

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник ОПКВК

В.П. Драгунов

2022 г.



ПРОГРАММА

кандидатского экзамена по специальности

2.4.1. «Теоретическая и прикладная электротехника»

Новосибирск - 2022 г.

Программа разработана на основании паспорта научной специальности 2.4.1. «Теоретическая и прикладная электротехника», утвержденного приказом Министерством науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. № 118.

Программа обсуждена на заседании кафедры ЭЭ,  
Протокол заседания кафедры № 8 от «29» сентября 2022 г.

Программа утверждена на заседании ученого совета факультета радиотехники и электроники, протокол № 10 от «23» ноября 2022 г.

Программу разработали:

Зав. каф. ЭЭ профессор, д.т.н. Харитонов С.А.

Профессор кафедры ЭЭ, д.т.н., профессор Зиновьев Г.С.

Профессор кафедры ЭЭ, д.т.н., доцент Баховцев И.А.



Ответственный за образовательную программу:  
профессор, д.т.н. Харитонов С.А.

## Введение

Программа составлена на основе образовательной программы по общим математическим и естественно-научным дисциплинам, и дисциплинам направления «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», связанным с особенностями анализа, синтеза и технического использования силовых электронных преобразователей и систем их управления.

### 1. 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 пробоя.

*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. Малосигнальная 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 тиристоров. 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.

## **2. 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.* Четырехполюсники, их схемы, уравнения преобразования энергии. Эквивалентная схема активного четырехполюсника. Характеристические параметры и условия согласования пассивного четырехполюсника с источником энергии и нагрузкой. Последовательный и параллельный  $LC$ -контуры, 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.

### 3. 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  $RC$ - 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, мультивибраторы, 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.

### 4. 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 различ-

ном 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 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.

## **5. 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-го-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 ЗУ. 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).

### **Основная литература**

Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. М.: Высш. шк., 1981.

Челноков В.Е., Евсеев Ю.А. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1975.

Толстов Ю.Г., Теврюков А.А. Теория электрических цепей. М.: Высш. шк., 1971.

Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. М.: Высш. шк., 1977.

Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. М.: Высш. шк., 1982.

Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977.

Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. М.: Высш. шк., 1981.

Забродин Ю.С. Промышленная электроника. М.: Высш. шк., 1982.

Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. М.: Энергия, 1972.

Алексеев А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. М.: Радио и связь, 1982.

Микропроцессоры. Кн. 1: Архитектура и проектирование микроЭВМ, организация вычислительных процессов /Под ред. Л.Н. Преснухина. М.: Высш. шк., 1986.

### **Дополнительная литература**

Епифанов Г.К. Физические основы микроэлектроники. М.: Сов. радио, 1975.

Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1980.

Теоретические основы электротехники /Под ред. П.А. Ионкина. Т. 1, 2. М.: Высш. шк., 1976.

Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высш. шк., 1981.

Гольденберг Л.М. Импульсные устройства. М.: Радио и связь, 1981.

Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982.

Полупроводниковые выпрямители / Под ред. Ф. И. Ковалева, Г.И. Мостковой. М.: Энергия, 1978.

Росанов Ю.И. Основы силовой преобразовательной техники. М.: Энергия, 1979.

Силовая электроника / Под ред. Р. Лампе; Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Бахтиаров Г.Д., Малинин В.В., Школин В.П. Аналого-цифровые преобразователи. М.: Сов. радио, 1980.

Микроэлектроника /И.Е. Ефимов и др. М.: Высш. шк., 1987.

## **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА**

кандидатского экзамена по специальности

2.4.1. «Теоретическая и прикладная электротехника»

по техническим наукам

## Введение

Дополнительная программа составлена на базе основной программы по кандидатскому экзамену и отражает требования к знаниям соискателя в области последних достижений в силовой электронике. Основная направленность программы - фундаментальные вопросы преобразования электрической энергии.

### **1. Методы анализа нелинейных электрических цепей с полупроводниковыми преобразователями электрической энергии.**

- 1 Численные методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).
  - 1.1 Численные методы решения систем ОДУ первого порядка.
  - 1.2 Метод конечных разностей решения краевых задач для ОДУ.
- 2 Решение систем "жестких" уравнений.
- 3 Численное решение нелинейных уравнений методом итераций.
- 4 Численное решение нелинейных уравнений методом Ньютона (одномерный и многомерный случай).
- 5 Метод гармонической линеаризации для расчета нелинейных электрических цепей.
- 6 Графоаналитические методы расчета нелинейных электрических цепей.
- 7 Основные прикладные программы для расчёта нелинейных схем при импульсном воздействии.
- 8 Аппроксимация нелинейных характеристик.
- 9 Неавтономные системы. Модели неавтономных систем. Фазовое пространство и стробоскопическое отображение.
- 10 Нелинейный резонанс в осцилляторе с диссипацией. Укороченные уравнения и резонансные кривые.
- 11 Понятия медленно и быстро протекающих процессов в условиях диссипации.
- 12 Элементы теории катастроф.
- 13 Динамические системы и бифуркации.
- 14 Нелинейные колебания.
- 15 Хаос и его свойства.
- 16 Методы анализа энергетических показателей устройств силовой электроники.

- a) Интегральный метод.
- b) Спектральный метод.
- c) Прямой метод.
- d) Метод геометрических аналогий.

17 Электромагнитная совместимость в устройствах СЭ.

## **2. Современные алгоритмы управления устройствами силовой электроники**

- 1 Векторные алгоритмы управления устройствами силовой электроники.
- 2 Искусственные нейронные сети. Применение нейросетевых и генетических методов в современных алгоритмах управления устройствами силовой электроники.
- 3 Fuzzylogic. Применение методов нечеткой логики в современных алгоритмах управления устройствами силовой электроники.
- 4 Суперкомплексные числа (кватернионы) их применение в алгоритмах управления устройствами силовой электроники.
- 5 Прогнозирующего управления (Predictive Control) в алгоритмах управления устройствами силовой электроники.

## **3. Современная элементная база силовой электроники**

- 1 Карбид кремниевые полупроводниковые приборы.
- 2 Нитрид галлиевые полупроводниковые приборы.
- 3 Арсенид галлиевые полупроводниковые приборы.
- 4 Молекулярные конденсаторы.
- 5 Наноградиентные материалы для электромагнитных устройств.

## **4. Современные области применения силовой электроники**

- 1 Энергетическая электроника (активные фильтры, компенсаторы реактивной мощности, накопители электрической энергии).
- 2 Возобновляемая энергетика (солнечная фотовольтаика, ветроэнергетика, малая гидроэнергетика).
- 3 Автономные системы силовой электроники (железнодорожный, автомобильный, авиационный, морской и речной транспорт).
- 4 Устройства силовой электроники в научном приборостроении.
- 5 Жилищно-коммунальное хозяйство.

## Литература основная

1. Основы силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы : учеб. пособие / [А. А. Богомяков и др.]; под ред. Ф. И. Ковалева, В. А. Усачева.— М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 247, [1] с.
2. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. — 2-е изд., испр. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 224 с.

## Литература дополнительная

1. Лоренц Л. Состояние и направление дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения силовых полупроводниковых приборов // Электротехника. 2002. № 1.
2. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002, - 320 с.
3. Зиновьев Г.С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, 1998. – 90 с.
4. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники, 4-изд. Новосибирск, НГТУ, 2009. - 672 с.
5. Коржов А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / А.В. Коржов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 70 с.
6. Интеллектуальные системы автоматического управления. / под ред. И.И. Макарова, В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001, - 576 с.
7. <http://epc-co.com/epc/Markets.aspx>;
8. Ashlee Vance. The Semiconductor Revolutionary. Bloomberg Business, 2015;
9. Федоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника НТБ № 2/2011;
10. Alex Lidow PhD, Johan Strydom, PhD. WP001 Gallium Nitride (GaN) Technology Overview. EPC, 2012.
11. Alex Lidow PhD. AN001 Is it the End of the Road for Silicon in Power Conversion?.EPC, 2011;
12. Alex Lidow PhD., David Reusch, PhD. AN017 Fourth Generation eGaN® FETs Widen the Performance Gap with the Aging MOSFET? EPC, 2014;

13. Alex Lidow PhD., David Reusch, PhD Johan Strydom, PhD. AN018 GaN Integration for Higher DC-DC Efficiency and Power Density. EPC, 2015;
14. Narendra Mehta. Application Report. SNVA723. Design Considerations for LM5113 Advanced GaN FET Driver During High-Frequency Operation. Texas Instruments, 2014;
15. <http://epc-co.com/>.
16. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
17. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MatLab 6.0. – М.: Диалог МИФИ, 2002. – 496 с.
18. Дифференциальные уравнения и процессы управления N 1, 2013 Электронный журнал, рег. эл. N ФС77-39410 от 15.04.2010 ISSN 1817-2172 <http://www.math.spbu.ru/diffjournal> e-mail: [jodiff@mail.ru](mailto:jodiff@mail.ru).
19. <http://torus.pp.ua/manuals/lessons/golubev/lecture39.html>.
20. <http://netkom.by/docs/N32-Elektromagnitnaya-sovmestimost.pdf>.