

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования "Пермский  
государственный национальный исследовательский  
университет"**

**Кафедра радиоэлектроники и защиты информации**

**Авторы-составители: Измestьев Игорь Васильевич  
Лунегов Игорь Владимирович  
Манцуpов Алексей Валерьевич**

**Рабочая программа дисциплины  
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
Код УМК 90415**

Утверждено  
Протокол №4  
от «24» июня 2021 г.

Пермь, 2021

## **1. Наименование дисциплины**

Схемотехническое моделирование

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина входит в вариативную часть Блока « Б.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление подготовки: **03.03.03** Радиофизика  
направленность Электроника, микро- и нанoeлектроника

### **3. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

В результате освоения дисциплины **Схемотехническое моделирование** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

**03.03.03** Радиофизика (направленность : Электроника, микро- и наноэлектроника)

**ОПК.3** Способен применять базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности, в том числе педагогической деятельности, для проведения научных исследований, анализа объектов, систем, процессов, явлений и методов, их экспериментального и теоретического (включая построение их качественных и количественных моделей) изучения и для использования полученных результатов на практике

#### **Индикаторы**

**ОПК.3.1** Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности

#### 4. Объем и содержание дисциплины

<b>Направления подготовки</b>	03.03.03 Радиофизика (направленность: Электроника, микро- и наноэлектроника)
<b>форма обучения</b>	очная
<b>№№ триместров, выделенных для изучения дисциплины</b>	11
<b>Объем дисциплины (з.е.)</b>	3
<b>Объем дисциплины (ак.час.)</b>	108
<b>Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе:</b>	42
<b>Проведение лекционных занятий</b>	14
<b>Проведение лабораторных работ, занятий по иностранному языку</b>	28
<b>Самостоятельная работа (ак.час.)</b>	66
<b>Формы текущего контроля</b>	Входное тестирование (1) Защищаемое контрольное мероприятие (3) Итоговое контрольное мероприятие (1)
<b>Формы промежуточной аттестации</b>	Зачет (11 триместр)

## **5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины**

### **Схемотехническое моделирование. Первый семестр**

Рассматриваются физико-математические основы алгоритмов и программ, применяемых при разработке схемотехнических САПР радиоэлектронных средств. Основное внимание уделено автоматизированному формированию уравнений с использованием теории графов и алгоритма узловых потенциалов. Рассматриваются численные методы решения таких уравнений в статическом и динамическом режимах работы различных аналоговых радиоэлектронных устройств. Значительное внимание уделяется изучению математических моделей различных полупроводниковых приборов и методов определения параметров этих моделей

#### **Тема 1. Математическое моделирование в радиоэлектронике**

За последние 40 лет программы автоматизации в области радиоэлектроники получили существенное развитие. Причем, автоматизация используется на всех иерархических уровнях от проектирования элементной базы до уровня разработки структуры радиосистемы, от проектирования отдельного транзистора до сложнейших микроконтроллеров и микропроцессоров. В данной теме дается обзор методов проектирования на различных уровнях сквозного проектирования. Рассматриваются свойства базовых элементов, применяемых на различных уровнях. Рассматриваются как физические основы, так и математические алгоритмы. Перечислены основные программы для профессионального сквозного проектирования радиосредств

#### **Тема 2. Формирование математической модели электронных схем на основе алгоритма узловых потенциалов**

Даны определения и рассмотрены основные свойства ориентированных и неориентированных графов, отражены методы представления их в матричной форме. На основе законов Кирхгофа записаны топологические уравнения. Определены базовые элементы радиосхем для моделирования на макроуровне. Дан вывод уравнения для узловых потенциалов, обсуждены вопросы, связанные с решением уравнения. Рассмотрен вопрос о сведении многополюсника к четырехполюснику, что позволяет достаточно быстро получить такие характеристики четырехполюсника, как комплексный коэффициент передачи, входное и выходное сопротивление.

#### **Тема 3. Схемотехническое моделирование в базисе переменных состояния**

Рассмотрены вопросы формирования правильного дерева графа электрической схемы, алгоритм формирования системы уравнений в базисе переменных состояния. Такой подход рассматривается как альтернатива методу узловых потенциалов, позволяющий моделировать радиосхему во временной и частотной областях

#### **Тема 4. Моделирование полупроводниковых приборов**

Первая электрофизическая и математическая модели биполярного транзистора была предложена Эберсом и Моллом в 1954 году. С тех пор многие ученые и инженеры занимались её совершенствованием. В настоящее время вопросы вполне адекватного математического моделирования обобщены и применяются в SPICE-совместимых профессиональных программах. Рассмотрению таких моделей на макроуровне и посвящена данная тема. Изучаются принципы моделирования полупроводниковых диодов, стабилитронов, биполярных и униполярных транзисторов. Операционные усилители для целей применения их в схемотехнике моделируются на более высоком суперуровне

#### **Тема 5. Моделирование процессов в радиоэлектронных устройствах в различных режимах работы**

Рассмотрен подход к часто применяемому схемотехническому моделированию в базисе узловых потенциалов. При моделировании на постоянном токе (статическое моделирование) уравнения как правило решаются методом Ньютона в сочетании с методом движущейся области сходимости. В

частотной области сначала выполняется статическое моделирование, осуществляется линеаризация схемы, а затем узловые потенциалы обычно рассчитывают методом Гаусса. Во временной области решение находят в результате применения дискретных схем замещения реактивных элементов схем. Статистическое моделирование с учетом разброса внутренних параметров выполняют методом Монте-Карло

#### **Тема 6. Пакеты программ автоматизации схемотехнического и сквозного проектирования**

С помощью информации, имеющейся в глобальной сети и литературных источниках студенты самостоятельно составляют обзор современных САПР, которые применяются при научных исследованиях и в электронной промышленности. Особое внимание уделяется программам сквозного проектирования Altium Designer и Cadence. При моделировании в учебной лаборатории студентам рекомендуется применять SPICE-совместимую свободно распространяемую программу MicroCAP

## **6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

## **7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

## 8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная:

1. Лапчик М. П., Рагулина М. И., Хеннер Е. К. Численные методы: учебное пособие для вузов / М. П. Лапчик, М. И. Рагулина, Е. К. Хеннер ; ред. М. П. Лапчик. - Москва: Академия, 2004, ISBN 5-7695-1339-X. - 384. - Библиогр.: с. 381
2. Головицына, М. В. Проектирование радиоэлектронных средств на основе современных информационных технологий : учебное пособие / М. В. Головицына. — 3-е изд. — Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 503 с. — ISBN 978-5-4497-0690-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/97578>

### Дополнительная:

1. Автоматизация схемотехнического проектирования: учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов / В. Т. Фролкин [и др.] ; ред. В. Н. Ильин. - Москва: Радио и связь, 1987. - 367.
2. Чуа Л. О., Лин П.-М. Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы): перевод с английского / Л. О. Чуа, П. -М. Лин ; ред. В. Н. Ильин ; пер. Е. С. Виленкин [и др.]. - Москва: Энергия, 1980. - 638.
3. Разевиг Всеволод Данилович Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V / Всеволод Данилович Разевиг. - М., 1997, ISBN 5-85954-069-8. - 273.
4. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Радиотехника" / А. А. Головков [и др.] ; ред. О. В. Алексеев. - Москва: Высшая школа, 2000, ISBN 5-06-002691-4. - 479. - Библиогр.: с. 473-475
5. Тугов Н. М., Глебов В. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / Н. М. Тугов, В. А. Глебов, Н. А. Чарыков ; ред. В. А. Лабунцов. - Москва: Энергоатомиздат, 1990, ISBN 5-283-00554-2. - 576. - Библиогр.: с. 566-567
6. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" направления "Проектирование и технология электронных средств" / Ю. Л. Муромцев [и др.]. - Москва: Академия, 2010, ISBN 978-5-7695-6256-3. - 3801. - Библиогр.: с. 376-378



## **9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

<https://www.radiosovet.ru> Библиотека радиолюбителя

<http://jre.cplire.ru/> ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

## **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Образовательный процесс по дисциплине **Схемотехническое моделирование** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем:

1. Visual Studio Community
2. Altium Desiner
3. MicroCap 8.0demo
4. Операционная система ALT Linux;
5. Офисный пакет приложений «LibreOffice».

SPICE-совместимое программное и методическое обеспечение для моделирования радиоэлектронных схем

При освоении материала и выполнении заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ ([student.psu.ru](http://student.psu.ru)).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).

система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.

система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

## **11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Лекционная аудитория.

Проектор, экран для проектора, доска маркерная/меловая, компьютер (ноутбук). Компьютерный класс с установленной схемотехнической САПР.

Аудитория для практических занятий. Компьютерный класс кафедры радиоэлектроники и защиты информации с техническим оснащением, представленным в паспорте.

Групповые (индивидуальные) консультации, мероприятия текущего контроля и промежуточной аттестации проводятся в аудитории, оснащенной презентационной техникой (проектор, экран для проектора, компьютер/ноутбук с соответствующим программным обеспечением), а также меловой (и) или маркерной доской

Помещение для самостоятельной работы.

Компьютерный класс кафедры радиоэлектроники и защиты информации и помещения библиотеки с персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной сетям

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютера с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине  
Схемотехническое моделирование**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции.  
Индикаторы и критерии их оценивания**

**ОПК.3**

**Способен применять базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности, в том числе педагогической деятельности, для проведения научных исследований, анализа объектов, систем, процессов, явлений и методов, их экспериментального и теоретического (включая построение их качественных и количественных моделей) изучения и для использования полученных результатов на практике**

<b>Компетенция (индикатор)</b>	<b>Планируемые результаты обучения</b>	<b>Критерии оценивания результатов обучения</b>
<p><b>ОПК.3.1</b> Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности</p>	<p>Владеть методами моделирования схем, входящих в состав радиоэлектронных средств. Знать физические принципы функционирования полупроводниковых приборов различных типов. Иерархические уровни представления их математических моделей. Адекватные и вполне адекватные модели, применяемые в различных схемотехнических САПР. Параметры SPICE-совместимых математических моделей полупроводниковых приборов и методы их определения.</p>	<p align="center"><b>Неудовлетворител</b></p> <p>Не владеет методами моделирования схем, входящих в состав радиоэлектронных средств. Не знает физические принципы функционирования полупроводниковых приборов различных типов. Не имеет представления: -о иерархических уровнях представления их математических моделей. -об адекватных и вполне адекватных моделях, применяемые в различных схемотехнических САПР. -о параметрах SPICE-совместимых математических моделей полупроводниковых приборов и методах их определения</p> <p align="center"><b>Удовлетворительн</b></p> <p>Общие, но не структурированные знания физических принципов функционирования полупроводниковых приборов различных типов; Имеет представление : -о иерархических уровнях представления их математических моделей. -об адекватных и вполне адекватных моделях, применяемые в различных схемотехнических САПР.</p> <p align="center"><b>Хорошо</b></p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания физических принципов функционирования полупроводниковых</p>

Компетенция (индикатор)	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
		<p style="text-align: center;"><b>Хорошо</b></p> <p>приборов различных типов. Сформированное представление - ерархических уровнях представления их математических моделей. -об адекватных и вполне адекватных моделях, применяемые в различных схемотехнических САПР</p> <p style="text-align: center;"><b>Отлично</b></p> <p>Хорошо сформированные нания физических принципов функционирования полупроводниковых приборов различных типов. Сформированное представление - о иерархических уровнях представления их математических моделей -об адекватных и вполне адекватных моделях, применяемые в различных схемотехнических САПР</p>

## Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : СУОС 2020

**Вид мероприятия промежуточной аттестации :** Зачет

**Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации :** Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

**Максимальное количество баллов :** 100

### Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 44 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 44 балла

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
<b>Входной контроль</b>	Тема 1. Математическое моделирование в радиоэлектронике <b>Входное тестирование</b>	проверка остаточных знаний по курсам: основы радиоэлектроники и численные методы
<b>ОПК.3.1</b> Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности	Тема 2. Формирование математической модели электронных схем на основе алгоритма узловых потенциалов <b>Защищаемое контрольное мероприятие</b>	Иерархические уровни моделирования в области радиоэлектроники. Моделирование радиоэлектронных схем в базисах узловых потенциалов и переменных состояния. Математическое обеспечение схемотехнических САПР.
<b>ОПК.3.1</b> Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности	Тема 3. Схемотехническое моделирование в базисе переменных состояния <b>Защищаемое контрольное мероприятие</b>	Матричный подход для формирования модели в базисе переменных состояния. Вывод уравнений на основе законов Кирхгофа. Алгоритмы решения уравнений для переменных состояния
<b>ОПК.3.1</b> Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности	Тема 4. Моделирование полупроводниковых приборов <b>Защищаемое контрольное мероприятие</b>	Физические принципы функционирования полупроводниковых приборов различных типов. Иерархические уровни представления их математических моделей. Адекватные и вполне адекватные модели, применяемые в различных схемотехнических САПР. Параметры SPICE-совместимых математических моделей полупроводниковых приборов и методы их определения.

<b>Компетенция (индикатор)</b>	<b>Мероприятие текущего контроля</b>	<b>Контролируемые элементы результатов обучения</b>
<b>ОПК.3.1</b> Применяет базовые знания в области математики, физики и других наук в профессиональной деятельности	Тема 6. Пакеты программ автоматизации схемотехнического и сквозного проектирования <b>Итоговое контрольное мероприятие</b>	Алгоритмы и методы расчета характеристик радиоэлектронных схем на постоянном токе. Анализ чувствительности. Алгоритмы и методы расчета частотных характеристик линейных четырехполюсников. Алгоритмы и методы расчета основных импульсных характеристик линейных четырехполюсников. Анализ нелинейных искажений сигналов. Расчет спектров импульсных сигналов.

### **Спецификация мероприятий текущего контроля**

#### **Тема 1. Математическое моделирование в радиоэлектронике**

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **0**

Проходной балл: **0**

<b>Показатели оценивания</b>	<b>Баллы</b>
При тестировании допущено менее 10% ошибок	81
При тестировании допущено менее 30% ошибок	61
При тестировании допущено менее 50% ошибок	41
При тестировании допущено более 50% ошибок	0

#### **Тема 2. Формирование математической модели электронных схем на основе алгоритма узловых потенциалов**

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **20**

Проходной балл: **9**

<b>Показатели оценивания</b>	<b>Баллы</b>
Вывод уравнения для узловых потенциалов.	5
Принципы алгоритмов узловых потенциалов и переменных состояния схемотехнического моделирования.	5
Применение теории графов в схемотехническом моделировании. Матричный подход к описанию электрических схем. Свойства полной и усеченной матриц инцидентности. Законы Кирхгофа в матричной форме.	5
Микро-, макро- и мега- иерархические уровни математического моделирования радиоэлектронных средств и виды их математического обеспечения.	5

### **Тема 3. Схемотехническое моделирование в базисе переменных состояния**

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **20**

Проходной балл: **9**

<b>Показатели оценивания</b>	<b>Баллы</b>
Определение токов и напряжений в результате решения уравнений для переменных состояния. Расчет выходных характеристик четырехполюсников в частотной и временной областях	10
Определение переменных состояния. Уравнения для переменных состояния и методы их решения	10

### **Тема 4. Моделирование полупроводниковых приборов**

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **20**

Проходной балл: **9**

<b>Показатели оценивания</b>	<b>Баллы</b>
Математическое моделирование транзисторов различных типов. Параметры математических моделей и методы их определения. Моделирование операционных усилителей на макро-уровне. Параметры математических моделей и методы их определения	10
Математическое моделирование полупроводниковых диодов и стабилитронов. Параметры математических моделей и методы их определения	10

### **Тема 6. Пакеты программ автоматизации схемотехнического и сквозного проектирования**

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **2 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**

Проходной балл: **17**

<b>Показатели оценивания</b>	<b>Баллы</b>
Расчет и анализ переходных процессов в радиоэлектронных схемах. Определение основных импульсных характеристик линейных четырехполюсников средствами САПР. Спектральный анализ континуальных сигналов. Расчет параметров нелинейных искажений	15
Расчет и анализ частотных характеристик линейных четырехполюсников. Нелинейные искажения и оценка их критериев	15
Алгоритмы решения уравнения для узловых потенциалов на постоянном токе. Анализ чувствительности	10