

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет  
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО  
решением президиума  
ученого совета ННГУ  
протокол от  
«31» мая 2023 г. № 6

**Рабочая программа дисциплины**

Методы численного моделирования полей в теории электронных приборов СВЧ  
(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования  
магистратура  
(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность  
03.04.03 радиофизика  
(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы  
Физическая электроника  
(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения  
очная  
(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2023 год

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
1	Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина «Методы численного моделирования полей в теории электронных приборов СВЧ» Б1.В.О5 относится к части ООП направления подготовки 03.04.03 «Радиофизика», формируемой участниками образовательных отношений.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции* (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине**	
<i>ПК-1.</i> Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники при решении задач своей профессиональной деятельности	<p><i>ПК-1.1.</i> Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач.</p> <p><i>ПК-1.2.</i> Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий.</p>	<p><i>Знать</i> теорему о полном токе, знать теорему Шокли-Рамо.</p> <p><i>Уметь</i> определять оптимальные параметры для работы усилителей и генераторов СВЧ диапазона длин волн.</p> <p><i>Владеть</i> навыками использования математического аппарата, применяемого в теоретической физике, электродинамике, электронике.</p>	<i>собеседование</i>
<i>ПК-2</i> Способен выполнять теоретические и экспериментальные	<i>ПК-2.1.</i> Анализирует современное состояние исследований в области микро- и нанoeлектроники,	<i>Знать</i> устройство и принцип действия мощных приборов СВЧ диапазона,	<i>собеседование</i>

<p>е исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области микро- и наноэлектроники, мощной электроники и оформлять их результаты</p>	<p>мощной электроники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов.</p> <p>ПК-2.2. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p> <p>ПК-2.3. Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР.</p> <p>ПК-2.4. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области микро- и наноэлектроники, мощной электроники.</p>	<p>причины увеличения ускоряющего напряжения в электронных приборах СВЧ.</p> <p><i>Уметь</i> применять метод полного тока, рассчитывать мощность и КПД приборов СВЧ диапазона.</p> <p><i>Владеть</i> навыками построения дисперсионных характеристик мощных приборов СВЧ диапазона.</p>	
<p><i>ПК-3</i> Способен разрабатывать и подготавливать составные части документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок</p>	<p>ПК-3.1. Использует знание нормативных документов для составления заявок, грантов, проектов НИР, применяет заданные требования и правила при оформлении рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях.</p> <p>ПК-3.2. Представляет результаты НИР академическому и бизнес-сообществу.</p> <p>ПК-3.3. Участвует в составлении и подаче конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика.</p>	<p><i>Знать</i> основные методы написания протоколов и отчетов по измерениям</p> <p><i>Уметь</i> оформлять рукописи, протоколы, отчеты</p> <p><i>Владеть</i> навыками оформления протоколов и отчетов</p>	<p><i>собеседование</i></p>

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>3 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b> <b>- занятия лекционного типа</b>	<b>32</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>29</b>
<b>КСР</b>	<b>45</b>
<b>Промежуточная аттестация – экзамен/зачет</b>	<b>экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточно й аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)			В том числе														Самостоятельная работа обучающегося, часы		
				Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы																
	Занятия лекционного типа			Занятия семинарского типа			Занятия лабораторного типа			Консультации			Всего							
																из них				
Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная			
1. Основные понятия электроники СВЧ	12			6											6			6		
2. Клитроны	12			6											6			6		
3. Лампы бегущей и обратной волны типа О (ЛБВ-О, ЛОВ-О)	12			5											5			8		
4. ЛБВ М-типа. Магнетрон	12			5											5			8		
5. Релятивистская	12			5											5			8		

высокочастотная электроника. Лазеры и мазеры на свободных электронах																		
6. Вакуумная микроэлектроника СВЧ	12		5										5			8		
<b>Промежуточная аттестация: экзамен</b>																		
<b>Итого</b>	108		32										32			45		

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

##### 5.1 Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые	Продemonstrированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания	Продemonstrированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами,	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без

	я от ответа	ошибки.	но не в полном объеме.	полном объеме, но некоторые с недочетами.	некоторые с недочетами.	выполнены все задания в полном объеме.	недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.  Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	<b>превосходно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
<b>зачтено</b>	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

### 5.2.1 Контрольные вопросы

Вопросы	Код формируемой компетенции
Понятие о наведенном токе в цепях электродов. Теорема о полном токе. Теорема Шокли - Рамо. Метод полного тока. Проводимость диода на СВЧ.	ПК-1
Статическое и динамическое управление электронным потоком. Скоростная модуляция электронного потока. Уравнение скоростной модуляции.	ПК-1
Устройство и принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона. Пространственно-временная диаграмма. Принцип работы многорезонаторного клистрона.	ПК-1
Отражательный клистрон. Устройство, пространственно-временная диаграмма.	ПК-1
Зоны генерации, стартовый ток и перестройка частоты отражательного клистрона.	ПК-1
Принцип действия ЛБВ-О. Свойства периодических замедляющих систем ЛБВ-О. Пространственные гармоники. Устройство ЛБВ.	ПК-2
Дисперсионное уравнение ЛБВ. Параметры дисперсионного уравнения. Свойства корней дисперсионного уравнения. Коэффициент усиления ЛБВ.	ПК-2
Нелинейные эффекты при группировке в ЛБВ. Зависимость коэффициента полезного действия ЛБВ от параметров дисперсионного уравнения. Способы увеличения КПД	ПК-2
Принцип действия лампы обратной волны. Дисперсионная характеристика замедляющей системы. Распределение поля и тока, электронная перестройка частоты.	ПК-2
Принцип действия, устройство и группировка электронов в ЛБВ-М.	ПК-2
Статический режим работы магнетрона. Электронное облако в негенерирующем магнетроне. Колебательные системы магнетронов, $\pi$ -вид колебаний. Группировка электронов и КПД магнетрона.	ПК-3
Принцип работы МЦР. Оценки оптимальных параметров.	ПК-3
Причины увеличения ускоряющего напряжения в электронных приборах СВЧ. ЭОС релятивистских приборов. Релятивистская ЛБВ, МЦАР и убитрон.	ПК-3
Конструкция и параметры решетки автоэмиссионных катодов на основе катодов Спиндта. Диод и триод с катодом Спиндта. Особенности устройства и работы ЛБВ О и М типов с катодами Спиндта.	ПК-3

### 5.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-1.

1. Пользуясь методом полного тока найти время пролета электрона в диоде в режиме ограничения тока пространственным зарядом.
2. Доказать, что в монотроне активная и реактивная проводимости электронного пучка  $Y_a(0)=Y_r(0)=0$ .

3. При какой частоте  $f$  в клистроне после прохождения первого резонатора отсутствует модуляция электронного пучка по скорости? Ускоряющее напряжение  $U_0=300$  В, зазор между сетками модулятора  $d=5$  мм.
4. Найти частоту  $f$ , при которой коэффициент взаимодействия электронов с полем резонатора в клистроне  $M=0.9$ , если  $d=5$  мм,  $U_0=400$  В.
5. На каком расстоянии  $x$  от 1-го резонатора в 2-резонаторном клистроне образуется наиболее плотный электронный сгусток, если  $\lambda=4$  см,  $U_0=4$  кВ,  $d=2$  мм,  $U_{1M}=150$  В.

### 5.2.3. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-2.

1. На каком расстоянии  $x$  от 1-го резонатора в 2-резонаторном клистроне надо поставить второй резонатор, чтобы получить максимальный КПД на второй гармонике рабочей частоты, если  $\lambda=8$  см,  $U_0=4$  кВ,  $d=6$  мм,  $U_{1M}=100$  В.
2. Найти связь между номером зоны генерации  $n$  и потенциалом  $U_{отр}$  отражателя в отражательном клистроне.
3. Найти величину параметра группировки и номер зоны генерации для отражательного клистрона при следующих параметрах:  $U_0=300$  В,  $U_{отр}=50$  В,  $f=500$  МГц,  $D=5$  мм,  $U_{1M}=40$  В,  $d=2$  мм.
4. Оценить, на каком расстоянии  $x$  от замедляющей системы надо пропускать электронный пучок, если  $\lambda=3$  см,  $U_0=1$  кВ.
5. Найти коэффициент усиления  $G$  в ЛБВ-О, если длина лампы  $L=10$  см,  $\lambda=3$  см,  $U_0=4$  кВ,  $R_c=10$  Ом,  $I_0=10$  мА, считая, что влиянием поля пространственного заряда можно пренебречь, а скорость электронного пучка равна холодной фазовой скорости волны.

### 5.2.4. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-3.

1. На сколько скорость электронного пучка должна превышать холодную фазовую скорость волны, чтобы в ЛБВ-О отсутствовала экспоненциально нарастающая волна?  $U_0=1$  кВ,  $R_c=40$  Ом,  $I_0=100$  мА. Полем пространственного заряда пренебречь.
2. В ЛБВ-О отношение ускоряющих напряжений при работе на 1-ой и 3-ей пространственных гармониках  $U_{01}/U_{03}=1.4$ . Определить постоянную распространения нулевой гармоники  $\beta_0$ , если период системы  $D=4$  мм.
3. Найти величину фазовой скорости в ЛБВ-М на границах полосы усиления, если  $\lambda=3$  см,  $I_0=3$  мА,  $R_c=50$  Ом, магнитное поле  $B=100$  Гс, потенциалы отрицательного электрода и замедляющей системы относительно катода соответственно  $U_1=-100$  В,  $U_2=900$  В, а расстояние между ними  $d=1$  см.
4. Найти фазовую скорость для  $\pi$ -вида колебаний в 24-резонаторном магнетроне, если  $\lambda=10$  см,  $R_a=5$  см. Чему примерно равно замедление и анодное напряжение?
5. Оценить оптимальные параметры гиротрона, если  $U_0=70$  кВ,  $\lambda=2.14$  мм,  $g=1$ .

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. - Теоретическая физика: учеб. пособие : в 10 т. Т. 8. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. - 664 с. – 10 экз.
2. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. - Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т. - М.: Физматлит, 2003-2 экз.
3. Электронные приборы СВЧ: [учеб. пособие для вузов по специальности "Электрон. приборы"]./Березин В. М. , Буряк В. С., Гутцайт Э. М., [и др.]. - М.: Высшая школа, 1985. - 296 с. - 43 экз.



б) дополнительная литература:

1. Электронные приборы сверхвысоких частот: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Радиофизика и электроника". / Андрушкевич В. С., Будников Н. П., Бочаров Е. П., Григорьев М. А., Жарков Ю. Д., [и др.]. - Саратов: Изд-во Сарат.- 42 экз.
2. Гайдук В. И., Палатов К. И., Петров Д. М. - Физические основы электроники сверхвысоких частот. - М.: Советское радио, 1971. - 600 с.-5 экз.

### **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: компьютеры, проектор, доска.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО ННГУ по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика».

Автор: профессор кафедры квантовой радиофизики и электроники Мануилов В.Н.

и.о. заведующего кафедрой Маругин А.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23