

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Драгунов В.К.

« 16 » июня 2015 г.

Программа аспирантуры

Направление 13.06.01 Электро- и теплотехника

Направленность (специальность) 05.09.12 Силовая электроника

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

специальной дисциплины

«Силовая электроника»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ОД.2

Всего: 252 часа

Семестр 5, 144 часа, в том числе 6 часов – контактная работа,
138 часа – самостоятельная работа,

Семестр 6, 108 часов, в том числе 6 часов – контактная работа,
66 часов – самостоятельная работа,
36 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника, утвержденного приказом Минобрнауки России от 30.07.2014 г. № 878, и паспорта специальности, указанной в номенклатуре специальностей научных работников 05.09.12 Силовая электроника, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является освоение и исследование современных устройств силовой электроники и систем управления полупроводниковыми преобразователями.

Задачами дисциплины являются:

- освоение элементной базы силовых полупроводниковых преобразователей;
- освоение структур различных видов систем управления устройствами силовой электроники;
- экспериментальное исследование электромагнитных процессов в статических и динамических режимах работы устройств силовой электроники;
- математическое и схемотехническое моделирование устройств силовой электроники.

В процессе освоения дисциплины **формируются следующие компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

- способность следовать этическим нормам в профессиональной деятельности (УК-5);
- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6);
- владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1);
- владение культурой научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий (ОПК-2);
- способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности (ОПК-3);
- готовность организовать работу исследовательского коллектива в профессиональной деятельности (ОПК-4);
- владение методами анализа и синтеза устройств силовой электроники, в т.ч. современными отечественными и зарубежными пакетами программ для решения схемотехнических задач (ПК-2);
- способность к анализу тенденций развития современной элементной базы силовой полупроводниковой электроники (ПК-4).

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

знать:

- современную элементную базу силовых полупроводниковых приборов и устройств управления полупроводниковыми преобразователями с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников, информационных технологий (ОПК-2, УК-6);

– схемотехнические решения построения узлов устройств силовой электроники и современные достижения в данной области с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников, информационных технологий (ОПК-1, УК-5).

уметь:

– критически анализировать и оценивать современные научные достижения в области силовой электроники (УК-1, ОПК-4);

– анализировать состояние научной проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников (ОПК-3);

– применять методы расчета и моделирования силовых полупроводниковых преобразователей совместно с системой управления (ПК-4);

– разрабатывать алгоритмы управления и синтезировать структуры цифровой, аналоговой и смешанной системы управления силовыми полупроводниковыми преобразователями (ПК-2).

владеть:

– методами экспериментального исследования параметров и характеристик высоковольтных силовых полупроводниковых преобразователей (ОПК-3);

– программными средствами моделирования силовых полупроводниковых преобразователей (ПК-2);

– средой разработки программного обеспечения и языками программирования микропроцессорных систем управления устройствами силовой электроники (УК-1).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Полупроводниковые приборы

Основные свойства чистых и примесных полупроводников. Электропроводность чистых и примесных полупроводников. Токи в полупроводнике (дрейфовый и диффузионный). Подвижность носителей в

полупроводнике, ее зависимость от температуры, концентрации примесей и напряженности электрического поля. Зависимость удельного сопротивления примесного полупроводника от температуры. Механизм рекомбинации и время жизни носителей. Закон убывания концентрации носителей за счет рекомбинации. Уравнение непрерывности.

Электронно-дырочный переход, явления, возникающие при контакте металла с полупроводником. Полупроводники с различным типом проводимости. Зонная диаграмма p – n -перехода. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p – n -перехода, виды его пробоа.

Полупроводниковый диод, особенности его ВАХ. Температурные свойства параметров и характеристик диода. Разновидности диодов (стабилитроны, диоды Шоттки, туннельные диоды). Основные приемы конструирования и технологии изготовления диодов.

Биполярный транзистор. Устройство и принцип действия биполярного транзистора, анализ процессов в базе транзистора – характер движения носителей, влияние электрического поля, распределение концентрации неосновных носителей. Соотношение между токами электродов транзистора. Характеристики транзистора при включении по схемам с общей базой и общим эмиттером. Уравнение Эберса–Молла для статических ВАХ идеализированного транзистора. Мало сигнальная эквивалентная схема транзистора, влияние температуры, частоты и нагрузки на параметры эквивалентной схемы. Ключевой режим биполярного транзистора. Режим отсечки и насыщения. Анализ переходных процессов в транзисторе методом заряда. Конструирование биполярных транзисторов и элементы технологии их производства. Параметрические особенности биполярных транзисторов на большие мощности.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ). Устройство и принцип действия. Схема замещения и ВАХ БТИЗ, электрические и температурные параметры схемы замещения, требования к управляющим

сигналам. Особенности использования БТИЗ в технических устройствах и области их безопасной работы. Особенности IGBT и IGCT.

Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом. Устройство, принцип действия и ВАХ Транзисторы МДП-типа с встроенным и индуцированным каналом. Схемы замещения, параметры и характеристики полевых транзисторов.

Оптоэлектронные пары диод – диод, диод – транзистор. Оптоэлектронные приборы повышенной яркости – светодиоды. Схемы включения оптоэлектронных приборов.

Тиристоры. Структура и физические процессы в тиристорах. ВАХ тиристора. Переходные процессы включения и выключения в незапираемых (однооперационных) тиристорах. Предельные и классификационные параметры тириستоров. Асимметрично запирающие и обратнопроводящие тиристоры. Симисторы, фото- и оптронные тиристоры. Запираемые (двух операционные) тиристоры

Интегральные и гибридные микросхемы. Схемотехника и конструкция, типовые логические микросхемы. Серия микросхем на биполярных и полевых транзисторах.

Электромагнитные элементы силовой электроники. Трансформаторы, дроссели, реакторы. Конструктивные особенности и принципы использования высокочастотных ферритовых электромагнитных элементов. Электрорадиоизделия силовой электроники – конденсаторы, резисторы, светодиодные индикаторы.

Коммутационно-защитная аппаратура силовой электроники – быстродействующие предохранители, бесконтактные реле и коммутаторы, разъемы, провода и кабели.

Анализ электрических цепей с полупроводниковыми элементами

Электрические цепи и сигналы. Элементы электрических цепей (источники, потребители и накопители энергии), их параметры и характеристики. Электрическая схема и структурный граф цепи. Матрицы сечений и контуров, связь между ними. Коммутационные процессы в электрических цепях. Постоянные и гармонические токи и напряжения. Комплексная форма представления гармонического процесса в электрической цепи. Периодически изменяющиеся токи и напряжения, разложение сигнала на гармонические составляющие. Параметры и характеристики периодического тока. Модулированные сигналы и их дискретные частотные спектры. Непериодические токи и напряжения. Интеграл Фурье и непрерывные спектры электрических сигналов. Преобразование Лапласа и операторные изображения сигналов.

Установившиеся и переходные процессы в линейных цепях. Анализ установившихся режимов в резистивных цепях, исходные уравнения, способы их решения и проверки. Законы Кирхгофа, баланс мощностей. Гармонические и периодические режимы в линейных цепях с источниками, потребителями и накопителями энергии. Расчетные схемы с комплексными параметрами элементов. Активная, реактивная и полная мощность электрической цепи, мощность искажения. Законы коммутации и начальные условия, исходные алгебраические и дифференциальные уравнения состояния цепи. Классические методы решения дифференциальных уравнений (принужденный и свободный процессы в электрической цепи). Операторный метод анализа процессов в электрической цепи. Интегро-дифференциальные уравнения состояния цепи и ее эквивалентная операторная схема. Реакция электрической цепи на возмущение в виде ступенчатой, импульсной и произвольной функции времени. Пространство состояний электрической цепи, формирование систем алгебраических и дифференциальных уравнений состояний, методы аналитических и численных решений уравнений. Математическое моделирование электрических цепей.

Фильтрующие устройства в электрических цепях. Четырехполосники, их схемы, уравнения преобразования энергии. Эквивалентная схема активного четырехполосника. Характеристические параметры и условия согласования пассивного четырехполосника с источником энергии и нагрузкой. Последовательный и параллельный LC -контур, их резонансные и частотные характеристики. LC -фильтры, их характеристические параметры в полосах пропускания и демпфирования сигналов. Пассивные и активные RC -фильтры, их передаточные функции и частотные характеристики.

Установившиеся и переходные процессы в нелинейных цепях. Нелинейные цепи – ограничение и стабилизация тока и напряжения, выпрямление переменного тока, амплитудная модуляция гармонического сигнала. Цепи с управляемыми элементами – электронный усилитель, управляемый выпрямитель. Аналитические, графические и численные методы анализа переходных процессов в цепях с нелинейными элементами. Устойчивость режима постоянного тока в нелинейной цепи. Релаксационный генератор – электрическая схема генератора, условия существования устойчивого режима его работы. Условия возникновения гармонических колебаний в нелинейной цепи. Гармонический генератор – электрическая схема генератора, уравнения состояния и фазовый портрет.

Электронные цепи

Линейные усилители. Однокаскадные усилители на биполярных и полевых транзисторах. Обратные связи в усилителях, их влияние на параметры и характеристики усилителей. Устойчивость усилителя с обратной связью. Частотные и импульсные характеристики усилителей. Методы температурной стабилизации рабочего режима транзисторных усилителей. Операционные усилители. Использование операционных усилителей в схемах масштабирования, суммирования, интегрирования и дифференцирования электрических сигналов. Активные фильтры на основе операционных

усилителей и RC -цепей. Генераторы гармонических колебаний с колебаний с RC - и LC -цепями.

Диодные ключи, ограничители и фиксаторы уровня напряжения.

Транзисторные насыщенные ключи на биполярных транзисторах. Ненасыщенные ключи. Траектория рабочей точки при переключении транзистора. Влияние на траекторию рабочей точки характера нагрузки (R , RL , L , RC). Области безопасной работы. Ключи на полевых транзисторах. Схемотехника ключей на большие мощности. Энергия, рассеиваемая в транзисторах при переключении, основные приемы отвода тепла.

Импульсные схемы и стабилизаторы напряжения. Компараторы, одновибраторы, мультивибраторы и генераторы линейно изменяющегося напряжения на основе дискретных компонентов, операционных усилителей и логических интегральных схем. Параметрические стабилизаторы напряжения. Линейные (в том числе интегральные) стабилизаторы. Регуляторы и стабилизаторы напряжения и тока на полупроводниковых элементах, работающих в ключевых режимах.

Преобразовательная техника

Основные схемы одно- и трехфазных выпрямителей. Работа однофазных выпрямителей на активно-индуктивную, активно-емкостную нагрузки, на нагрузку, содержащую противо-ЭДС и индуктивность. Режим прерывистого тока. Трехфазный мостовой выпрямитель. Внешняя характеристика выпрямителя при различном числе одновременно работающих вентилях. Несимметричный (полууправляемый) выпрямитель, его регулировочная характеристика. Многофазные схемы выпрямления на основе последовательного или параллельного соединения выпрямителей. Взаимодействие выпрямителя с источником переменного тока. Первичные токи многофазных выпрямителей. Коэффициент мощности источника переменного тока при управляемом и неуправляемом режимах работы выпрямителя.

Способы повышения коэффициента мощности. Явление вынужденного подмагничивания трансформатора в одно- и трехфазных трансформаторных выпрямителях, способы устранения эффекта подмагничивания. Влияние анодных индуктивностей на работу выпрямителей.

Инверторы, ведомые сетью, и преобразователи частоты. Переход от выпрямительного режима к инверторному. Электрические процессы в инверторе, ведомом сетью, его регулировочная характеристика. Влияние анодных индуктивностей на работу инвертора, коэффициент его мощности, приемы повышения коэффициента мощности инвертора. Реверсивный преобразователь переменного-постоянного тока. Перекрестная и встречно-параллельная схемы преобразователя. Совместное и раздельное управление преобразователем. Особенности работы преобразователя на индуктивную нагрузку и индуктивную нагрузку с противо-ЭДС. Непосредственный преобразователь частоты. Одно- и многофазная схемы непосредственного преобразователя частоты, особенности его работы на активно-индуктивную нагрузку.

Импульсные преобразователи и регуляторы постоянного напряжения. Импульсные методы регулирования напряжения (тока) – широтно- и частотно-импульсное регулирование, метод позиционного слежения. Импульсные регуляторы I, II и III родов, их регулировочные характеристики. Транзисторные преобразователи напряжения с передачей энергии через трансформатор на интервале формирования импульса и во время паузы. Импульсные преобразователи постоянного напряжения на тиристорах с параллельной и последовательной двухступенчатой коммутацией.

Автономные инверторы и преобразователи на их основе. Автономные инверторы тока и напряжения, их сравнительная оценка. Автономный параллельный инвертор как пример инвертора тока, его внешняя характеристика. Стабилизация и регулирование выходного напряжения инвертора тока с помощью индуктивно-тиристорного компенсирующего устройства. Инвертор тока с отсекающими диодами. Одно- и трехфазные

инверторы напряжения, особенности их работы на индуктивную нагрузку, роль отсекающих диодов. Инвертор напряжения с одноступенчатой (прямой) коммутацией (схема Мак-Муррея–Бедфорда). Инвертор напряжения с двухступенчатой (непрямой) коммутацией. Электрические процессы в коммутационных узлах при последовательной и параллельной коммутации. Преобразователи частоты на основе инверторов напряжения и инверторов тока для частотно-управляемого электропривода. Параллельный и последовательный резонансные инверторы, токи и напряжения в инверторах при граничном режиме работы и в режиме с паузой. Резонансные инверторы с обратными диодами. Особенности работы тиристоров при принудительной коммутации – отпирание, запираение, коммутационные потери мощности, эффекты, связанные с изменением производных тока и напряжения в период коммутации. Преобразователи напряжения с звеном повышенной частоты.

Методы снижения коммутационных потерь в инверторах повышенной частоты – демпфирующие цепи, резонансная и квазирезонансная коммутация.

Методы улучшения спектрального состава выходного напряжения инверторов. Многофазные преобразователи со ступенчатой формой напряжения.

Системы управления преобразователями

Обработка информации. Количественная оценка информации. Виды сигналов. Характеристика аналоговых сигналов – спектры и функции распределения. Передача информации модулированными сигналами с гармоническим и импульсным носителями. Кодирование цифровых сигналов, виды цифровых кодов. Понятие о системах счисления, обратном и дополнительном кодах. Кодовые расстояния, избыточное кодирование, коды с обнаружением и исправлением ошибок. Способы цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразований. Преобразователи, основанные на последовательном счете, поразрядном уравнивании и считывании. Преобразователи временных интервалов: аналоговый сигнал – интервал, аналоговый сигнал – частота, интервал–код, частота–код.

Основы проектирования цифровых узлов и устройств. Коммутационные логические устройства. Логические функции, способы их описания, их реализации с использованием типовых логических элементов И, ИЛИ, И–НЕ, ИЛИ–НЕ. Дешифраторы, мультиплексоры, арифметические логические устройства – принцип их действия и особенности использования. Основные виды триггеров, построение счетчиков и регистров. Реверсивные счетчики. Емкость счетчика и управление ею. Регистры с последовательным и параллельным вводом и выводом информации. Автоматы на основе интегральных микросхем. Способы описания состояния автоматов, таблицы переходов и выходов. Кодирование входов, выходов и внутренних состояний автоматов. Противогоночное кодирование. Синтез узлов на основе типовых логических элементов. Виды полупроводниковых запоминающих устройств. Способы расширения адресного пространства и разрядности данных запоминающего устройства. Программирование ПЗУ, ОЗУ, РПЗУ. Полупроводниковое запоминающее устройство как многофункциональный логический элемент. Построение автоматов на основе программируемых ПЗУ с обратными связями.

Микропроцессорная техника систем управления. Программная реализация процедур сбора, вычислительных операций над информацией и управления. Структура микропроцессорной системы, ее составные части. Магистральный способ связи узлов. Магистрали данных, адреса управления. Функционирование микропроцессора при выполнении команд. Машинные циклы, слова состояния процессора. Виды команд. Переходы – выполнение подпрограмм, стек, прерывания и обработка прерываний, прямой доступ к памяти. Однокристалльные и разрядно-модульные микропроцессоры, однокристалльные микроЭВМ, периферийные устройства микропроцессорных систем (интерфейсы).

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины:

6 семестр – кандидатский экзамен.

Вопросы для самоконтроля и проведения кандидатского экзамена

1. Структура силового диода.
2. Динамика переключения диодного вентиля.
3. Однооперационный тиристор. Характеристики. Включение и выключение тиристора.
4. Двухоперационный тиристор. Области безопасной работы.
5. Базовые структуры мощных МДП транзисторов.
6. Схема замещения МДП транзистора.
7. Полевой и биполярный режим переключения транзисторов со статической индукцией.
8. IGBT. Эквивалентная схема замещения.
9. Режимы токовой перегрузки IGBT, методы повышения устойчивости к перегрузкам.
10. Базовые структуры ключей с электростатическим управлением.
11. Статический индукционный транзистор, схема замещения.
12. Индукционный тиристор (СИТ с модулируемой проводимостью), особенности переходного процесса выключения.
13. Варианты ФИУ по типу потенциальной развязки.
14. Способы питания ФИУ.
15. Варианты применения импульсного трансформатора в цепях управления.
16. Ключ с эмиттерной коммутацией на основе импульсного трансформатора.
17. Варианты трансформаторного ФИУ для мощного МДП-транзистора.
18. Трансформаторный ФИУ с широким диапазоном скважности.

19. Последовательное и каскадное соединение импульсных трансформаторов.
20. Оптронная развязка сигналов управления.
21. Схемотехника узлов согласования драйверов транзисторов.
22. Выходной узел драйвера биполярного транзистора.
23. Выходной узел драйвера с изолированным затвором.
24. Структурная схема драйвера запираемого тиристора.
25. Защиты от перегрузок по напряжению.
26. Защиты от короткого замыкания.
27. Защитная цепь для формирования траектории включения транзистора.
28. Защитные RCD-цепи.
29. Переключение при нулевом токе.
30. Переключение при нулевом напряжении.
31. Структуры со встраиваемыми силовых управляющих драйверов.
32. Импульсный преобразователь 1-го рода.
33. Импульсный преобразователь 2-го рода.
34. Обратногоходовой преобразователь.
35. Корректор коэффициента мощности.
36. Однофазный инвертор напряжения.
37. Трехфазный инвертор напряжения.
38. Структурная схема преобразователя для регулируемого электропривода.
39. Функциональные блоки системы управления в ведомых сетью преобразователей.
40. Функциональные блоки управления автономного инвертора напряжения.
41. Функциональные блоки управления преобразователями постоянного напряжения.
42. Влияние «мертвого времени» на выходное напряжение.
43. Влияние силовой части преобразователя на работу системы управления.
44. Классическая ШИМ в однофазных инверторах напряжения.
45. Классическая ШИМ в трехфазных инверторах напряжения.

46. Оценки показателей качества выходного напряжения и тока, специфические для ШИМ коэффициенты гармоник..
47. Зависимость коэффициента гармоник от коэффициента модуляции.
48. Многозонная ШИМ в многоуровневых инверторах.
49. ШИМ по трапецеидальному закону. Оценка качества выходного напряжения.
50. ШИМ с предмодуляцией третьей гармоники.
51. ШИМ с пассивной фазой.
52. Векторная ШИМ.
53. Активный сетевой фильтр на базе инвертора напряжения.
54. Условия генерации в сеть емкостной и индуктивной реактивной мощности..
55. Компенсация мощности искажения, граничная частота и ее зависимость от индуктивности дросселя и частоты коммутации.
56. Сетевые активные и гибридные фильтры на базе инверторов тока, их особенности и область применения..
57. Структура системы ШИМ управления корректором коэффициента мощности.
58. ШИМ управление матричными преобразователями.
59. Аналого-цифровое преобразование сигнала.
60. Критерий Найквиста. Теорема Котельникова.
61. Восстановление непрерывного сигнала по его цифровым отсчетам.
62. Дискретное преобразование Фурье.
63. Быстрое преобразование Фурье с прореживанием по времени.
64. Быстрое преобразование Фурье с прореживанием по частоте.
65. Обратное дискретное преобразование Фурье.
66. Нерекурсивные цифровые фильтры.
67. КИХ-фильтры с линейной ФЧХ.
68. Рекурсивные цифровые фильтры.
69. Устойчивость БИХ-фильтров.

70. Адаптивные фильтры.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Зиновьев Г.С. Основы 3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. Учебник для ВУЗов. – М.: Альянс, 2008. – 496 с. - ISBN 978-5-903034-34-5
2. Справочник по силовой электронике / Розанов Ю.К., Воронин П.А., Рывкин С.Е., Чаплыгин Е.Е. – М. Издательский дом МЭИ, 2014. – 472 с. - ISBN 978-5-383-00872-0
3. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. – М. из-во Техносфера, 2011, 576 с. -ISBN 978-5-94836-260-1
4. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин . – М. : Техносфера, 2006 . – 632 с. – (Мир электроники). - ISBN 5-948360-51-2

Дополнительная литература:

5. Силовая электроника : учебное пособие для бакалавров, по специальности "Промышленная электроника" / Г. С. Зиновьев, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ) . – 5-е изд., испр. и доп . – М. : Юрайт, 2012 . – 667 с. . - ISBN 978-5-9916-1972-1
6. Встраиваемые высокопроизводительные цифровые системы управления. Практический курс разработки и отладки программного обеспечения сигнальных микроконтроллеров TMS320x28xxx в интегрированной среде Code Composer Studio: учебное пособие / А.С. Анучин, Д.И. Алямкин, А.В. Дроздов и др.; под общ. Ред. В.Ф. Козаченко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 270 с. - ISBN 978-5-383-00471-5