

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Владимирский государственный университет**  
**имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**  
**(ВлГУ).**

Институт информационных технологий и радиоэлектроники

УТВЕРЖДАЮ:

Директор института

  
Галкин А.А.

« 1 » 09 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Вычислительная электродинамика для пользователей САПР**

**направление подготовки / специальность**

11.03.01 Радиотехника

**направленность (профиль) подготовки**

Радиотехнические устройства и системы

г. Владимир  
2021

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины Вычислительная электродинамика для пользователей САПР является теоретическая подготовка пользователей современного программного обеспечения, предназначенного для расчета, моделирования и проектирования СВЧ структур современных радиотехнических систем.

Задачи: применение вычислительной электродинамики в задачах проектирования антенных решеток, антенн навигационных систем, антенн современных систем связи и устройств СВЧ.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина Вычислительная электродинамика для пользователей САПР относится к части, формируемой участниками образовательных отношений.

## 3. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине, в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	УК-1.1. Знает принципы сбора и обобщения информации. УК-1.2. Умеет соотносить разнородные явления и систематизировать их в рамках избранных видов профессиональной деятельности. УК-1.3. Владеет навыками научного поиска и практической работы с информационными источниками; методами принятия решений.	Знает основные уравнения, принципы и теоремы классической теории электромагнитного поля; свойства электромагнитных волн в свободном пространстве и закономерности их рассеяния на границе раздела сред и телах сложной формы, основные положения теории излучения. Умеет применять средства вычислительной электродинамики для моделирования и проектирования антенн и устройств СВЧ современных радиосистем. Владеет программными средствами вычислительной электродинамики, предназначенными для решения прикладных задач электродинамики	Опрос по пройденному теоретическому материалу. Тестовые вопросы. Практико-ориентированные задания.
ПК-3. Способен реализовать программы экспериментальных исследований, включая выбор технических средств и обра-	ПК-3.1. Знает принципы работы, устройство, технические возможности контрольно-измерительного и диагностического оборудования.	Знает способы реализации программ экспериментальных исследований волновых процессов с использованием средств вычислительной электродинамики. Умеет реализовывать программы экспериментальных исследований волновых процессов с использова-	Лабораторные работы с физическим и виртуальным оборудованием. Отчет по практической подготовке. Практико-ориентированные задания.

ботку результатов.	<p>ПК-3.2. Умеет использовать оборудование для диагностирования и устранения неисправностей, возникших при эксплуатации сложных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры.</p> <p>ПК-3.3. Владеет навыками устранения неисправностей, приводящих к возникновению неработоспособного состояния сложных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры.</p>	<p>нием средств вычислительной электродинамики.</p> <p>Владеет способами реализации программ экспериментальных исследований волновых процессов с использованием средств вычислительной электродинамики.</p>	
--------------------	--	---	--

#### 4. ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц, 108 часов.

##### Тематический план форма обучения – очная

№ п/п	Наименование тем и/или разделов/тем дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Контактная работа обучающихся с педагогическим работником					СРС	Формы текущего контроля успеваемости, форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	В форме практической подготовки	СРС		
1	Средства проектирования и программные продукты последнего поколения	8	1-2	2	2		1	2		
2	Граничные задачи электродинамики	8	3-4	2	2		1	2		
3	Теория цепей СВЧ	8	5-6	2		4	1	2	Рейтинг-контроль №1	
4	Метод моментов	8	7-8	2	2		1	2		
5	Метод конечных элементов	8	9-10	2	2		1	2		
6	Асимптотические методы электродинамики	8	11-12	2	2		1	2	Рейтинг-контроль №2	
7	Проектирование антенн с по-	8	13-14	2		4	1	2		

	мощью современных САПР									
8	Проектирование фазированных антенных решеток	8	15-16	2		4	1	2		
9	Проектирование полосковых устройств СВЧ	8	17	2		4	1	2		
10	Проектирование активных полосковых устройств СВЧ	8	18	2		4	1	4	Рейтинг-контроль №3	
Всего за 3 семестр:					20	10	20		22	Экзамен (36)
Наличие в дисциплине КП/КР						-				
Итого по дисциплине					20	10	20		22	Экзамен (36)

### Содержание лекционных занятий по дисциплине

Раздел 1. Средства проектирования и программные продукты последнего поколения.

Тема 1. Обзор программных средств.

Программные средства, построенные на базе вычислительной электродинамики. Отличительные особенности и их возможности.

Тема 2. Модули программных средств.

Интерфейс. Геометрические преобразования. Применение логических операций. Моделирование. Результаты моделирования.

Раздел 2. Граничные задачи электродинамики.

Тема 1. Общая характеристика граничных задач.

Параметры сред. Поверхности и граничные условия на них. Энергетические соотношения в электродинамике.

Тема 2. Излучение электромагнитных волн в свободное пространство. Симметрия в электродинамике, принцип зеркального изображения

Раздел 3. Теория цепей СВЧ.

Тема 1. Многополосники СВЧ.

Линии передачи и волноводы СВЧ. Собственные волны волноводов.

Тема 2. Свойства многополосников СВЧ.

Свойства недиссипативных и взаимных многополосников. Симметричные многополосники.

Каскадно - соединенные многополосники.

Раздел 4. Метод моментов.

Тема 1. Основная схема метода моментов.

Операторные уравнения и системы линейных алгебраических уравнений. Базисные и тестовые функции. Метод Бубнова - Галеркина и вариационные принципы.

Тема 2. Интегральные операторы электродинамики и интегральные уравнения.

Двумерный интегральный оператор для E-волн. Двумерный интегральный оператор для H-волн. Магнитные токи и интегральные уравнения для магнитных токов.

Тема 3. Источники в методе моментов.

Создание модели порта на примере микрополосковой линии.

Тема 4. Примеры использования метода моментов.

Дифракция плоской волны на металлической ленте. Лента конечной толщины. Неравномерное разбиение ленты. Гибридный метод: MOM плюс МФО. Анализ симметричной полосковой линии методом Галеркина.



Раздел 5. Метод конечных элементов.

Тема 1. Дискретизация пространства.

Сетка разбиения пространства. Примеры дискретизации.

Тема 2. Функционалы для электростатического и электромагнитного полей.

Постановка задачи. Стационарный функционал.

Тема 3. Базисные функции, интерполяционные формулы.

Линейная аппроксимация потенциала. Полиномиальная аппроксимация.

Тема 5. Вывод и решение СЛАУ.

Система линейных алгебраических уравнений для одного элемента разбиения. Объединение систем линейных уравнений в общую систему. Учет граничных условий.

Раздел 6. Асимптотические методы электродинамики.

Тема 1. Метод физической оптики.

Условия применения метода физической оптики. Отличительные особенности. Теорема эквивалентности. Излучение из открытого конца прямоугольного волновода. Излучение параболической антенны. Рассеяние плоской волны на металлическом цилиндре.

Тема 2. Геометрическая теория дифракции и метод краевых волн.

Общие замечания. Основные положения ГТД. Метод краевых волн.

Раздел 7. Проектирование антенн с помощью современных САПР.

Тема 1. Проектирование квадрифилярной спиральной антенны (КСА).

Постановка задачи. Согласование многоэлементных антенн без учета влияния схемы питания.

Расчет многовходовой антенны с учетом схемы питания. Компьютерное моделирование КСА.

Тема 2. Проектирование микрополосковой антенны с учетом тепловых потерь.

Постановка задачи. Методы учета потерь в металле. Расчет полосы рабочих частот и КПД антенны с потерями. Влияние ширины антенны на ее полосу и КПД.

Тема 3. Проектирование антенны для приемника систем GPS, ГЛОНАС.

Постановка задачи. Создание модели. Результаты компьютерного моделирования антенны.

Раздел 8. Проектирование фазированных антенных решеток.

Тема 1. Теория фазированных антенных решеток (ФАР).

Элементарная теория антенных решеток. Диаграмма направленности ФАР. Множитель решетки. Бесконечная ФАР.

Тема 2. Моделирование фазированной антенной решетки.

Особенности моделирования бесконечных ФАР. Создание структуры и установки решения для волноводной ФАР.

Раздел 9. Проектирование пассивных полосковых устройств СВЧ.

Тема 1. Электродинамические особенности полосковых устройств.

Разновидности полосковых линий передачи. Эквивалентные схемы полосковых линий. Модели полосковых линий.

Тема 2. Поля в окрестности острых кромок.

Условия Мейкснера. Идеально проводящий клин. Бесконечно тонкая проводящая полуплоскость. Проводник конечной толщины.

Тема 3. Метод Олинера.

Постановка задачи. Модель Олинера для полосковой линии. Модель Олинера для скачка ширины полосковой линии.

Тема 4. Проектирование полоскового фильтра

Создание модели фильтра. Назначение границ. Определение параметров материалов. Установки параметров частотного анализа структуры. Установки визуализации результатов расчета.

Раздел 10. Проектирование активных полосковых устройств СВЧ.

Тема 1. Расчет температурного режима в радиаторе микросхемы усилителя мощности СВЧ. Теоретические основы расчета распространения тепла. Граничные условия. Компьютерное моделирование.

### Содержание лабораторных занятий по дисциплине

Раздел 3. Теория цепей СВЧ

Многополосники СВЧ.

Раздел 7. Проектирование антенн с помощью современных САПР

Проектирование микрополосковой антенны.

Раздел 8. Проектирование фазированных антенных решеток.

Проектирование микрополосковых фазированных антенных решеток.

Раздел 9. Проектирование полосковых устройств СВЧ

Проектирование полоскового фильтра

Раздел 10. Проектирование активных полосковых устройств СВЧ.

Компьютерное моделирование температурного распределения в радиаторе микросхемы усилителя мощности СВЧ.

### Содержание практических занятий по дисциплине

Раздел 1. Средства проектирования и программные продукты последнего поколения  
Электродинамические методы FEM, FDTD. Особенности их использования.

Раздел 2. Граничные задачи электродинамики

Излучение электромагнитных волн в свободное пространство.

Раздел 4. Метод моментов

Моделирование логопериодической антенны методом моментов

Раздел 5. Метод конечных элементов

Моделирование диэлектрической антенны методом конечных элементов.

Раздел 6. Асимптотические методы электродинамики.

## 5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

### 5.1. Текущий контроль успеваемости

Рейтинг-контроль №1

#### Вариант 1

1. Для какого класса электромагнитных явлений справедлив закон полного тока в следующей форме:  $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j}^{\text{в}} d\vec{S}$ ;  $\text{rot} \vec{H} = \vec{j}^{\text{в}}$ ?

- 1) Стационарного;
  - 2) Нестационарного;
  - 3) Квазистационарного.
2. Как связано направление переноса мощности с ориентацией векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в плоской однородной волне?
- 1) Перпендикулярно плоскости расположения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ;
  - 2) Совпадает с вектором  $\vec{E}$ ;
  - 3) Совпадает с вектором  $\vec{H}$ .
3. Поясните физическое содержание задачи рассеяния плоской волны падающей на плоскую границу раздела сред.
- 1) Физический смысл основан на граничных условиях и условии излучения, согласно которому возбуждаемая поверхность порождает лишь уходящие от неё волны: отраженные и преломленные;
  - 2) Физический смысл решений основан на использовании леммы Лоренца и теоремы эквивалентности, согласно которым возбуждаемая поверхность порождает лишь уходящие от неё волны: отраженные и преломленные;
  - 3) Физический смысл решений основан на использовании принципа перестановочной двойственности и теоремы взаимности, согласно которым возбуждаемая поверхность порождает уходящие от неё волны: отраженные и преломленные.
4. Что понимается под плоской электромагнитной волной?
- Под плоской подразумевается волна, распространяющаяся вдоль линейной координаты и в любой фиксированный момент времени неизменная в плоскости, перпендикулярной этой координате:
- 1)  $\vec{P} = \vec{I}_z \dot{P}_z, \dot{E}_z = H_z = 0; \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0; \frac{\partial}{\partial z} \neq 0;$
  - 2)  $\vec{P} = \vec{I}_z \dot{P}_z, E_z, H_z \neq 0; \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \neq 0; \frac{\partial}{\partial z} = 0;$
  - 3)  $\vec{P} = \vec{I}_z \dot{P}_z, E_z = H_z = 0; \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \neq 0; \frac{\partial}{\partial z} = 0.$

### Вариант 2

1. Истоками (стоками) какого вектора электрического поля являются как свободные, так и связанные электрические заряды?
  - 1)  $\vec{E}$ ;
  - 2)  $\vec{D}$ ;

3)  $\bar{P}$ .

2. Различаются ли фазовая скорость и скорость распространения энергии для однородной плоской волны в средах без потерь и в поглощающих средах?

1)  $V_{\phi}|_{\sigma=0} > V_{\phi}|_{\sigma \neq 0}; V_z|_{\sigma=0} > V_z|_{\sigma \neq 0};$

2)  $V_{\phi}|_{\sigma=0} = V_{\phi}|_{\sigma \neq 0}; V_z|_{\sigma=0} = V_z|_{\sigma \neq 0};$

3)  $V_{\phi}|_{\sigma=0} < V_{\phi}|_{\sigma \neq 0}; V_z|_{\sigma=0} < V_z|_{\sigma \neq 0}.$

3. При каких условиях в задаче рассеяния плоской волны на границе раздела диэлектрических сред отсутствует отражённая волна?

1) при параллельной поляризации,  $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_1};$

2) при нормальной поляризации,  $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\mu_2/\mu_1};$

3) при круговой поляризации,  $\sin \varphi = n_2/n_1.$

4. Что такое элементарный электрический излучатель и каковы его направленные свойства?

1) линейный проводник с переменным электрическим током, длина которого  $l \ll \lambda;$   
 $F(\theta) = \sin \theta; F(\varphi) = 1;$

2) проводник с переменным электрическим током, длиной  $l \ll \lambda; F(\theta) = 1; F(\varphi) = \sin \theta;$

3) фрагмент фронта распространяющейся волны ( $\Delta S \ll \lambda^2$ );  $F(\theta) = (1/2)(1 + \cos \theta).$

### Вариант 3

1. Как выразить средний за период поток мощности через замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ , включающий сторонние источники?

а)  $P_{\Sigma \text{ср}} = R_{\sigma} \oint_S \dot{\mathbf{P}} dS;$

б)  $P_{\Sigma \text{ср}} = \oint_S \dot{\mathbf{P}} dS;$

в)  $P_{\Sigma \text{ср}} = \int_S \dot{\mathbf{P}} dS.$

2. В чем состоит главное различие волн в непоглощающих и поглощающих средах?

1)  $\sigma \neq 0: V_{\phi}, V_z, Z_c \sim f(\omega);$

2)  $\sigma = 0: V_{\phi}, V_z, Z_c \sim f(\omega);$

3)  $\sigma \neq 0: V_{\phi}, V_z, Z_c \neq f(\omega).$

3. При каких условиях в задаче рассеяния плоской волны на границе раздела диэлектрических сред отсутствует преломленная волна?



- 1)  $n_1 > n_2, \varphi > \varphi_{кр}$ ;
- 2)  $n_1 < n_2, \varphi > \varphi_{кр}$ ;
- 3)  $n_1 < n_2, \varphi < \varphi_{кр}$ .

4. В чем заключаются основные различия поля элементарного электрического излучателя в ближней и дальней зонах?

- 1)  $\gamma r \gg 1: \dot{E}_\theta, \dot{H}_\varphi \sim f(1/r); \dot{E}_\theta / \dot{H}_\varphi = Z_c, \dot{\Pi} = R_c \dot{\Pi};$
- 2)  $\gamma r \gg 1: \dot{E}_\theta, \dot{H}_\varphi, \dot{E}_r \sim f(1/r^n); n \geq 2, \dot{P}_r \approx \text{Im};$
- 3)  $\gamma r \ll 1: \dot{E}_\theta, \dot{H}_\varphi \sim f(1/rn); E_\theta / H_\varphi = Z_c; \dot{\Pi} = \text{Re} \dot{\Pi}.$

## Рейтинг-контроль №2

### Вариант 1

1. Всегда ли вектора напряженности и индукций коллинеарны?
  - 1)  $\vec{E} \parallel \vec{D}, \vec{H} \parallel \vec{B}$  в изотропных средах;
  - 2)  $\vec{E} \parallel \vec{D}, \vec{H} \parallel \vec{B}$  в анизотропных средах;
  - 3)  $\vec{E} \parallel \vec{D}, \vec{H} \parallel \vec{B}$  в гиромангнитных средах.
2. Могут ли электрические и магнитные составляющие поля плоской волны быть синфазны при распространении в поглощающей среде?
  - 1) Нет;
  - 2) Да;
  - 3) При действительном значении  $Z_c$ .
3. Что такое направляемые волны? Когда они являются поверхностными?
  - 1) Волна, распространяющаяся вдоль границы раздела; направляемая волна с экспоненциально убывающей в нормальном направлении к направляющей поверхности;
  - 2) Волна, распространяющаяся перпендикулярно границе раздела сред; волна экспоненциально убывающая в направлении распространения;
  - 3) Волна, распространяющаяся вдоль линейной координаты; волна с неизменными параметрами в плоскости перпендикулярной направлению распространения.
4. Как найти поле элементарного магнитного излучателя, используя принцип перестановочной двойственности?  
 В выражениях для поля элементарного электрического излучателя осуществить замены:
 

ны:

- 1)  $\dot{E} \leftrightarrow \dot{H}; j^z \leftrightarrow -j^m; \mu_a \leftrightarrow -\varepsilon_a;$
- 2)  $\dot{E} \leftrightarrow -\dot{H}; j^z \leftrightarrow -j^m; \mu_a \leftrightarrow -\varepsilon_a;$
- 3)  $\dot{E} \leftrightarrow \dot{H}; j^z \leftrightarrow -j^m; \mu_a \leftrightarrow \varepsilon_a.$

### Вариант 2

1. Какой характер будет иметь диэлектрическая проницаемость: среды неоднородной изотропной и среды однородной анизотропной?

- 1)  $\varepsilon=f(P); \varepsilon=||\varepsilon||;$
- 2)  $\varepsilon=f(P); \varepsilon=const;$
- 3)  $\varepsilon=||\varepsilon||; \varepsilon=f(P).$

2. Каким соотношением связаны поперечные составляющие плоской волны, распространяющейся в положительном направлении координаты Z?

- 1)  $\dot{H}_1 = 1/Z_c [\overline{1_z \dot{E}_1}];$
- 2)  $\dot{H}_1 = z_c [\overline{1_z \dot{E}_1}];$
- 3)  $\dot{H}_1 = z_c [\dot{E}_1 \overline{1_z}].$

3. В каких пределах лежит значение фазовой скорости направляемой поверхностной волны на границе раздела диэлектрических сред?

- 1)  $v_{01} < v_\phi < v_{02};$
- 2)  $v_{01} > v_\phi > v_{02};$
- 3)  $c < v_\phi < v_{02}.$

4. Как вычислить мощность излучения элементарного электрического и магнитного излучателей?

- 1)  $P_{\Sigma_{cp}} = \oint_S \bar{\Pi}_{cp} dS;$
- 2)  $P_{\Sigma_{cp}} = \int_S \bar{\Pi}_{cp} dS;$
- 3)  $P_{\Sigma_{cp}} = \int_V \bar{\Pi}_{cp} dV.$

### Вариант 3

1. Каким граничным условиям удовлетворяют нормальные и тангенциальные составляющие электромагнитного поля на границе раздела сред с различными электродинамическими параметрами?

- 1)  $E_{1\tau}=E_{2\tau}; H_{1\tau}=H_{2\tau}; D_{1n}=D_{2n}; B_{1n}=B_{2n};$
- 2)  $D_{1\tau}=D_{2\tau}; B_{1\tau}=B_{2\tau}; E_{1n}=E_{2n}; H_{1n}=H_{2n};$

$$3) E_{1\tau} = E_{2\tau}; H_{1n} = H_{2n}; D_{1n} = D_{2n}; B_{1n} = B_{2n}.$$

2. Как выглядит фазовый множитель плоской волны, распространяющейся в направлении  $Z$ , составляющем с осями декартовой системы координат углы  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ ?

$$1) e^{-jkz'} = e^{-jk(x\cos\varphi_x + y\cos\varphi_y + z\cos\varphi_z)};$$

$$2) e^{-jkz'} = e^{-jk(xtg\varphi_x + ytg\varphi_y + ztg\varphi_z)};$$

$$3) e^{-jkz'} = e^{-jk(x\sin\varphi_x + y\sin\varphi_y + z\sin\varphi_z)}.$$

3. Как связаны между собой фазовая скорость и скорость распространения энергии направляемой поверхностной волны, существующей на границе раздела диэлектрических сред?

$$1) v_\phi v_g = v_{01}^2;$$

$$2) v_\phi = v_g;$$

$$3) v_\phi v_g = v_{02}^2.$$

4. Что понимается под сопротивлением излучения элементарного электрического излучателя? Каков его физический смысл?

$$1) P_{\Sigma_{cp}} = I^2 R_\Sigma / 2; I^2 = const, R_\Sigma \uparrow \rightarrow P_{\Sigma_{cp}} \uparrow;$$

$$2) P_{\Sigma_{cp}} = U_m^2 / 2R_{\Sigma_{cp}}; U_m = const, R_{\Sigma_{cp}} \uparrow \rightarrow P_{\Sigma_{cp}} \downarrow;$$

$$3) P_{\Sigma_{cp}} = (R_\Sigma / 2) \oint_S |\dot{H}_{om}|^2 dS; R_\Sigma \uparrow \rightarrow P_{\Sigma_{cp}} \uparrow.$$

#### Вариант 4

1. Какие граничные условия выполняются на поверхности идеального проводника?

$$1) E_{1\tau} = 0; H_{1n} = 0;$$

$$2) E_{1n} = 0; H_{1\tau} = 0;$$

$$3) \dot{I}_\tau \dot{E}_{1\tau} = \dot{I}_n \dot{E}_1.$$

2. Определите поляризацию плоской волны, распространяющейся вдоль координаты  $Z$  и образованную наложением двух ортогонально поляризованных волн одного направления:

$$\dot{E}_m = \dot{E}_{m1} + \dot{E}_{m2} = (\dot{I}_x \dot{A} + \dot{I}_y \dot{B}) e^{-jkz}, \quad \text{если фазы волн совпадают}$$

$$(\dot{A} = A e^{j\varphi}, \dot{B} = B e^{j\varphi}):$$

$$1) \text{линейная};$$

$$2) \text{круговая};$$

$$3) \text{эллиптическая}.$$

3. Какие особенности наблюдаются в случае наклонного падения плоской волны из диэлектрика на плоскую идеально проводящую поверхность?
- 1) полное внутреннее отражение при любом угле падения;
  - 2) полное внутреннее отражение при  $\varphi > \varphi_{кр}$ ;
  - 3) полное внутреннее отражение при  $\varphi = \varphi_{Б}$ .
4. Что понимают под поверхностным сопротивлением проводника?
- 1)  $\dot{Z}_c, \dot{E}_0 = \dot{Z}_c \dot{J}^3$ ;
  - 2)  $\dot{Z}_c, \dot{E} = \dot{Z}_c [\dot{H}, \bar{1}_z]$ ;
  - 3)  $R_\Sigma, P_{\Sigma cp} = (I^2 \cdot R_\Sigma) / 2$ .

## Рейтинг-контроль №3

## Вариант 1

1. Какое соотношение можно рассматривать в качестве критерия деления сред на проводники и диэлектрики?
- 1)  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \gg 1$  – проводники;  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 1$  – диэлектрики;
  - 2)  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 1$  – проводники;  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \gg 1$  – диэлектрики;
  - 3)  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 0$  – проводники;  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} = \infty$  – диэлектрики.
2. Определить поляризацию плоской волны, распространяющейся вдоль координаты  $Z$ , и образованную наложением двух ортогонально поляризованных волн одного направления:  $\dot{E}_m = \dot{E}_{m1} + \dot{E}_{m2} = (\bar{1}_x \dot{A} + \bar{1}_y \dot{B}) e^{-jkz}$ , при одинаковых амплитудах ( $A = C$ ) и фазовом различии  $90^\circ$ :  $\dot{A} = A e^{j\varphi}$ ,  $\dot{B} = B e^{j(\varphi - 90^\circ)}$ .
- 1) круговая правая;
  - 2) круговая левая;
  - 3) эллиптическая;
3. Какие особенности имеет преломленная волна при падении плоской волны на границу поглощающей среды?
- 1)  $\varphi_n = \varphi_d$ ;
  - 2)  $\varphi_n = \varphi_0$ ;
  - 3)  $\varphi_n = \varphi$ ;



4. Зачем вводится понятие эквивалентного поверхностного тока? Каким образом определяется его величина?

1) для упрощения расчетов;  $\dot{\mathbf{J}}^{\text{э}} = [\mathbf{1}_n \dot{\mathbf{H}}_0]$

2) для уточнения расчетов;  $\int_{\Delta S} \dot{\mathbf{J}}^{\text{э}} d\mathbf{S} = \oint_L \dot{\mathbf{H}} d\mathbf{l}$ ;

3) для повышения достоверности;  $\dot{\mathbf{J}}^{\text{э}} = \sigma \dot{\mathbf{E}}$ .

### Вариант 2

1. Какой характерной особенностью с точки зрения распределения зарядов обладают среды с проводимостью отличной от нуля?

1)  $\rho^{\text{э}}(\mathbf{p}, t) = \dot{\rho}^{\text{э}}(\mathbf{p}, 0) e^{-(\sigma/\varepsilon_a)t}$ ;

2)  $\rho^{\text{э}}(\mathbf{p}, t) = \dot{\rho}^{\text{э}}(\mathbf{p}, 0) e^{(\sigma/\varepsilon_a)t}$ ;

3)  $\rho^{\text{э}}(\mathbf{p}, t) = \dot{\rho}^{\text{э}}(\mathbf{p}, 0) e^{(\varepsilon_a/\sigma)t}$ .

2. С какими особенностями связано распространение плоских волн в реальных диэлектриках?

1)  $tg\delta \ll 1$ ;  $\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \cdot (1 + tg^2 \delta/8)$ ;  $v_{\Phi} = v_{\text{э}} = v_0/(1 + tg^2 \delta/8)$ ;

$\alpha \cong \left(\frac{\sigma}{2}\right) \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$  - дисперсия выражена слабо;

2)  $tg\delta \gg 1$ ;  $\beta = \alpha = \omega \sqrt{\mu_0 \delta/2}$ ;  $v_{\Phi} = v_{\text{э}} = \sqrt{2\omega/\mu_0 \sigma}$ ;

$\lambda = 2\pi/\sqrt{f\mu_a \sigma}$ ; - дисперсия выражена сильно;

3)  $tg\delta = 0$ ;  $\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}$ ;  $v_{\Phi} = v_{\text{э}} = v_0$ ;  $\lambda = v_0/f$  - дисперсия отсутствует;

3. В чём состоит приближённость граничных условий Щукина-Леонтовича?

1)  $\bar{\mathbf{1}}_{1\tau} \dot{\mathbf{E}}_{1\tau} = \dot{\mathbf{z}}_{c2} [\bar{\mathbf{1}}_n \dot{\mathbf{H}}_1]$ ;  $\varphi_g \cong 0$ ;

2)  $\bar{\mathbf{E}}_2 = \dot{\mathbf{z}}_{c2} [\bar{\mathbf{1}}_n \dot{\mathbf{H}}_1]$ ;  $tg\varphi_g = \frac{k_2 \sin \varphi}{Re \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \varphi}}$

3)  $\dot{\mathbf{E}}_0^{\text{мп}} = \dot{\mathbf{E}}_0^{\text{пад}} T_{\perp(l)}$ ;  $\sin \varphi_n = k_1/k_2 \sin \varphi$ .

4. В чём физическая суть принципа эквивалентности?

Замена известного распределения поля на поверхности:  $\dot{\mathbf{E}}_s, \dot{\mathbf{H}}_s$  - распределением эквивалентных сторонних источников:

1)  $\dot{\mathbf{J}}^{\text{э}} = [\bar{\mathbf{1}}_n \dot{\mathbf{H}}^s]$ ;  $\tau^{\text{э}} = \varepsilon_a (\bar{\mathbf{1}}_n \dot{\mathbf{E}}^s)$ ;  $\dot{\mathbf{J}}^{\text{м}} = -[\bar{\mathbf{1}}_n \dot{\mathbf{E}}^s]$ ;  $\tau^{\text{м}} = \mu_a (\bar{\mathbf{1}}_n \dot{\mathbf{H}}^s)$ ;

- 2)  $\dot{J}^{\text{Э}} = [\bar{1}_n \dot{E}^{\text{Э}}]; \tau^{\text{Э}} = \mu_a (\bar{1}_n \dot{H}^{\text{Э}}); \dot{J}^{\text{М}} = [\bar{1}_n \dot{H}^{\text{Э}}]; \tau^{\text{М}} = \varepsilon_a (\bar{1}_n \dot{E}^{\text{Э}});$   
 3)  $\dot{J}^{\text{Э}} = [\bar{1}_n \dot{H}^{\text{Э}}]; \tau^{\text{Э}} = \mu_a (\bar{1}_n \dot{H}^{\text{Э}}); \dot{J}^{\text{М}} = [\bar{1}_n \dot{E}^{\text{Э}}]; \tau^{\text{М}} = \varepsilon_a (\bar{1}_n \dot{E}^{\text{Э}}).$

### Вариант 3

1. Может ли мощность сторонних источников быть отрицательной величиной?

- 1) да,  $P_{\text{ст}} < 0$ , если  $\bar{E} \dot{J}^{\text{ст}} > 0$ ;  
 2) да,  $P_{\text{ст}} < 0$ , если  $\bar{E} \dot{J}^{\text{ст}} < 0$ ;  
 3) нет,  $P_{\text{ст}} > 0$  – всегда.

2. С какими особенностями связано распространение плоских волн в реальных проводниках?

1)  $\text{tg} \delta \gg 1, \beta = \alpha = \sqrt{\omega \mu_a \sigma / 2}; v_{\phi} = v_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu_a \sigma}}; \lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{f \mu_a \sigma}}$  - дисперсия выражена сильно;

2)  $\text{tg} \delta \ll 1; \beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \cdot \left(1 + \frac{\text{tg}^2 \delta}{8}\right); v_{\phi} = v_{\text{Э}} = v_0 / \left(1 + \frac{\text{tg}^2 \delta}{8}\right); \lambda \cong (\sigma / 2) \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$  - дисперсия выражена слабо;

3)  $\text{tg} \delta = 0; \beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \left(1 + \frac{\text{tg}^2 \delta}{8}\right); v_{\phi} = v_{\text{Э}} = v_0, \lambda = v_0 / f$  - дисперсия отсутствует;

3. Как выглядят приближенные граничные условия Шюкина-Леонтовича?

1)  $\dot{I}_{\tau} \dot{E}_{1\tau} = \dot{z}_{\text{с2}} [\bar{1}_n \dot{H}_1];$

2)  $E_{1\tau} = E_{2\tau}; H_{1\tau} = H_{2\tau}; D_{1n} = D_{2n}; B_{1n} = B_{2n};$

3)  $(D_{1n} - D_{2n}) = \tau^{\text{Э}}; [\bar{1}_n \dot{E}_1] - [\bar{1}_n \dot{E}_2] = -\dot{J}^{\text{М}}; (B_{1n} - B_{2n}) = \tau^{\text{М}};$

$[\bar{1}_n \dot{H}_1] - [\bar{1}_n \dot{H}_2] = \dot{J}^{\text{М}}.$

4. Что собой представляет элемент Гюйгенса? Какими направленными свойствами он обладает?

1) элемент фронта распространяющейся волны:  $F(\theta) = (1/2)(1 + \cos \theta)$ ;

2) линейный проводник с переменным электрическим током, длиной  $l \ll \lambda$ ;  $F(\theta) = \sin \theta$ ;  
 $F(\varphi) = 1$ ;

3) рамочный проводник с переменным электрическим током, длиной  $l \ll \lambda$ ;  $F(\theta) = 1$ ;  
 $F(\varphi) = \sin \theta$ .

## 5.2. Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины

Вопросы к экзамену.

1. Дискретизация пространства и решения СЛАУ.
2. Граничные задачи вычислительной электродинамики.
3. Функционалы для электростатического и электромагнитного полей.
4. Метод конечных разностей во временной области.
5. Метод конечных разностей в частотной области.
6. Метод конечных элементов во временной области.
7. Метод конечных элементов в частотной области.
8. Метод моментов.
9. Метод физической оптики.
10. Геометрическая теория дифракции и метод краевых волн.
11. Метод матрицы линий передачи.
12. Геометрические преобразования. Использование логических операций.
13. Проектирование квадрифилярной спиральной антенны.
14. Проектирование микрополосковой антенны с учетом тепловых потерь.
15. Проектирование антенн для приемников систем GPS, ГЛОНАС.
16. Проектирование микрополосковой антенной решетки.
17. Проектирование рупорных антенн.
18. Проектирование фазированной антенной решетки.
19. Электродинамические особенности полосковых устройств.
20. Поля в окрестности острых кромок.
21. Метод Олинера.
22. Проектирование микрополосковых фильтров.

## 5.3. Самостоятельная работа обучающегося.

СРС с лекционными материалами.

Вопросы структурированные к СРС.

1. Введение. Место и назначение предмета в системе радиотехнических дисциплин, его основное содержание. Роль вычислительной электродинамики в радиотехнике и радиоэлектронике.
2. Электромагнитное поле и параметры сред. Векторы электромагнитного поля. Классификация сред. Графическое изображение полей. Потенциальные и вихревые поля. КОФ, ВА,  $2 \Rightarrow 3, 4$ ; КОФ - курс общей физики, ВА - векторный анализ, КЛ - конспект лекций. Литература: 6.1, [1] с. 12-25; КЛ с. 3-11.

3. Основные уравнения электродинамики. Первое уравнение Максвелла. Второе уравнение Максвелла. Третье уравнение Максвелла. Четвертое уравнение Максвелла. Уравнение непрерывности. Закон Ома в дифференциальной форме. Уточнение понятия о проводниках и диэлектриках в свете уравнений Максвелла. Классификация электромагнитных явлений. Уравнение Максвелла и сторонние токи. 2, 3=>4, 5, 6, 7, 8, 10. Литература: 6.1, [1] с. 25-38; КЛ с 11-23.
4. Граничные условия. Неприменимость уравнений Максвелла в дифференциальной форме на границе раздела двух сред. Граничные условия для векторов электрического поля. Граничные условия для векторов магнитного поля. Полная система граничных условий. Граничные условия на поверхности идеального проводника. 3, 4=>7, 8, 10. Литература: 6.1, [1] с. 40-48; КЛ с 23-31.
5. Энергия электромагнитного поля. Баланс энергии электромагнитного поля. Плотность энергии электромагнитного поля. Скорость распространения электромагнитной энергии. Уравнение Максвелла для монохроматического поля. Уравнение баланса для средней за период мощности. Комплексная мощность. Теорема единственности для внутренних и внешних задач электродинамики. 2, 5=>7, 10. Литература: 6.1, [1] с. 52-69; КЛ с. 31-49.
6. Волновые уравнения. Уравнение Гельмгольца. Электродинамические потенциалы для комплексных амплитуд. Решение неоднородных уравнений Гельмгольца. Уравнение Максвелла с учетом магнитных токов и зарядов. 2, 3, 4, 5, 6=>7, 10, 12. Литература: 6.1, [1] с. 75-86; КЛ с.49-62.
7. Плоские волны. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде. Плоские волны в однородной изотропной среде без потерь. Плоские волны в однородной изотропной среде с проводимостью, отличной от нуля. Поляризация волн. 2, 6, 7=>8, 9, 10, 12. Литература: 6.1, [1] с. 166-182; КЛ с.63-90.
8. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн. Волновые явления на границе раздела двух сред. Поле плоской волны, распространяющейся в произвольном направлении. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков. Условия полного прохождения волны во вторую среду. Полное отражение от границы раздела двух сред. Падение плоской волны на границу поглощающей среды. Приближенные граничные условия Щукина - Леонтовича. 2, 6, 7, 8=>10, 12. Литература: 6.1, [1] с. 183-204; КЛ с. 90-94.
9. Поверхностный эффект. Явление поверхностного эффекта. Потери энергии в проводнике. Эквивалентный поверхностный ток. Поверхностное сопротивление проводника. 6, 7, 8, 9=>10, 12. Литература: 6.1, [1] с. 205-212; КЛ с. 94-98.
10. Элементарные излучатели. Излучение электромагнитных волн. Элементарный электрический излучатель. Анализ структуры поля элементарного электрического излучателя. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя. Мощность излучения элементарного электрического излучателя. Элементарный магнитный излучатель. 2, 3, 5, 6, 10=>11, 12. Литература: 6.1, [1] с. 136-154; КЛ с. 98-110.
11. Основные теоремы электродинамики. Теорема единственности для внутренних и внешних задач электродинамики. Принцип перестановочной двойственности уравнений Максвелла. Лемма Лоренца. Теорема взаимности для элементарных излучателей. Эквивалентные источники электромагнитного поля. Принцип Гюйгенса - Кирхгофа. Элемент Гюйгенса. 2, 3, 5, 6, 10, 11=>12. Литература: 6.1, [1] с. 63-70, 149, 157-165; КЛ с. 111-121.
12. Основы теории дифракции электромагнитных волн. Строгая постановка задач дифракции. Дифракция плоской волны на круговом цилиндре. Приближение Гюйгенса - Кирхго-



фа. Геометрическая оптика. Геометрическая теория дифракции. Литература: 6.1, [1] с. 213-238; КЛ с. 122-136.

Фонд оценочных материалов (ФОМ) для проведения аттестации уровня сформированности компетенций обучающихся по дисциплине оформляется отдельным документом.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 6.1. Книгообеспеченность

Наименование литературы: автор, название, вид издания, издательство	Год издания	КНИГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ
		Наличие в электронном каталоге ЭБС
<b>Основная литература</b>		
1. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Сеницын. – М.: НИЦ Инфра-М; Мн.: Нов. знание, 2013. – 424 с. ISBN 978-5-16-006211-2	2013	<a href="http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972">http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972</a>
2. Муромцев Д.Ю., Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие / Д.Ю. Муромцев, Ю.Т. Зырянов, П.А. Федюнин. – М.: Изд. 2-ое. М.: «Лань», 2014. – 443 с. ISBN 979-5-8114-1637-0	2014	<a href="http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1_cid/68&amp;p/1_id=1107">http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1_cid/68&amp;p/1_id=1107</a>
3. Гаврилов В.М. Электродинамика и распространение радиоволн: лаб. практикум/ В.М. Гаврилов, Н.Н. Корнеева; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Изд. 2-е доп. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. – 100 с. ISBN 978-5-9984-1106-9.	2020	<a href="http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/8283">http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/8283</a>
4. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 256с. ISBN 978-58114-1122-1	2021	<a href="http://e.lanbook.com/reader//book/167874/">http://e.lanbook.com/reader//book/167874/</a>
<b>Дополнительная литература</b>		
1. Боков Л.А. Электродинамика и распространение радиоволн (электронный ресурс): учебное пособие / Л.А. Боков, В.А. Замотринский, А.Е. Мандель. – Электронные текстовые данные. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 301 с. ISSN 2227-8397	2012	<a href="http://www.iprbookshop.ru/13874.html">http://www.iprbookshop.ru/13874.html</a>
2. Электродинамика: Учебное пособие / И.Ф. Будагян, В.Ф. Дубровин, А.С. Сигов. - М.: Альфа-М: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 304 с. ISBN 978-5-98281-329-9	2013	<a href="http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337">http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337</a>
3. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE : учебное пособие / Курушин А. А. - Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2018. - 428 с. - ISBN 978-5-91359-288-0. - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента"	2018	<a href="https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785913592880.html">https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785913592880.html</a>
4. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2017. — 316 с. — ISBN 978-5-91359-236-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт].	2017	<a href="https://www.iprbookshop.ru/64934.html">https://www.iprbookshop.ru/64934.html</a>
5. Григорьев, А. Д. Методы вычислительной электро-	2013	<a href="https://e.lanbook.com/book/48301">https://e.lanbook.com/book/48301</a>

динамики / А. Д. Григорьев. — Москва : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2013. — 428 с. — ISBN 978-5-9221-1450-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.		
--	--	--

### 6.2. Периодические издания

Электродинамика, Техническая электродинамика, Радиофизика, Радиотехника и электроника.

### 6.3. Интернет-ресурсы

[http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972;](http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972)

[http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1\\_cid/68&p/1\\_id=1107;](http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1_cid/68&p/1_id=1107;)

<http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/6608;>

[http://www.iprbooksshop.ru/13874.html;](http://www.iprbooksshop.ru/13874.html)

[http://iprbooksshop.ru/13969;](http://iprbooksshop.ru/13969)

[http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337.](http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337)

## 7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для реализации учебного процесса по данной дисциплине имеется специальное помещение для проведения занятий лекционного, практического и лабораторного типов, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, для самостоятельной работы. Лекционные и практические занятия, лабораторные работы проводятся в лаборатории «Электродинамика и распространение радиоволн» (510-3). Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

- лабораторные макеты и измерительное оборудование специализированной лаборатории (510-3) : векторный анализатор цепей OBZOR1300 – 1шт; векторный анализатор цепей Rohde & Schwarz ZVB-4 – 1шт, измерительные антенны П6-23 – 2шт, измерительные антенны П6-59 – 2шт, автоматический измеритель P4-11 – 2шт;
- компьютеры со специализированным программным обеспечением LABVIEW в лаборатории (510-3)

Рабочую программу составил Дементьев В.К., старший преподаватель кафедры РТ и РС

Рецензент

ОАО «Владимирское КБ радиосвязи», Генеральный директор Богданов А.Е.

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры РТ и РС

Протокол № 13 от 26.06.19 года

Заведующий кафедрой Никитин О.Р.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

на заседании учебно-методической комиссии направления 11.03.01 Радиотехника

Протокол № 4 от 17.06.19 года

Председатель комиссии Никитин О.Р., заведующий кафедрой

### ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Рабочая программа одобрена на 20 20 / 20 21 учебный года

Протокол заседания кафедры № 1 от 31.08.20 года

Заведующий кафедрой

Рабочая программа одобрена на 20 21 / 20 22 учебный года

Протокол заседания кафедры № 1 от 30.08.21 года

Заведующий кафедрой

Рабочая программа одобрена на 20 22 / 20 23 учебный года

Протокол заседания кафедры № 1 от 20.08.22 года

Заведующий кафедрой

### ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

в рабочую программу дисциплины

Вычислительная электродинамика для пользователей САПР

образовательной программы направления подготовки 11.03.01 Радиотехника, направленность:

Радиотехнические устройства и системы (бакалавр)

Номер изменения	Внесены изменения в части/разделы рабочей программы	Исполнитель ФИО	Основание (номер и дата протокола заседания кафедры)
1			
2			

Заведующий кафедрой