное пособие / Козлов В. Г. - 2012. 147 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1277>
24. Нанoeлектроника: Учебное пособие / Дробот П. Н. - 2016. 286 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6436>
25. Шарапов А.В. Микропроцессорные устройства и системы : учебное пособие / А. В. Шарапов ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТМЦДО, 2008. - 152 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 18 экз.)
26. Воронин, Павел Анатольевич. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. - 2-е изд. - М. : ДОДЭКА-XXI, 2005. - 380[4] с. : ил. - Библиогр.: с. 374-379. - ISBN 5-94120-087-0 : 143.08 р. (наличие в библиотеке ТУСУР - 16 экз.)
27. Сукер, Кит. Силовая электроника. Руководство разработчика : Пер. с англ. / К. Сукер ; пер. : А. Н. Рабодзея. - М. : Додэка-XXI, 2007. - 251[5] с. : ил., табл. - (Силовая электроника). - Предм. указ.: с. 247-251. - ISBN 978-5-94120-173-0 : 192.00 р. (наличие в библиотеке ТУСУР - 16 экз.)
28. Саликаев, Ю. Р. Математические модели и САПР электронных приборов и устройств. Конспект лекций : учебное пособие / Ю. Р. Саликаев ; Министерство образования Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2007. - 165 с. : ил. (наличие в библиотеке ТУСУР - 97 экз.)
29. Электронная техника: Учебник / М.В. Гальперин. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: ИД ФОРУМ: НИЦ Инфра-М, 2013. - 352 с.: ил.; 60x90 1/16. ISBN 978-5-8199-0176-2: В другом месте, <http://znanium.com/bookread2.php?book=375623>
30. Техника высоких напряжений: Учебник / Важов В.Ф., Лавринович В.А. - М.:НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 256 с.: 60x90 1/16. ISBN 978-5-16-010565-9: В другом месте, <http://znanium.com/bookread2.php?book=561018>
31. Цифровые устройства и микропроцессоры: учеб. пособие: Учебное пособие / Микушин А.В., Сажнев А.М., Сединин В.И. - СПб:БХВ-Петербург, 2010. - 832 с. ISBN 978-5-9775-0417-1: В другом месте, <http://znanium.com/bookread2.php?book=350706>
32. Системы реального времени: технические и программные средства: Учебное пособие / Древис Ю.Г. - М.:НИЯУ "МИФИ", 2010. - 230 с. ISBN 978-5-7262-1310-1: В другом месте, <http://znanium.com/bookread2.php?book=560589>
33. Москаленко, В.В. Электрический привод: Учебник / В.В. Москаленко. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 364 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=443646>
34. Онищенко, Г.Б. Теория электропривода: Учебник / Г.Б. Онищенко. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 294 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=452841>
35. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т., Колоколов Ю. В. К анализу релейных САР тока в режимах электродинамического торможения высокоскоростных электропоездов // Электричество. - 1989. - №7. - С. 66 70.

36. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием. — Электричество, 1992, № 8.
37. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т., Колоколов Ю. В., Терехин И. В. К расчету локальной устойчивости периодических режимов в импульсных системах автоматического регулирования//Автоматика и телемеханика. - 1992. -№6. -С. 93 100.
38. Баушев В. С., Кобзев А. В, Михальченко Г. Я. Нормальные структуры устройств преобразования электрической энергии и автоматизация проектирования / Проблемы преобразования электрической энергии: Тезисы докл. междунар. конф. — М.: МЭИ; Ассоциация «АПЭМ», 1993.
39. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т., Михальченко С. Г. Стохастичность в динамике стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. – 1996. – № 3. – С. 69 75.
40. Баушев В. С., Кобзев А. В., Тановицкий Ю. Н. Нормальные структуры динамических объектов - В кн.: Аппаратно программные средства автоматизации технологических процессов . - Томск: Изд-во ТГУ. - 1997. -С. 146 152.

#### **Учебно-методические пособия**

41. Учебно-методическое пособие «Математическое моделирование»: Для студентов по направлению 210100 «Электроника и наноэлектроника» и 222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / Зариковская Н. В. - 2014. 103 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4607>
42. Электропитание ЭВМ: Исследование системы стабилизации напряжения на основе одноконтурного обратного преобразователя / Семенов В. Д., Русанов В. В., Коновалов Б. И., Мишуров В. С. - 2015. 21 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5775>
43. Электропитание ЭВМ: Исследование системы стабилизации напряжения на основе одноконтурного прямоходового преобразователя / Русанов В. В., Семенов В. Д., Мишуров В. С., Коновалов Б. И. - 2015. 24 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5771>
44. Энергетическая электроника: Учебно-методическое пособие / Семенов В. Д., Мишуров В. С. - 2007. 174 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/812>
45. Теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем: Учебно-методическое пособие по практическим, лабораторным и самостоятельным занятиям / Куксенко С. П. - 2016. 72 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6528>
46. Учебно-методическое обеспечение лабораторных работ. Коновалов Б.И., Мишуров В.С., Миллер А.В. Энергетическая электроника: Руководство к организации лабораторных и практических работ / Томск. гос. ун-т сист. упр. и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2012. – 388 с. : В другом месте, <http://ie.tusur.ru/docs/new/lab/ee/1.doc>
47. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Тановицкий, Юрий Николаевич. Системы автоматизированного проектирования электронных схем : Руководство к организации самостоятельной работы / Ю. Н. Тановицкий ; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники. - Томск : ТУСУР, 2007. - 49 с. : ил.: Библиотека ТУСУР,
48. Учебно-методическое обеспечение курсового проекта (работы). Энергетическая электроника: Методические указания и примеры выполнения курсового проекта / Мишуров В. С. - 2010. 148 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <http://edu.tusur.ru/publications/811>

#### **Периодические издания**

49. IEEE Transactions on Power Electronics / ISSN: 0885-8993 / Published by IEEE Power Electronics Society [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=63> (Impact Factor 7.15-
50. IEEE Transactions on Industrial Electronics / ISSN: 0278-0046 / Published by: IEEE Industrial Electronics Society [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=41> (Impact Factor 7.168)
51. Журнал "Силовая электроника": В другом месте, <http://power-e.ru/>

**ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ**

1. Исследование и разработка инверторов напряжения с ШИМ с пассивной фазой
2. Автоматизированный электропривод по системе пч-ад для волочильных станов и намоточных устройств стальной проволоки
3. Разработка и реализация на плис энергоэффективных способов импульсного управления системами «усилитель мощности -электродвигатель» на основе методов автоматизированного проектирования
4. Исследование и разработка трёхфазных активных выпрямителей с пофазным управлением
5. Векторный электропривод переменного тока с микропроцессорным управлением
6. Математическое моделирование эффективного управления электротехническими комплексами нефтяной отрасли
7. Разработка методики подбора силовых полупроводниковых приборов по комплексу параметров для формирования групповых последовательных цепей устройств силовой электроники
8. Энергоэффективность электротехнических комплексов государственных учреждений
9. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов
10. Управление сильноточными тиристорными преобразователями систем самовозбуждения синхронных генераторов при коротких замыканиях в энергосистеме и отказах параллельных вентильных ветвей
- 11.Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой
- 12.Повышение энерго- и ресурсоэффективности горных машин средствами регулируемого электропривода
- 13.Бифуркационный анализ нелинейных динамических систем полупроводниковых преобразователей модульного типа
- 14.Средства регулирования напряжения и мощности в системах электроснабжения с автономными источниками энергии
- 15.Расчета режимов судовых электроэнергетических систем
- 16.Ключевой элемент квазирезонансного преобразователя напряжения на основе МДП-транзистора
- 17.Энергоэффективность однодвигательных тяговых электроприводов автотранспортных средств
- 18.Многоуровневые полупроводниковые преобразователи частоты с емкостным делителем напряжения для автономных систем генерирования электрической энергии (Анализ и синтез)
- 19.Электротехнические системы карьерных экскаваторов
- 20.Моделирование статического компенсатора реактивной мощности и мощности искажений на базе каскадного многоуровневого инвертора
- 21.Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения
- 22.Повышение эффективности преобразовательных комплексов модульной структуры в условиях нестабильности питающей сети и нагрузки
- 23.Многосвязная система электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов
- 24.Разработка и исследование преобразователей частоты для установок электрического нагрева нефтескважин
- 25.Методы и технические испытаний электротехнического и технологического оборудования нефтегазодобывающих предприятий
- 26.Синтез схем автономных инверторов напряжения с улучшенным гармоническим составом выходного напряжения на основе эволюционного моделирования
- 27.Оборудование для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу



28. Топологические методы повышения эффективности работы беспроводных сетей в распределенных системах управления объектами промышленной электроники
29. Повышение эффективности электротехнических комплексов предприятий чёрной металлургии за счёт регулируемых компенсирующих устройств
30. Энергетически эффективные преобразователи частоты для двухчастотной индукционной тигельной плавки
31. Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования электромобилей
32. Адаптивная синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями
33. Повышение эффективности функционирования электрооборудования горных предприятий
34. Имитатор батареи солнечной для наземной отработки и испытаний систем электропитания космических аппаратов на основе импульсных преобразователей
35. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств
36. Разработка и исследование алгоритмов управления мощными полупроводниковыми фазоворотными устройствами для объектов единой национальной электрической сети России
37. Управление динамическим состоянием асинхронных электроприводов горных машин
38. Разработка и исследование методов мягкой коммутации в трехфазных автономных инверторах напряжения
39. Переходные процессы при замыканиях на землю, разработка методов и средств повышения надежности работы электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью
40. Трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения с ключами однонаправленного тока
41. Энерго-ресурсосберегающие технологии в топливно-энергетическом хозяйстве города на основе современного электропривода
42. Анализ и расчет корректоров коэффициента мощности на базе современных микросхем управления
43. Автоматизированный электропривод совмещенного прокатно-волоочильного проволочного стана
44. Динамика инвертирующего полупроводникового преобразователя с коррекцией коэффициента мощности Динамические процессы в источнике питания для сварки на переменном токе высокой частоты
45. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии
46. Исследование и разработка вариантов широтно-импульсной модуляции в трехфазных автономных инверторах напряжения с двигательной нагрузкой.
47. Расчет оптимальных технологических режимов силового привода подвижного состава по критерию минимума электропотребления
48. Синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения и предельными характеристиками по быстродействию и перегрузочным способностям
49. Силовые полупроводниковые выпрямители на базе многофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем
50. Электромеханические силокомпенсирующие тренажёры для подготовки космонавтов
51. Энергосберегающий электропривод на основе асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности

**Михальченко С.Г.**

Математическое моделирование силовых электротехнических устройств: Учебно-методическое пособие для проведения практических занятий и самостоятельной работы / С. Г. Михальченко; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра промышленной электроники – Томск: ТУСУР, 2018. – 26 с.: прил. – Библиогр.: с. 21.

© Михальченко С.Г., 2018

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018