

Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ  
директор ИСЭ СО РАН  
академик РАН



Н. А. Ратахин Н. А. Ратахин

« 24 » августа 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Электродинамика сверхвысоких частот»**

основных профессиональных образовательных программ высшего образования —  
программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по направлениям подготовки кадров высшей квалификации

№ п/п	Направление подготовки	Наименование ОПОП (профиль подготовки)	Место дисциплины в учебном плане
1	03.06.01 Физика и астрономия	Физическая электроника	Вариативная часть, обязательная дисциплина
2		Электрофизика, электрофизические установки	Вариативная часть, дисциплина по выбору
3	11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи	Вакуумная и плазменная электроника	Вариативная часть, дисциплина по выбору



# 1. Общая характеристика дисциплины

## 1.1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Перечень основных профессиональных образовательных программ высшего образования — программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлениям подготовки кадров высшей квалификации, в учебные планы которых входит данная дисциплина, и ее место в учебном плане обозначены на титульном листе настоящей рабочей программы.

Дисциплина изучает вопросы электродинамики с более подробным рассмотрением высокочастотных электромагнитных колебаний и волн. На основе уравнений Максвелла последовательно рассматриваются статические поля и постоянный ток, электромагнитные волны в открытом пространстве, свободные и вынужденные колебания и волны в волноведущих и резонансных структурах. Рассматриваются свойства проводников и диэлектриков в полях высокой частоты.

Для успешного освоения дисциплины аспирант должен:

знать: общую физику, классическую электродинамику и методы математической физики в объеме магистратуры,

уметь: применять методы дифференциального и интегрального исчисления, векторного анализа, теории функций комплексных переменных.

Изучению данной дисциплины должно предшествовать изучение дисциплины «Основы электродинамики и теории электрических цепей» в рамках ООП.

## 1.2. Цели и задачи освоения дисциплины

1. Приобретение аспирантом широких, целостных и глубоких знаний об электрическом и магнитном полях в вакууме и средах; электромагнитных колебаниях и волнах высоких частот; волноведущих и резонансных структурах; основных свойствах проводников и диэлектриков в полях высокой частоты.

2. Формирование у аспиранта умения вычленять физические факторы, связанные с постоянными, квазистатическими электрическими и магнитными полями, электромагнитными колебаниями и волнами в электрофизических системах, выполнять качественные оценки и расчеты параметров электромагнитных полей в таких системах.

3. Выработка у аспиранта умения и приобретение опыта использования математического аппарата в решении физических задач по расчету статических и переменных электромагнитных полей в средах и структурах.

## 1.3. Формируемые компетенции

ОПК-1: Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.

ПК-1: Наличие широких, целостных и глубоких знаний об электрическом и магнитном полях в вакууме и средах; электромагнитных колебаниях и волнах высоких частот; волноведущих и резонансных структурах; основных свойствах проводников и диэлектриков в полях высокой частоты (как составляющая профессиональной компетенции ПК-1 в ООП, в состав которой включается настоящая дисциплина).

ПК-2: Умение вычленять физические факторы, связанные с постоянными, квазистатическими электрическими и магнитными полями, электромагнитными колебаниями и волнами в электрофизических системах, выполнять качественные оценки и расчеты параметров электромагнитных полей в таких системах. Умение и наличие опыта использования математического аппарата в решении физических задач по расчету статических и переменных электромагнитных полей в средах и структурах (как составляющая профессиональной компетенции ПК-2 в ООП, в состав которой включается настоящая дисциплина).

УК-1: Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.



УК-2: Способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки.

УК-3: Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.

Таблица соответствия компонентов фонда оценочных средств (ФОС) по дисциплине формируемым компетенциям приведена в п. 5.2 рабочей программы.

## 2. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы (108 часов).

### 2.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов, и их трудоемкость (в часах)		
		Лекции	Практика	Самостоятельная работа
1	Введение в дисциплину	4	—	8
2	Статические и квазистатические поля и токи	10	6	14
3	Электромагнитные колебания и волны в неограниченной среде	4	2	6
4	Волноводы и резонаторы	18	10	26
	<b>ИТОГО</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>54</b>

### 2.2. Наименование тем, их содержание, объём в часах лекционных занятий

Порядковый номер лекции	Раздел, тема учебного курса, содержание лекции	Трудоемкость	
		час.	зач. ед.
<b>РАЗДЕЛ 1. Введение в дисциплину</b>		<b>4</b>	<b>0,11</b>
1	<u>Тема 1.1. Электромагнитные колебания и волны сверхвысоких частот</u> 1.1.1. Определение СВЧ-диапазона электромагнитных колебаний. 1.1.2. Первое применение СВЧ-излучения: радиолокация. Современные применения СВЧ-излучения. 1.1.3. Генерирование мощных СВЧ-импульсов с помощью сильноточных электронных пучков. 1.1.4. Высокочастотные и сверхвысокочастотные процессы в импульсной энергетике и сильноточной электронике. Поведение электротехнических сред на высоких частотах. 1.1.5. Классическая электродинамика Максвелла как теоретическая основа электродинамики СВЧ.	2	0,055
2	<u>Тема 1.2. Уравнения электромагнитного поля</u> 1.2.1. Уравнения Максвелла в вакууме. Уравнение непрерывности электрического тока. 1.2.2. Потенциалы электромагнитного поля. Волновое уравнение. Энергия и поток энергии электромагнитного поля. 1.2.3. Описание электромагнитного поля в средах. Уравнения Максвелла с зарядами и токами точечных частиц. Понятие «физически бесконечно малого» объема. Усреднение полевых величин.	2	0,055



РАЗДЕЛ 2. Статические и квазистатические поля и токи		10	0,28
3	<u>Тема 2.1. Электростатика проводников</u> 2.1.1. Классификация сред по характеру проводимости. 2.1.2. Определение электростатической ситуации. Определение проводника. Распределение электростатического заряда и электростатическое поля проводника. 2.1.3. Уравнения электростатического поля проводника, граничные условия. 2.1.4. Сила электрического поля, действующая на поверхность проводника. 2.1.5. Электростатический потенциал, уравнение Лапласа. 2.1.6. Формулировка задачи электростатики для проводника.	2	0,055
4	<u>Тема 2.2. Электростатика диэлектриков</u> 2.2.1. Определение диэлектрика. Вектор поляризации. Вектор электростатической индукции. 2.2.2. Уравнения внутренней электростатики диэлектриков, граничные условия. 2.2.3. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая восприимчивость. 2.2.4. Два основных механизма поляризации диэлектриков, насыщение поляризации	2	0,055
5	<u>Тема 2.3. Постоянный электрический ток</u> 2.3.1. Определение постоянного тока. 2.3.2. Проводимость среды, закон Ома. 2.3.3. Уравнения электрического поля в проводнике с током, граничные условия. 2.3.4. Диссипация энергии в проводнике, закон Джоуля-Ленца. 2.3.5. Нахождение электрического поля снаружи от проводника с постоянным током.	2	0,055
6	<u>Тема 2.4. Постоянное магнитное поле</u> 2.4.1. Постоянное магнитное поле в среде в отсутствие токов проводимости. Вектор намагниченности. Вихревой ток. Индукция магнитного поля и напряженность магнитного поля. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость среды. 2.4.2. Уравнения постоянного магнитного поля в среде, граничные условия. 2.4.3. Классификация магнетиков. Принципиальные различия между диэлектрическими и магнитными свойствами веществ. 2.4.4. Уравнения магнитного поля в среде, создаваемого постоянным током. Магнитные поля симметричных токов. Поле в немагнитной среде, закон Био и Савара.	2	0,055
7	<u>Тема 2.5. Квазистатическое электромагнитное поле</u> 2.5.1. Определение квазистатического поля. Уравнения квазистатического поля. Индукционное электрическое поле. Индукционный ток. 2.5.2. «Уравнение диффузии» для электрического и магнитного полей, граничные условия. 2.5.3. Проникновение магнитного поля в проводник. Понятие скин-слоя. Одномерный случай. 2.5.4. Граничное условие Леонтовича. Поверхностный импеданс проводника. Поток энергии электромагнитного поля внутрь проводника. 2.5.5. Скин-эффект в цилиндрическом проводнике. Скин-эффект в электротехнике высоких частот и сверхвысоких частот.	2	0,055
РАЗДЕЛ 3. Электромагнитные колебания и волны в неограниченной среде		4	0,11
8	<u>Тема 3.1. Уравнения электромагнитных волн в неограниченной среде</u> 3.1.1. Определение волны. Уравнения переменного поля в среде в отсутствие дисперсии. Волновое уравнение. Скорость распространения волнового возмущения. 3.1.2. Общее решение волнового уравнения в одномерном случае. Однородная плоская электромагнитная волна. 3.1.3. Свойства комплексных амплитуд полей. Волновой вектор, смысл действительной и мнимой частей. Преломление и затухание волн в среде. Фазовая скорость волны в узком и широком смысле. 3.1.4. Понятие волнового пакета. Естественная ширина спектра импульса. Огибающая высокочастотного импульса. Определение групповой скорости. Расплывание волновых пакетов.	2	0,055
9	<u>Тема 3.2. Частотная дисперсия диэлектрической проницаемости</u> 3.2.1. Дисперсия диэлектрической проницаемости как следствие инерционности поляризации среды. 3.2.2. Линейный интегральный оператор диэлектрической проницаемости. Комплексная диэлектрическая проницаемость, свойства четности ее действительной и мнимой частей как функций частоты. 3.2.3. Классическая теория дисперсии для разреженной атомарной среды. Решение уравнения осциллятора. Величина поляризации. Частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Показатель преломления сре-	2	0,055



	ды. Области нормальной и аномальной дисперсии. 3.2.4. Диэлектрическая проницаемость проводников: способ определения, зависимость от проводимости и частоты.		
<b>РАЗДЕЛ 4. Волноводы и резонаторы</b>		<b>18</b>	<b>0,5</b>
10	<u>Тема 4.1. Электромагнитные волны в линиях передачи</u> 4.1.1. Понятие передающей линии. Линии с односвязным и многосвязным сечением. Волноводы. 4.1.2. Уравнения электромагнитных волн в передающей линии. Неоднородная плоская волна. Выражение поперечных компонент полей через продольные. Два семейства решений: E-волны и H-волны. 4.1.3. Поперечное волновое число: задача на собственные числа. Уравнение Гельмгольца. Понятие волновой моды. 4.1.4. Законы дисперсии для волн типа E и типа H. Критические частоты. 4.1.5. Отражение волны от запредельного сужения волновода. Связь между фазовой и групповой скоростями волноводных мод.	2	0,055
11	<u>Тема 4.2. Прямоугольный волновод</u> 4.2.1. Решение уравнения Гельмгольца для прямоугольного волновода методом факторизации. 4.2.2. Выражения для полей и поперечных волновых чисел. Дисперсионные характеристики волн. 4.2.3. Понятие о модах, вырожденных по частоте колебаний. Обзор волн низших типов в прямоугольном волноводе. 4.2.4. Концепция Бриллюэна, бриллюэновские волны, бриллюэновский угол.	2	0,055
12	<u>Тема 4.3. Круглый волновод</u> 4.3.1. Решение уравнения Гельмгольца для круглого волновода методом факторизации. Уравнение Бесселя и его решения. 4.3.2. Выражения для полей и поперечных волновых чисел. Дисперсионные характеристики волн. 4.3.3. Обзор волн низших типов в круглом волноводе.	2	0,055
13	<u>Тема 4.4. Волны в кабельных линиях</u> 4.4.1. Уравнения электромагнитной волны в линии при отсутствии продольных компонент полей. 4.4.2. TEM-волна, частотная независимость структуры полей. Выражение электрического поля через потенциал, связь между электрическим и магнитным полями. Напряжение и ток в волне, волновое сопротивление. 4.4.3. Коаксиальная линия, выражения для полей, волновое сопротивление, погонная индуктивность и емкость. 4.4.4. Полосковая линия, выражения для полей, волновое сопротивление, погонная индуктивность и емкость. 4.4.5. Волны высших типов в коаксиальной и полосковой линиях.	2	0,055
14	<u>Тема 4.5. Поток энергии и потери в волноводах.</u> 4.5.1. Выражение для потока энергии через волновод, усредненного за период колебания. Поток энергии для E-волн и H-волн. 4.5.2. Связь потока энергии с плотностью энергии и групповой скоростью волны. 4.5.3. Затухание волны в волноводе при омических потерях. Декремент затухания, его зависимость от частоты для E-волн, H-волн. 4.5.4. Симметричные H-волны круглого волновода как исключение из общего правила.	2	0,055
15	<u>Тема 4.6. Замедленные электромагнитные волны. Виды замедляющих систем</u> 4.6.1. Определение замедленных электромагнитных волн, их применение для генерации СВЧ-излучения и ускорения заряженных частиц. 4.6.2. Принцип фазового синхронизма. 4.6.3. Способы замедления электромагнитных волн: использование диэлектрических сред, геометрическое замедление в неоднородных волноводах. 4.6.4. Спиральная линия: основная (замедленная) волна, волны высших типов. Коэффициент замедления для основной волны, его выражение для низких частот.	2	0,055
16	<u>Тема 4.7. Гофрированный волновод</u> 4.7.1. Уравнение для продольного волнового числа волны в волноводе с малой глубиной гофрировки, приведение к уравнению Матье. 4.7.2. Решение Флоке, характеристический показатель, зоны неустойчивости, полосы частот непропускания. Брэгговский резонанс. Брэгговский волновой отражатель. 4.7.3. Пространственные гармоники, их фазовые скорости. Дисперсионная диаграмма гофрированного волновода. Структурные волны.	2	0,055



	4.7.4. Распределение полей замедленных гармоник в поперечном сечении волновода. 4.7.5. Применение замедленных гармоник для генерации СВЧ-излучения, лампа обратной волны.		
17	<u>Тема 4.8. Объемные резонаторы электромагнитных колебаний</u> 4.8.1. Определение объемного электромагнитного резонатора. 4.8.2. Уравнения собственных колебаний. Колебательные моды, собственные частоты: задача на собственные числа и собственные функции. 4.8.3. Волноводный резонатор и резонатор Фабри-Перо. 4.8.4. Плотность мод резонаторов различных размерностей, представление собственных колебаний в пространстве волновых чисел.	2	0,055
18	<u>Тема 4.9. Резонаторы с потерями</u> 4.9.1. Декремент затухания колебаний в резонаторе с потерями. Добротность собственного колебания. 4.9.2. Связь ширины спектральной линии колебания с его добротностью. Правило «сложения» для добротностей, обусловленных различными видами потерь. 4.9.3. Основные виды потерь энергии в резонаторах и связанные с ними добротности колебаний: резистивные потери в волноводном резонаторе; добротность, связанная с конечным коэффициентом отражения волн; дифракционная добротность открытого резонатора.	2	0,055
	<b>СУММАРНАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ</b>	<b>36</b>	<b>1,0</b>

### 2.3. Практические (семинарские) занятия

Порядковый номер занятия	Раздел, тема учебного курса, содержание практического (семинарского) занятия	Трудоёмкость	
		час.	зач. ед.
<b>РАЗДЕЛ 2. Статические и квазистатические поля и токи</b>		<b>6</b>	<b>0,17</b>
1	<u>Тема 2.1. Электростатика проводников</u> Практическое решение задач электростатики проводников в основных типичных конфигурациях. <u>Тема 2.2. Электростатика диэлектриков</u> Практическое решение задач электростатики диэлектриков в основных типичных конфигурациях.	2	0,055
2	<u>Тема 2.3. Постоянный электрический ток</u> Практическая оценка частотной границы применимости закона Ома. Практическое вычисление электрического поля снаружи от проводника с постоянным током. <u>Тема 2.4. Постоянное магнитное поле</u> Практическое вычисление магнитостатических полей проводников с током.	2	0,055
3	<u>Тема 2.5. Квазистатическое электромагнитное поле</u> Практическое вычисление времени проникновения и глубины проникновения электромагнитного поля в проводники. Практическое вычисление поверхностного импеданса проводника и потока энергии электромагнитного поля внутрь проводника.	2	0,055
<b>РАЗДЕЛ 3. Электромагнитные колебания и волны в неограниченной среде</b>		<b>2</b>	<b>0,055</b>
4	<u>Тема 3.1. Уравнения электромагнитных волн в неограниченной среде</u> Запись и решение волнового уравнения для цилиндрических и сферических волн <u>Тема 3.2. Частотная дисперсия диэлектрической проницаемости</u> Практическое построение кривых частотной дисперсии диэлектрической проницаемости для модельных сред	2	0,055
<b>РАЗДЕЛ 4. Волноводы и резонаторы</b>		<b>10</b>	<b>0,28</b>
5	<u>Тема 4.1. Электромагнитные волны в линиях передачи</u> Вывод выражений для компонент полей E-волн и H-волн. Практический расчет волнового отражателя с запредельным сужением.	2	0,055
6	<u>Тема 4.2. Прямоугольный волновод</u> Практическое вычисление поперечных волновых чисел и определение структуры поля различных мод в волноводах прямоугольного сечения с заданными размерами.	2	0,055



	<u>Тема 4.3. Круглый волновод</u> Практическое вычисление поперечных волновых чисел и определение структуры поля различных мод в волноводах круглого сечения заданного радиуса.		
7	<u>Тема 4.4. Волны в кабельных линиях</u> Практическое вычисление волнового сопротивления коаксиальных и полосковых линий. Определение поперечных волновых чисел и частот отсечки волны высших типов в коаксиальной и полосковой линиях. <u>Тема 4.5. Поток энергии и потери в волноводах.</u> Практический расчет потерь в волноводах.	2	0,055
8	<u>Тема 4.6. Замедленные электромагнитные волны. Виды замедляющих систем</u> Практический расчет коэффициента замедления электромагнитных волн в замедляющих системах различных видов. <u>Тема 4.7. Гофрированный волновод</u> Практическое построение дисперсионной диаграммы замедленных электромагнитных волн в гофрированном волноводе на основе решений Флоке.	2	0,055
9	<u>Тема 4.8. Объемные резонаторы электромагнитных колебаний</u> Практическое построение низкочастотной части спектра колебаний различных резонаторов. <u>Тема 4.9. Резонаторы с потерями</u> Практическое вычисление добротности резонаторов различных типов.	2	0,055
	<b>СУММАРНАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ</b>	18	0,5

## 2.4. Самостоятельная работа аспирантов

Внеаудиторная самостоятельная работа аспирантов включает следующие виды деятельности:

- проработку учебного материала по конспектам лекций и учебной литературе; изучение и конспектирование источников из списка дополнительной учебной и научной литературы, обзорной литературы, включая интернет-источники;
- подготовку к практическим (семинарским) занятиям;
- решение задач по заданию преподавателя;
- подготовку реферата на тему, согласованную с преподавателем;
- выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера.

### 2.4.1. Решение задач

Примеры задач для самостоятельного решения:

1. Найти электростатическое поле в цилиндрическом конденсаторе. При каком радиусе внутреннего электрода напряженность электрического поля на нем минимальна, если радиус внешнего электрода и напряжение в конденсаторе заданы?
2. Найти электростатическое поле в сферическом конденсаторе.
3. Найти электростатическое поле равномерно заряженного кольца на его оси.
4. Найти емкость плоского конденсатора, заполненного двумя слоями диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью.
5. Найти магнитное поле тонкого кольца с током на его оси.
6. Найти магнитное поле в середине прямоугольного контура с током.
7. Оценить частоту электромагнитных колебаний, при которой величины действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости металла станут соизмеримыми.
8. Определить пространственное распределение магнитного поля, создаваемое магнитным ондулятором — последовательностью тонких колец с токами, расположенных периодически в осевом направлении. В каждых двух соседних кольцах токи одинаковы по величине и противоположны по направлению. Расстояние между кольцами много меньше их радиуса.
9. Показать, что при любых соотношениях поперечных размеров прямоугольного волновода наименьшей критической частотой в нем обладает либо волна  $H_{01}$ , либо волна  $H_{10}$ .
10. При каких условиях волна  $H_{01}$  прямоугольного волновода, плавно деформируемого в круглый, перейдет в волну  $H_{11}$  круглого волновода, и наоборот?



11. По волноводу распространяется электромагнитный импульс с длительностью  $\tau$ , спектр которого представляет собой узкую линию с частотой  $\omega$ . Излучение распространяется по волноводу в виде низшей моды с критической частотой  $\omega_{cr}$ . Определить пространственную длину импульса.
12. На вход волновода подается импульс излучения длительностью  $\tau$ , спектр которого представляет собой две узкие линии, разность между которыми частотами которых  $\Delta\omega \gg 1/\tau$ . Излучение распространяется в виде низшей моды с критической частотой  $\omega_{cr}$ . Оценить длину волновода, при которой на его выходе излучение будет представлять собой два импульса, задержанных относительно друг друга на время  $\Delta t \approx \tau$ .
13. В круглом волновод заданного радиуса с идеально проводящими стенками распространяется электромагнитная волна низшего типа. Частота волны фиксирована. На стенки волновода дополнительно нанесен тонкий (по сравнению с радиусом волновода) слой среды с конечной проводимостью. Толщина слоя постоянна по длине волновода. При каком условии декремент затухания волны будет максимальным?
14. Получить выражения для полей волн типа Н и типа Е в коаксиальной линии. Определить критические частоты таких волн.
15. Вывести выражение для коэффициента замедления основной волны в коаксиальной линии с центральным проводником в виде спирально проводящего цилиндра.
16. Найти добротность колебания со структурой  $E_{01}$  в резонаторе, образованном участком круглого волновода между двумя вставленными в него цилиндрическими втулками за критического радиуса и конечной длины.
17. Стенки объемного резонатора имеют конечную проводимость. При какой частоте колебаний произойдет слияние спектральных линий соседних колебаний и резонатор потеряет резонансные свойства?
18. Показать, что частоты собственных колебаний резонатора в случае его диэлектрического заполнения уменьшаются в  $\varepsilon^{1/2}$  раз.

При решении задачи требуется:

- при необходимости доопределить задачу;
- выбрать подходящую математическую модель;
- произвести математические выкладки и получить результат;
- проанализировать результат и сделать практические выводы.

Представленное решение оценивается преподавателем по следующим критериям:

- насколько правильно выбраны подход к решению задачи и общая последовательность действий;
- правильно ли выбраны основные уравнения и формулы;
- правильны ли сделанные на их основе математические выкладки, верен ли конечный математический результат;
- насколько обоснован вывод из полученных выражений, насколько он ценен и отвечает ли он на вопрос задачи.

Максимальный балл за каждую задачу — 5,0 (максимум 1,0 по каждому критерию).

#### 2.4.2. Подготовка реферата

Примеры тем для реферата:

1. Использование ферромагнетиков в мощной импульсной технике и СВЧ-электронике.
2. Диэлектрики в электрофизических установках и системах диагностики. Дисперсия, потери, электрическая прочность.
3. Скин-эффект в импульсных и высокочастотных электрофизических установках
4. Применения прямоугольных волноводов. Мощные импульсные СВЧ-приборы на основе прямоугольных волноводов
5. Волноводы и элементы на их основе в СВЧ-технике.
6. Передающие линии различных типов в СВЧ-электронике и импульсной технике
7. Замедляющие системы: применение в генераторах СВЧ-излучения.



8. Лампа обратной волны
9. Параметрический резонанс в различных физических системах.
10. Применения резонаторов в СВЧ-технике.
11. Линейные ускорители заряженных частиц.
12. Оптические резонаторы.
13. Световоды.

Требования к реферату: объем не менее 40 тыс. печатных знаков. Число иллюстраций не менее 10. Число ссылок на использованные источники не менее 10. Ссылки на использованные источники обязательны. Общий объем заимствованного текста не более 25 % (реферат проверяется в системе «Антиплагиат»).

Критерии оценки реферата:

- полнота и разносторонность рассмотрения вопроса;
- число и качество использованных источников;
- изложение материала научным языком, отсутствие жаргона;
- наличие самостоятельных выводов, обобщающих сделанный обзор;
- изложение материала преимущественно своими словами (минимальный объем прямых текстовых заимствований). Отсутствие прямых заимствований без ссылки на источник.

Максимальный балл за реферат — 10 (максимум 2 по каждому критерию).

#### **2.4.3. Выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера**

Пример задания:

"Предложить и разработать конструкцию мощного импульсного СВЧ-генератора: релятивистской лампы обратной волны.

Требования к разрабатываемому устройству:

- частота генерации 5 ГГц;
- импульсная мощность генерации 3 ГВт;
- в основе механизма электронно-волнового взаимодействия — черенковский синхронизм электронов с "минус первой" пространственной гармоникой встречной электромагнитной волны.

В ходе выполнения задания следует:

- изучить литературные источники, касающиеся черенковских приборов с инерционной группировкой электронов;
- выбрать тип прибора: с ведущим магнитным полем или без;
- выбрать конфигурацию и оценить требуемые характеристики рабочего электронного пучка;
- оценить требуемое сопротивление связи;
- оценить длину и параметры гофрировки электродинамической системы;
- выбрать тип и разработать вакуумный диод, выбрать тип катода и предложить его конструкцию;
- предложить конструкцию и определить характеристики электронно-волновой системы;
- выбрать необходимый тип и определить требуемые характеристики импульсного генератора для питания разрабатываемого устройства.
- предложить конструкцию и определить характеристики магнитной системы (если выбрана конструкция СВЧ-генератора с внешним ведущим магнитным полем)."

Критерии оценки выполнения коллективного задания:

- насколько использованный подход к решению задачи соответствует этой задаче и насколько он обоснован;
  - все ли необходимые для решения задачи; исходные данные учтены;
  - правильность математических выкладок;
  - наличие оригинальных находок при решении задачи;
  - обоснованность сделанных выводов;
  - степень практической осуществимости предложенного решения;
  - общая оценка результативности решения задачи: в какой мере удалось задачу решить.
- Максимальный балл — 14 (максимум по 2 по каждому из критериев).



#### 2.4.4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах, на рабочих местах с доступом к интернет-ресурсам, и в домашних условиях. Аспиранты имеют возможность получать консультации у преподавателя.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим основную и дополнительную учебную и научную литературу, а также конспекты лекций.

#### 2.4.5. Вопросы для самоконтроля при самостоятельной работе аспирантов

##### Вопросы к теме 1.1

1. Колебания с какими частотами и длинами волн принято относить к СВЧ-диапазону?
2. Каковы были первые применения СВЧ-колебаний?
3. Перечислить основные современные применения СВЧ-излучения.
4. Почему знание электродинамики СВЧ важно в мощной импульсной энергетике?
5. Как получают мощные СВЧ-импульсы?
6. Знание каких дисциплин необходимо для успешного изучения электродинамики СВЧ?

##### Вопросы к теме 1.2

1. Записать систему уравнений Максвелла для вакуума.
2. Записать уравнение непрерывности для электрического тока. Каков его физический смысл?
3. Каким образом электрическое и магнитное поля выражаются через потенциалы электромагнитного поля?
4. Записать выражения для плотности энергии электромагнитного поля и вектора Пойнтинга.
5. Каков физический смысл тензора напряжений Максвелла?
6. Дать определение дельта-функции Дирака. Каким образом с помощью этой функции представить плотность заряда и плотность тока, создаваемые точечным зарядом?
7. Дать определение «физически бесконечно малого» объема. В чем смысл усреднения физических величин по такому объему?
8. Что такое индукция магнитного поля?

##### Вопросы к теме 2.1

1. Дать определение проводящей среды.
2. Какого вида электрический ток может существовать в диэлектриках?
3. Объяснить термин «электростатический».
4. Какова величина электростатического поля внутри проводника?
5. Как электростатический заряд распределяется по объему проводящего тела?
6. Записать выражение для электростатического поля через потенциал, уравнение Лапласа и уравнение Пуассона для электростатического потенциала.
7. Сформулировать граничные условия для электростатического поля на поверхности проводника.
8. Какова сила, действующая на элемент поверхности проводника в электростатическом поле? Как давление электрического поля зависит от его напряженности?

##### Вопросы к теме 2.1

1. Каков физический смысл вектора диэлектрической поляризации?
2. Записать определение для вектора электрической индукции, диэлектрической проницаемости и диэлектрической восприимчивости среды.
3. Записать уравнения Максвелла для статических электрического поля и электрической индукции в диэлектрике. Сформулировать к ним граничные условия.



4. Каковы механизмы диэлектрической поляризации в двух основных типах диэлектриков? С чем связано насыщение поляризации в сильном поле?

#### Вопросы к теме 2.3

1. Какой ток называется постоянным?
2. Сформулировать закон Ома.
3. Является ли ток постоянный ток проводимости вихревым?
4. Сформулировать задачу о протекании постоянного тока в однородном проводнике произвольной формы.
5. Сформулировать закон Джоуля-Ленца.

#### Вопросы к теме 2.4

1. Как называется величина напряженности магнитного поля, усредненная по «физически бесконечно малому» объему среды?
2. Как связаны между собой намагниченность, магнитная индукция и напряженность магнитного поля в среде? Каков физический смысл намагниченности?
3. Записать систему уравнений Максвелла с граничными условиями для магнитной индукции и напряженности магнитного поля в среде в статическом случае.
4. В каком случае магнитное поле в среде может быть выражено через потенциал?
5. На какие основные классы делятся материалы по магнитным свойствам?
6. Каковы основные принципиальные различия между диэлектрическими и магнитными свойствами веществ?
7. Записать уравнения для магнитного поля вокруг проводника с постоянным током.
8. Чему равно магнитное поле, создаваемое осесимметричным током аксиального направления на некотором расстоянии от оси?
9. Сформулировать закон Био и Савара.

#### Вопросы к теме 2.5

1. При каких частотах изменения электромагнитного поля это поле считается квазистатическим по отношению к телу некоторых размеров?
2. При каких частотах в уравнениях Максвелла для переменного электромагнитного поля в проводнике можно использовать закон Ома? Записать эти уравнения.
3. Записать волновое уравнение, описывающее проникновение квазистатического поля в проводник.
4. Чем определяется толщина скин-слоя? Каков физический смысл этой величины?
5. Как распределено переменное электромагнитное поле некоторой частоты в проводящем теле, если его характерные размеры намного превышают толщину скин-слоя на этой частоте?
6. Сформулировать граничное условие Леонтовича для полей на поверхности проводника. При каких условиях оно реализуется?
7. Что такое поверхностный импеданс проводника? Записать с помощью этой величины плотность потока энергии электромагнитного поля внутрь проводника.
8. Что называется скин-эффектом? Как в рассматриваемой физической ситуации распределены поля в проводнике?

#### Вопросы к теме 3.1

1. Дать определение электромагнитной волны.
2. Записать уравнения Максвелла для переменного поля в среде без дисперсии.
3. Записать уравнение д'Аламбера для возмущений электрического и магнитного полей в среде. Какова скорость распространения возмущений?
4. Записать волновое уравнение первого порядка, описывающее распространение волнового импульса неизменной формы в одномерном случае. Функция какого вида описывает такое возмущение?



5. Дать определение однородной плоской электромагнитной волны, ее комплексных амплитуд и фазы.
6. Как связаны между собой по величине и направлению электрическое, магнитное поле и волновой вектор в однородной плоской волне? Как связаны между собой волновое число и частота колебаний волны?
7. Что представляют собой поверхности равных фаз в плоской волне? Каков смысл действительной и мнимой компонент волнового вектора?
8. Как связаны показатель преломления и коэффициент поглощения среды с действительной и мнимой частями ее диэлектрической проницаемости?
9. Дать развернутое определение фазовой скорости волны. В каком случае и почему величина фазовой скорости электромагнитной волны может превышать скорость света в вакууме?
10. Что такое естественная ширина спектра волнового импульса? Что называют волновым пакетом?
11. С какой скоростью распространяется в пространстве волновой пакет, фазовая скорость всех гармоник которого одинакова?
12. В каком случае можно в первом приближении пренебречь искажением формы волнового пакета при его движении при наличии частотной дисперсии?
13. Дать определение и записать выражение для групповой скорости.
14. Записать выражение для поля в узкополосном волновом пакете неизменной формы, движущегося с некоторой групповой скоростью, фазовая скорость основной частотной компоненты в котором известна.

#### Вопросы к теме 3.2

1. При каких частотах изменения электромагнитного поля это поле считается квазистатическим по отношению к телу некоторых размеров?
2. Записать интегральное выражение для линейной диэлектрической поляризации, отражающее ее инерционный характер.
3. Каковы свойства четности функций действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости?
4. К каким средам применима классическая теория дисперсии? Сформулировать предположения теоретической модели.
5. Изобразить зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости от частоты колебаний. Каковы предельные значения этих величин при очень больших частотах?
6. Дать определения нормальной и аномальной дисперсии.
7. Записать выражение для диэлектрической проницаемости проводящей среды.

#### Вопросы к теме 4.1

1. Что такое линия передачи? Назвать основные виды передающих линий.
2. Изобразить односвязную, двусвязную, трехсвязную области.
3. Почему в передающих линиях не могут распространяться однородные плоские волны? Дать определение неоднородной плоской волны.
4. Почему вектора  $\operatorname{rot} \mathbf{E}_\perp$  и  $\operatorname{rot} \mathbf{H}_\perp$  в случае неоднородной плоской волны являются чисто продольными?
5. Дать определение поперечного волнового числа.
6. Как связаны продольные компоненты полей в неоднородных плоских волнах с мембранными функциями?
7. Дать определения волн типа E и волн типа H, записать для них выражения компонент полей через мембранные функции.
8. Записать уравнение Гельмгольца с граничными условиями для волн электрического и магнитного типов.



9. В чем смысл задачи на собственные значения и собственные числа? Дать определение волновой моды.
10. Дать определение критической частоты волновой моды. Почему для волноводов с односвязным поперечным сечением эта величина никогда не равна нулю?
11. Записать дисперсионное соотношение для волноводной моды через компоненты волнового числа и критическую частоту. Изобразить дисперсионную кривую, показав графически величины фазовой и групповой скоростей.
12. Что такое запредельное сужение? Каково продольное распределение полей волны при частоте ниже критической?
13. Записать соотношение, связывающее величины фазовой и групповой скоростей в вакуумном волноводе.

#### Вопросы к теме 4.2

1. В чем сущность метода факторизации применительно к решению уравнения Гельмгольца?
2. Записать выражение для мембранных функций Е-волн и Н-волн в прямоугольном волноводе.
3. Записать дисперсионное уравнение для волновой моды в прямоугольном волноводе с размерами  $a$  и  $b$ .
4. Какая из волн электрического типа в прямоугольном волноводе имеет максимальную критическую длину волны?
5. Какая волна называется основной волной прямоугольного волновода и почему?
6. Какие волновые моды называются вырожденными по частоте?
7. Почему в прямоугольном волноводе не существует волн  $E_{01}$  и  $H_{00}$ ?
8. Сформулировать концепцию Бриллюэна.

#### Вопросы к теме 4.3

9. Записать выражение для мембранных функций Е-волн и Н-волн круглого волновода и выражения для их радиальных волновых чисел.
10. Записать уравнение Бесселя.
11. Перечислить первые шесть волн круглого волновода в порядке увеличения критической частоты. Изобразить структуру полей этих волн. Какие из перечисленных волн образуют вырожденную пару?

#### Вопросы к теме 4.4

1. Записать выражение для электрического поля в ТЕМ-волне. Как в этой волне связаны между собой поперечные компоненты полей? Продольные компоненты?
2. Почему ТЕМ-волны не могут существовать в прямоугольном или круглом волноводах?
3. Записать величину критической частоты для волны ТЕМ-типа.
4. Дать определение волнового сопротивления кабельной линии.
5. Какова структура полей ТЕМ-волны в коаксиальной линии? Записать выражение для электрического и для магнитного поля.
6. Что называется полосковой линией?
7. Записать выражения для волновых сопротивлений коаксиальной и полосковой линий в системах единиц СГС и СИ.

#### Вопросы к теме 4.5

1. Во сколько раз усредненная за период колебания величина потока мощности через волновод отличается от амплитудного неусредненного значения? Как соотносится между собой частота колебаний потока мощности и частота волны?
2. Записать величину вектора Пойнтинга для гармонических полей с известными комплексными амплитудами, усредненную за период колебания.



3. Какая физическая величина играет роль коэффициента пропорциональности между погонной величиной энергии электромагнитного поля и потоком энергии, создаваемым волной в волноводе?
4. Почему поток энергии волны и мощность потерь за счет поглощения волны в стенках прямо пропорциональны друг другу?
5. Дать определение декремента затухания волны. От чего зависят декременты резистивного затухания для волн типа E и волн типа H?
6. Как зависят декременты резистивного затухания волн от частоты? Какие волны составляют исключение из общего правила и почему?

#### Вопросы к теме 4.6

1. Что называется замедленной электромагнитной волной? Для чего замедляют электромагнитные волны?
2. Объяснить понятие фазового синхронизма.
3. Как для замедления электромагнитной волны можно использовать диэлектрик?
4. В чем заключается «геометрический» способ замедления электромагнитной волны в волноводе?
5. Какие волны и при каких условиях могут распространяться в коаксиальной линии со спиральным внутренним проводником?
6. Чем определяется коэффициент замедления основной волны в спиральной линии?

#### Вопросы к теме 4.7

7. Сформулировать постановку задачи о слабо гофрированном волноводе.
8. Записать уравнение Маттье, пояснив смысл входящих в него величин.
9. Какой вид имеет решение Флоке уравнения Маттье?
10. Что такое полосы частот непропускания гофрированного волновода? Как ширина этих полос изменяется с глубиной гофрировки?
11. Записать условия брэгговских резонансов. Что такое «брэгговское зеркало»?
12. Дать определение пространственных гармоник, записать выражения для их фазовых скоростей.
13. Изобразить дисперсионные кривые волновода с исчезающе малой глубиной гофрировки и волновода с сильной гофрировкой.
14. Чем определяются соотношения между амплитудами различных пространственных гармоник? Могут ли пространственные гармоники существовать независимо? Дать определение структурной волны в гофрированном волноводе.
15. Каково распределение полей замедленных электромагнитных волн в плоскости поперечного сечения волноведущей системы?

#### Вопросы к теме 4.8

1. Что называется резонатором электромагнитных колебаний?
2. Что такое свободные колебания резонатора? Каким уравнениям удовлетворяют поля этих колебаний?
3. Чем определяются частоты собственных колебаний (мод) резонатора?
4. Какое геометрическое тело в пространстве волновых чисел соответствует поверхности равных частот?
5. Какой объем в пространстве волновых чисел приходится на одно собственное колебание?
6. Как зависит плотность мод резонатора от его объема и длины волны?
7. Как изменятся частоты собственных колебаний резонатора при заполнении его однородным диэлектриком?

#### Вопросы к теме 4.9



1. Дать определение и привести выражение для добротности собственного колебания резонатора.
2. В чем смысл комплексной частоты собственного колебания?
3. Как связана ширина спектральной линии собственного колебания резонатора с добротностью этого колебания?
4. Записать правило «сложения» добротностей.
5. От чего и как зависит резистивная добротность волноводного резонатора с волнами типа Е? Типа Н? Колебания какого вида имеют аномальную зависимость добротности от частоты? Какова эта зависимость в пределе больших частот?
6. От чего и как зависит добротность резонатора, ограниченного отражателями?
7. От чего и как зависит дифракционная добротность открытого резонатора?
8. В чем смысл взаимной ортогональности полей собственных колебаний резонатора?
9. Что такое норма собственного колебания резонатора, каков ее физический смысл?

### 3. Учебно-методические материалы

#### 3.1. Основная и дополнительная литература

##### *а) основная литература:*

1. Пегель И. В. Электродинамика сверхвысоких частот. Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2009. – 158 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. – 620 с.
3. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. М.: Наука, 1988. – 509 с.
5. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. Основы математического аппарата. М.: Наука, 1966. – 240 с.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндз М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. Электродинамика. М.: Мир, 1977. – 347 с.
7. Мешков И. Н., Чириков Б. В. Электромагнитное поле. В двух частях. Новосибирск: Наука, 1987, – 272 с. – 256 с.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. I. Механика. М.: Наука, 1988. – 215 с.

##### *б) дополнительная литература:*

1. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. – М.: Советское радио, 1973. – 398 с.
2. Вайнштейн Л. А. Переходные процессы при возбуждении волноводов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 1998. – Т. 6. – № 1. С. 20.
3. Гапонов-Грехов А. В., Петелин М. И. Релятивистская высокочастотная электроника // Вестник АН СССР, 1979, № 4, с. 11-23.
4. Шевчик В. Н., Шведов Г. Н., Соболева А. В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Изд. Саратов. ун-та, 1962, 334 с.
5. Котетешвили П. В., Рыбак П. В., Тараканов В. П. KARAT - средство вычислительного эксперимента в электродинамике. Препринт № 44 ИОФ АН СССР. - М., 1991, 46 с.
6. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ (в двух томах). Т. 1: Том Техника сверхвысоких частот. М.: Высшая школа, 1972. – 440 с.
7. Миллер М. А. Движение заряженных частиц в высокочастотных электромагнитных полях // Известия вузов. Радиофизика, 1958, т. 1, № 3, с. 110—123.
8. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: Наука, 1984, 432 с.
9. Справочник по специальным функциям. (под ред. Абрамовиц М, Стиган И.) - М., Наука, 1979, 830 с.



10. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника / Под ред. А. А. Рухадзе. – Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 543 с.
11. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. – 704 с.
12. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В двух томах. М.: Физматлит, 2003, 2004.– 496 с, 648 с.
13. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. – М.: Сов. радио, 1966. – С. 104.
14. Тараненко З. И., Трохименко Я. К. Замедляющие системы. – Киев, 1965. – С. 39.
15. Korovin S. D., Gubanov V. P., Gunin A. V., Pegel I. V., Stepchenko A. S. Repetitive nanosecond high-voltage generator based on spiral forming line / Proc. Int. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. (PPPS-2001), Las Vegas, 2001. – PP. 1249—1251.

#### 4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- аудиторный фонд ИСЭ СО РАН,
- средства мультимедиа,
- рабочее место аспиранта с выходом в Интернет,
- библиотечный фонд ИСЭ СО РАН.

#### 5. Оценка качества освоения дисциплины

##### 5.1. Оценочные мероприятия и формирование оценки

Оценка качества освоения дисциплины обучающимся осуществляется с использованием балльной системы. Перечень оценочных мероприятий и максимальное количество баллов, которое может быть получено обучающимся в результате каждого мероприятия, приведены в таблице.

Оценочное мероприятие	Максимальное число баллов
Промежуточные тесты (по разделам дисциплины), суммарно	12
Итоговый тест	15
Подготовка реферата (самостоятельная работа)	10
Решение задач на практических (семинарских) занятиях	18
Решение задач (самостоятельная работа)	18
Выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера (самостоятельная работа)	7
Дифференцированный зачет	20
<b>Максимальный суммарный балл</b>	<b>100</b>

На дифференцированном зачете аспиранту выставляется оценка и соответствующее ей число баллов:

«Отлично»: 16—20 баллов.

«Хорошо»: 11—15 баллов.

«Удовлетворительно»: 6—10 баллов.

«Неудовлетворительно»: 5 баллов и менее.

Итоговая оценка качества освоения дисциплины определяется величиной суммарного балла:

«Отлично»: 81—100 баллов.



«Хорошо»: 61—80 баллов.

«Удовлетворительно»: 41—60 баллов.

«Неудовлетворительно»: 40 баллов и менее.

## 5.2. Соответствие оценочных мероприятий (компонентов ФОС) дисциплины формируемым компетенциям, перечисленным в п. 1.3

Компонента ФОС, оценочное мероприятие	Компетенции					
	ОПК-1	ПК-1	ПК-2	УК-1	УК-2	УК-3
Промежуточные тесты (по разделам дисциплины)	+	+	+			
Итоговый тест	+	+	+			
Подготовка реферата (самостоятельная работа)	+	+	+	+		
Решение задач (на практических (семинарских) занятиях))	+	+	+		+	+
Решение задач (самостоятельная работа)	+	+	+		+	
Выполнение коллективного задания проектно-исследовательского характера (самостоятельная работа)	+	+	+	+	+	+
Дифференцированный зачет	+	+	+	+		

## 5.3. База вопросов для составления промежуточных и итогового тестов

Для составления каждого из промежуточных тестов (по итогам освоения разделов дисциплины) используются вопросы, относящиеся к изучаемому разделу. Итоговый тест содержит все имеющиеся в базе вопросы. Вопросы в тесте каждому обучающемуся даются в индивидуальном случайном порядке.

Балл за тест, получаемый обучающимся, вычисляется путем нормирования суммарного числа правильных ответов таким образом, чтобы максимальный балл за все промежуточные тесты и максимальный балл за итоговый тест соответствовали величинам, указанным в таблице п. 5.1.

### 1. Выбрать правильную запись уравнений Максвелла для вакуума

$$(A) \begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{e} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{h} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \operatorname{div} \mathbf{e} = 4\pi\rho, \\ \operatorname{div} \mathbf{h} = 0. \end{cases} \quad (B) \begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{h} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \operatorname{div} \mathbf{e} = 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{h} = 4\pi\rho. \end{cases}$$



$$\begin{array}{l}
 \text{(B)} \left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \text{rot } \mathbf{h} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}, \\ \mathbf{e} = -\nabla \varphi, \\ \text{div } \mathbf{h} = 0. \end{array} \right. \quad \text{(Г)} \left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \\ \text{rot } \mathbf{h} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \text{div } \mathbf{e} = 4\pi\rho, \\ \text{div } \mathbf{h} = 0. \end{array} \right.
 \end{array}$$

2. Выбрать правильную запись уравнения непрерывности электрического тока

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} \quad \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \text{grad } \rho = 0 & \text{(Б)} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \mathbf{j} = 0 \\
 \text{(B)} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j} = 0 & \text{(Г)} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div } \mathbf{E} = 0
 \end{array}$$

3. Указать правильное выражение электрического и магнитного полей через потенциалы:

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} \quad \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi, & \mathbf{h} = \text{rot } \mathbf{A} \\
 \text{(Б)} \quad \mathbf{e} = \text{rot } \mathbf{A}, & \mathbf{h} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \\
 \text{(B)} \quad \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi, & \mathbf{h} = \text{rot } \mathbf{A} \\
 \text{(Г)} \quad \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t}, & \mathbf{h} = \text{rot } \mathbf{A} \\
 \text{(Д)} \quad \mathbf{e} = -\text{rot } \mathbf{h}, & \mathbf{h} = \frac{1}{c} \text{rot } \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\
 \text{(E)} \quad \mathbf{e} = \text{rot } \mathbf{A} - \nabla \varphi, & \mathbf{h} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}
 \end{array}$$

4. Указать правильное выражение для плотности энергии электромагнитного поля в вакууме

$$\begin{array}{lll}
 \text{(A)} \quad \frac{c}{8\pi} (H - E) & \text{(Б)} \quad \frac{1}{8\pi} (E^2 + H^2) & \text{(B)} \quad \frac{c}{8\pi} (E^2 - H^2) \\
 \text{(Г)} \quad \frac{1}{8\pi} (H^2 - E^2) & \text{(Д)} \quad \frac{1}{8\pi} [E^2 \times H^2] & \text{(E)} \quad \frac{1}{4\pi} [E^2 \times H^2] \\
 \text{(Ж)} \quad \frac{1}{4\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] & \text{(З)} \quad \frac{c}{8\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] & \text{(И)} \quad \frac{c}{4\pi} (E^2 + H^2)
 \end{array}$$

5. Указать правильное выражение для плотности потока энергии электромагнитного поля в вакууме

$$\begin{array}{lll}
 \text{(A)} \quad \frac{1}{8\pi} (H - E) & \text{(Б)} \quad \frac{c}{8\pi} (E^2 + H^2) & \text{(B)} \quad \frac{1}{8\pi} (E^2 - H^2)
 \end{array}$$



$$\begin{array}{lll}
 (\Gamma) \frac{c}{8\pi} (H^2 - E^2) & (\Delta) \frac{c}{8\pi} [\mathbf{E}^2 \times \mathbf{H}^2] & (\text{E}) \frac{1}{4\pi} [E^2 \times H^2] \\
 (\text{Ж}) \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] & (\text{З}) \frac{1}{8\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] & (\text{И}) \frac{1}{4\pi} (E^2 + H^2)
 \end{array}$$

6. Указать правильную запись оператора Даламбера (скорость распространения волнового возмущения равна  $c$ )

$$\begin{array}{ll}
 (\text{A}) \square \equiv \nabla - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} & (\text{Б}) \square \equiv \Delta^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\
 (\text{B}) \square \equiv \Delta - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} & (\Gamma) \square \equiv \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\
 (\text{Д}) \square \equiv \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} & (\text{E}) \square \equiv \Delta - c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2}
 \end{array}$$

7. Компонента тензора напряжений Максвелла с индексами  $(i, j)$  есть...

Плотность потока  $j$ -ой компоненты обобщенного момента импульса поля вдоль  $i$ -го координатного направления.

Плотность потока  $i$ -ой компоненты обобщенного момента импульса поля вдоль  $j$ -го координатного направления.

Плотность потока  $i$ -ой компоненты энергии поля вдоль  $j$ -го координатного направления.

Плотность потока  $i$ -ой компоненты импульса поля вдоль  $j$ -го координатного направления.

Плотность потока  $j$ -ой компоненты импульса поля вдоль  $i$ -го координатного направления.

Плотность потока  $j$ -ой компоненты энергии поля вдоль  $i$ -го координатного направления.

8. «Физически бесконечно малый» объем в среде — это...

Объем, любой из размеров которого мал по сравнению с межмолекулярными (межатомными) расстояниями в среде.

Усредненный объем, приходящийся на одну элементарную ячейку в веществе.

Объем, вмещающий очень большое число атомов и молекул, но малый в масштабе геометрической неоднородности среды и неоднородности ее физических характеристик.

Объем, вмещающий очень большое число атомов и молекул, и заведомо превышающий в размере масштаб геометрической неоднородности среды и неоднородности ее физических характеристик.

Объем, любой из размеров которого мал по сравнению с длиной свободного пробега электронов в среде, но малый в масштабе геометрической неоднородности среды и неоднородности ее физических характеристик.

9. Указать правильное определение проводящей среды:

Среда, в которой может существовать электрический ток.

Среда, в которой возможно движение электрических зарядов.

Среда, в которой возможно протекание постоянного электрического тока.

Среда, в которой имеется достаточное количество заряженных частиц.

Среда, в которой возможно перемещение заряженных частиц по всему объему.

10. Какого вида электрический ток может существовать в диэлектриках?

Только постоянный.

Только переменный.

Постоянный и переменный.



Только вихревой ток.  
Ток проводимости.

**11. Какова величина электростатического поля внутри проводника?**

Ноль.

Постоянная величина, пропорциональная его проводимости.

Постоянная величина, пропорциональная корню квадратному из величины проводимости и величине внешнего электрического поля.

**12. Как электростатический заряд распределяется по объему проводящего тела?**

Линейно, в направлении приложенного электрического поля.

Сосредоточен на поверхности.

Плотность заряда квадратично убывает по направлению внутренней нормали к поверхности.

**13. Выбрать правильное выражение для величины электростатического поля:**

$$(A) \mathbf{E} = -\Delta\varphi \quad (B) \mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (B) \mathbf{E} = \text{rot } \varphi \quad (\Gamma) \mathbf{E} = -\frac{\partial\varphi}{\partial t}$$

**14. Выбрать правильную запись уравнения Пуассона для электростатического потенциала**

$$(A) \nabla\varphi = -4\pi\rho \quad (B) \Delta\varphi = -4\pi\rho \quad (B) \Delta\varphi = -\frac{1}{c}\frac{\partial\rho}{\partial t} - \frac{4\pi}{c}j$$

**15. Сформулировать граничные условия для электростатического поля на поверхности проводника.**

Полное поле равно нулю.

Равны нулю нормальная компонента поля и производная по нормали от касательной компоненты поля.

Равны нулю касательная компонента поля и производная по нормали от нормальной компоненты поля.

Нормальная компонента поля равна нулю, а тангенциальная испытывают скачок, пропорциональный поверхностной плотности заряда.

Касательная компонента поля равна нулю, а нормальная пропорциональна поверхностной плотности заряда.

Все компоненты поля испытывают скачок, пропорциональный поверхностной плотности заряда.

**16. Выбрать выражение для силы, действующей на элемент поверхности проводника в электростатическом поле**

$$(A) \frac{d\mathbf{F}}{dS} = \frac{\mathbf{n}E^2}{8\pi} \quad (B) \frac{d\mathbf{F}}{dS} = -\frac{1}{8\pi}\mathbf{n}E^2 \quad (B) \frac{d\mathbf{F}}{dS} = \frac{\mathbf{E}^2}{8\pi}$$
$$(\Gamma) \frac{d\mathbf{F}}{dS} = \frac{1}{4\pi}\mathbf{n}E^2 \quad (D) \frac{d\mathbf{F}}{dS} = \frac{1}{4\pi}\mathbf{n}E \quad (D) \frac{d\mathbf{F}}{dS} = \frac{1}{4\pi}\mathbf{n}E^{1/2}$$

**17. Каков физический смысл вектора диэлектрической поляризации?**

Величина заряда единицы объема среды.

Дипольный момент единицы объема среды.

Скорость смещения частиц среды под действием электрического поля.

Объемная плотность потока энергии электростатического поля.



18. Какой из двух видов жидких и газообразных диэлектриков имеет более сильную зависимость величины диэлектрической проницаемости от температуры (в пренебрежении температурным расширением)?

Диэлектрик, молекулы которого обладают собственным дипольным моментом.

Диэлектрик, молекулы которого не обладают собственным дипольным моментом.

19. Какой ток называется постоянным током в среде?

Ток, величина которого, усредненная по «физически бесконечно малому» объему, не зависит от времени.

Ток проводимости, не зависящий от времени.

20. Что такое плотность тока проводимости?

Плотность тока, создаваемого заряженными частицами.

Плотность тока, создаваемого движущимися заряженными частицами.

Плотность тока, создаваемого упорядоченно движущимися заряженными частицами.

Плотность тока, создаваемого не связанными в пределах кристаллической ячейки электрическими зарядами, усредненная по «физически бесконечно малому» объему.

21. Выбрать выражение для закона Ома:

(А)  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}^2$     (Б)  $\mathbf{j} = \rho \mathbf{E}$     (В)  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$     (Г)  $R = \frac{L}{S} \rho$     (Д)  $R = \sigma \frac{L}{S}$

22. Является ли постоянный ток вихревым?

Да

Нет

23. Указать все правильные выражения для величины объемной мощности джоулева тепловыделения

(А)  $j^2/E$     (Б)  $j^2 E$     (В)  $\mathbf{jE}$     (Г)  $\sigma E^2$     (Д)  $j^2/\sigma$     (Е)  $j^2 \sigma$

24. Как называется величина напряженности магнитного поля, усредненная по «физически бесконечно малому» объему среды?

Напряженностью магнитного поля

Макроскопической напряженностью магнитного поля

Магнитной индукцией

25. Каков физический смысл намагниченности?

Дипольный момент единицы объема среды.

Квадрупольный момент единицы объема среды

Магнитный момент единицы объема среды

Момент импульса единицы объема среды

26. В каком случае магнитоэлектростатическое поле в среде может быть выражено через потенциал?

В случае отсутствия сторонних токов.

Магнитное поле выражается через электростатический потенциал, если в теле отсутствуют сторонние токи проводимости.

В том случае, когда в среде отсутствуют вихревые токи проводимости.

В стационарном случае.

Ни в каком случае.



27. Чему равно магнитное поле, создаваемое осесимметричным током аксиального направления на некотором расстоянии от оси?

(А)  $H(r) = \frac{I(r)}{rc}$     (Б)  $H(r) = \frac{2I(r)}{c}$     (В)  $H(r) = \frac{2I(r)}{\mu r}$   
 (Г)  $H(r) = \frac{2I(r)}{\mu rc}$     (Д)  $H(r) = \frac{2I(r)}{rc}$     (Е)  $H(r) = \frac{I^2(r)}{rc}$

28. Указать правильное выражение для закона Био и Савара

(А)  $\mathbf{H} = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j} \times \mathbf{R}]}{R^2} dV$     (Б)  $\mathbf{H} = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j} \times \mathbf{R}]}{R^3} dV$     (В)  $\mathbf{H} = \frac{1}{c} \int \frac{\mathbf{jR}}{R^3} dV$   
 (Г)  $\mathbf{H} = \frac{1}{c} \int [\mathbf{j} \times \mathbf{R}] dV$     (Д)  $\mathbf{H} = c \int \frac{[\mathbf{j} \times \mathbf{R}]}{R^3} dV$     (Е)  $\mathbf{H} = c \int \frac{[\mathbf{j} \times \mathbf{R}]}{R} dV$

29. При каких частотах изменения электромагнитного поля это поле считается квазистатическим по отношению к телу некоторых размеров?

При таких частотах, когда расстояние, проходимое электромагнитным возмущением за один период колебания поля, много больше размеров тела.

При таких частотах, когда расстояние, проходимое электромагнитным возмущением за один период колебания поля, много меньше размеров тела.

30. При каких частотах в уравнениях Максвелла для переменного электромагнитного поля в твердых проводниках для описания связи между плотностью тока и напряженностью электрического поля можно использовать закон Ома?

При частотах, много больших обратного времени свободного пробега электронов

При частотах, много меньших обратного времени свободного пробега электронов

При частотах, много меньших обратного времени пробега электронов через проводник

При любых частотах

Только при низких частотах: закон Ома не учитывает релятивизма движения электронов, существенного на высоких частотах

31. Указать выражение для линейной диэлектрической поляризации, отражающее инерционный характер поляризации.

(А)  $\mathbf{P}(t) = \int_0^{\infty} f(\tau) \mathbf{E}^2(t-\tau) d\tau$     (Б)  $\mathbf{P}(t) = 1 + \hat{\varepsilon} \mathbf{E}^2(t) f(\tau)$

(В)  $\mathbf{P}(t) = \int_0^{\infty} f(\tau) \mathbf{E}(t-\tau) d\tau$     (Г)  $\mathbf{P}(t) = \int_0^{\infty} f(\tau) \mathbf{E}(t-\tau) d\omega$

(Д)  $\mathbf{P}(t) = \mathbf{E}(t) \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau$     (Е)  $\mathbf{P}(t) = \int_{-\infty}^0 f(\tau) \mathbf{E}(t-\tau) d\tau$

32. Каковы свойства четности действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости как функций частоты?

Действительная — четная, мнимая не обладает ни четностью, ни нечетностью.

Мнимая — четная, действительная не обладает ни четностью, ни нечетностью.

Действительная — четная, мнимая — нечетная.

Действительная — нечетная, мнимая — четная.



Обе части являются четными функциями частоты.

Обе части являются нечетными функциями частоты.

Ни действительная, ни мнимая части не обладает ни четностью, ни нечетностью.

**33. К каким значениям стремятся величины действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости среды при неограниченном увеличении частоты?**

Действительная часть стремится к нулю, мнимая — к единице.

Действительная часть стремится к нулю, мнимая — к бесконечности.

Действительная часть стремится к единице, мнимая — к нулю.

Действительная часть стремится к своему статическому значению, мнимая — к нулю.

Обе величины стремятся к нулю.

Обе величины стремятся к единице.

Обе величины стремятся к бесконечности.

Каждая величина стремится к своему статическому значению.

**34. Записать приближенное выражение для диэлектрической проницаемости проводящей среды на не слишком больших частотах**

(А)  $-i \frac{4\pi}{\sigma\omega}$       (Б)  $\frac{c}{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}$       (В)  $\frac{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}{c}$       (Г)  $i \frac{4\pi\sigma^2}{\omega}$   
(Д)  $-i \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega}}$       (Е)  $\frac{4\pi\sigma}{i\omega}$       (Ж)  $-i \frac{4\pi\sigma}{\omega^2}$       (З)  $-i \frac{4\pi\omega}{\sigma}$

**35. Волне какого типа соответствуют данные выражения для поперечных компонент полей?**

$$\mathbf{E}_\perp = -ih \nabla_\perp \Psi_E, \quad \mathbf{H}_\perp = -ik [\mathbf{z}_0 \times \nabla_\perp \Psi_E].$$

Волне электрического типа.

Волне магнитного типа.

**36. Волне какого типа соответствуют данные выражения для поперечных компонент полей?**

$$\mathbf{E}_\perp = ik [\mathbf{z}_0 \times \nabla_\perp \Psi_H], \quad \mathbf{H}_\perp = -ih \nabla_\perp \Psi_H.$$

Волне электрического типа.

Волне магнитного типа.

**37. Указать правильную запись уравнения Гельмгольца для гладкого волновода с граничными условиями для волн магнитного типа**

(А)  $(\Delta_\perp - \kappa^2) \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_\Gamma = 0$       (Б)  $\left( \Delta + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_\Gamma = 0$   
(В)  $(\Delta_\perp + \kappa^2) \Psi = 0, \quad \Psi \Big|_\Gamma = 0$       (Г)  $(\Delta_\perp - \kappa^2) \Psi = 0, \quad \Psi \Big|_\Gamma = 0$   
(Д)  $(\nabla - \kappa^2) \Psi = 0, \quad \Psi \Big|_\Gamma = 0$       (Е)  $(\nabla - \kappa^2) \Psi = 0, \quad \Psi \Big|_\Gamma = 0$   
(Ж)  $(\nabla + \kappa^2) \Psi = 0, \quad \Psi \Big|_\Gamma = 0$       (З)  $(\nabla + \kappa^2) \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_\Gamma = 0$   
(И)  $(\Delta_\perp + \kappa^2) \Psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_\Gamma = 0$       (К)  $\left( \Delta^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \psi = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_\Gamma = 0$



**38. Произведение фазовой и групповой скоростей электромагнитной волны в вакуумном волноводе есть...**

Скорость света в вакууме

Удвоенная скорость света в вакууме

Скорость света в вакууме в квадрате

Удвоенная величина скорости света в вакууме, возведенной в квадрат

**39. Величина фазовой скорости электромагнитной волны в вакуумном волноводе односвязного сечения...**

всегда меньше скорости света в вакууме

всегда превышает скорость света в вакууме

превышает скорость света в вакууме при частоте ниже критической, и наоборот

меньше скорости света в вакууме для волн Е-типа и превышает ее для волн Н-типа

**40. Волна электрического типа в волноводе — это...**

волна, в которой присутствует только электрическое поле, а магнитное равно нулю

волна, электрическое поле в которой имеет отличную от нуля продольную компоненту электрического поля, а магнитное поле является поперечным

волна, электрическое поле в которой имеет отличную от нуля поперечную компоненту электрического поля, а магнитное поле поперечных компонент не содержит.

ТЕ-волна

**41. На критической частоте волноводной моды в вакуумном волноводе...**

Фазовая скорость волны стремится к скорости света в вакууме, групповая — к нулю

Фазовая скорость волны стремится к бесконечности, групповая — к нулю

Фазовая скорость волны стремится к нулю, групповая — к бесконечности, но их произведение стремится к скорости света в вакууме в квадрате

Фазовая скорость волны стремится к бесконечности, групповая — к скорости света в вакууме

Обе величины стремятся к нулю

Обе величины стремятся к бесконечности

Обе величины стремятся к скорости света в вакууме

**42. В вакуумном волноводе при неограниченном увеличении частоты...**

Фазовая скорость волн в волноводе стремится к скорости света в вакууме, групповая — к нулю

Фазовая скорость стремится к бесконечности, групповая — к нулю, но их произведение стремится к скорости света в вакууме в квадрате

Фазовая скорость стремится к нулю, групповая — к бесконечности

Фазовая скорость стремится к бесконечности, групповая — к скорости света в вакууме

Обе величины стремятся к нулю

Обе величины стремятся к бесконечности

Обе величины стремятся к скорости света в вакууме

**43. Записать выражение для мембранных функций Е-волн в прямоугольном волноводе.**

(А)  $\Psi = M \sin(\kappa_x x) \sin(\kappa_y y)$

(Б)  $\Psi = M \cos(\kappa_x x) \sin(\kappa_y y)$ .



(В)  $\Psi = M \sin(\kappa_x x) \cos(\kappa_y y)$ .      (Г)  $\Psi = M \cos(\kappa_x x) \cos(\kappa_y y)$ .

44. Записать выражение для мембранных функций Н-волн в прямоугольном волноводе.

(А)  $\Psi = M \sin(\kappa_x x) \sin(\kappa_y y)$       (Б)  $\Psi = M \cos(\kappa_x x) \sin(\kappa_y y)$ .

(В)  $\Psi = M \sin(\kappa_x x) \cos(\kappa_y y)$ .      (Г)  $\Psi = M \cos(\kappa_x x) \cos(\kappa_y y)$ .

45. Какая из волн электрического типа в прямоугольном волноводе имеет максимальную критическую длину волны?

- (А)  $H_{00}$
- (Б)  $E_{00}$
- (В)  $E_{01}$  или  $E_{10}$
- (Г)  $H_{01}$  или  $H_{10}$
- (Д)  $E_{11}$
- (Е)  $H_{11}$

46. Указать низшую волну круглого волновода

- (А)  $H_{00}$
- (Б)  $E_{00}$
- (В)  $E_{01}$
- (Г)  $E_{10}$
- (Д)  $H_{01}$
- (Е)  $H_{10}$
- (Ж)  $E_{11}$
- (З)  $H_{11}$

47. Какая пара волн в круглом волноводе является вырожденной по частоте?

- (А)  $E_{01}$  и  $E_{11}$
- (Б)  $E_{01}$  и  $H_{11}$
- (В)  $E_{11}$  и  $H_{01}$
- (Г)  $E_{11}$  и  $H_{11}$
- (Д)  $E_{21}$  и  $H_{01}$
- (Е)  $E_{21}$  и  $H_{11}$
- (Ж)  $H_{11}$  и  $H_{21}$

48. Записать выражение для мембранных функций волн в гладком круглом волноводе

(А)  $\Psi = I_n(\kappa r)(Ae^{in\varphi} + Be^{-in\varphi})$       (Б)  $\Psi = J_n(\kappa r)(Ae^{in\varphi} + Be^{-in\varphi})$

(В)  $\Psi = J_n(\kappa r)(Ae^{n\varphi} + Be^{-n\varphi})$       (Г)  $\Psi = N_n(\kappa r)(Ae^{in\varphi} + Be^{-in\varphi})$

(Д)  $\Psi = J_n(\kappa r)(Ae^{in\varphi} + Be^{-in\varphi}) + N_n(\kappa r)(Ce^{in\varphi} + De^{-in\varphi})$

49. Чему равен угол Бриллюэна волны на критической частоте?

- Нулю.
- Девяноста градусам.
- Пи.
- Двум пи.
- Трем вторым пи.



50. Угол Бриллюэна волны в вакуумном волноводе близок к нулю. Чему равна ее фазовая скорость в продольном направлении?

Близка к нулю.

Стремится к бесконечности.

Близка к скорости света в вакууме.

51. Угол Бриллюэна волны в вакуумном волноводе равен девяноста градусам. Чему равна ее групповая скорость?

Нулю.

Бесконечности.

Скорости света в вакууме.

52. Чему равна критическая длина волны для волн TEM-типа?

Нулю.

Бесконечности.

53. Выбрать правильное выражение для волнового сопротивления коаксиальной линии в системе СГС

$$(A) \rho_{\text{коакс}} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} (\ln R_2 - \ln R_1) \quad (B) \rho_{\text{коакс}} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln(R_2 - R_1)$$

$$(B) \rho_{\text{коакс}} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\ln R_2}{\ln R_1} \quad (Г) \rho_{\text{коакс}} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \ln(R_2/R_1)$$

$$(D) \rho_{\text{коакс}} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \ln(R_2/R_1) \quad (E) \rho_{\text{коакс}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\ln R_2}{\ln R_1}$$

54. Выбрать правильное выражение для волнового сопротивления полосковой линии в системе СИ

$$(A) \rho_{\text{полоск}} [Ом] = 120\pi \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{a}{d} \quad (B) \rho_{\text{полоск}} [Ом] = 20\pi \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{d}{a}\right)$$

$$(B) \rho_{\text{полоск}} [Ом] = 120\pi \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{d}{a} \quad (Г) \rho_{\text{полоск}} [Ом] = 12\pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{d}{a}$$

$$(D) \rho_{\text{полоск}} [Ом] = \frac{4\pi}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{d}{a} \quad (E) \rho_{\text{полоск}} [Ом] = 120 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{d}{a}$$

55. Во сколько раз усредненная за период колебания величина потока мощности, переносимой монохроматической волной через поперечное сечение волновода, отличается от амплитудного неусредненного значения?

Первая величина вдвое больше второй.

Первая величина вдвое меньше второй.

Первая величина в корень квадратный из двойки раз меньше второй.

Первая величина в корень квадратный из двойки раз больше второй.

Первая величина в четыре раза меньше второй.

Первая величина в четыре раза больше второй.

Эти две величины равны.

56. Как соотносится частота колебаний потока мощности, переносимой монохроматической электромагнитной волной, с частотой колебания волны?

Первая величина вдвое больше второй.



- Первая величина вдвое меньше второй.
- Первая величина в корень квадратный из двойки раз меньше второй.
- Первая величина в корень квадратный из двойки раз больше второй.
- Первая величина в четыре раза меньше второй.
- Первая величина в четыре раза больше второй.
- Эти две величины равны.

**57. Какая физическая величина играет роль коэффициента пропорциональности между погонной величиной энергии электромагнитного поля и потоком энергии, создаваемым волной в волноводе?**

- Фазовая скорость волны.
- Групповая скорость волны.
- Разность между фазовой и групповой скоростями.
- Корень квадратный из суммы квадратов фазовой и групповой скоростей.

**58. Как зависит декремент резистивного затухания волн электрического типа в волноводе от частоты? Поперечные размеры волновода и проводимость его стенок фиксированы.**

- Не зависит от частоты.
- Пропорционален корню квадратному из частоты.
- Обратно пропорционален корню квадратному из частоты.
- Пропорционален частоте.
- Обратно пропорционален частоте.
- Пропорционален частоте в степени  $3/2$ .
- Обратно пропорционален частоте в степени  $3/2$ .
- Пропорционален частоте в степени  $5/2$ .
- Обратно пропорционален частоте в степени  $5/2$ .

**59. Как зависит декремент резистивного затухания волн магнитного типа в волноводе от частоты? Поперечные размеры волновода и проводимость его стенок фиксированы.**

- Не зависит от частоты.
- Пропорционален корню квадратному из частоты.
- Обратно пропорционален корню квадратному из частоты.
- Пропорционален частоте.
- Обратно пропорционален частоте.
- Пропорционален частоте в степени  $3/2$ .
- Обратно пропорционален частоте в степени  $3/2$ .
- Пропорционален частоте в степени  $5/2$ .
- Обратно пропорционален частоте в степени  $5/2$ .

**60. Как зависит декремент резистивного затухания волн магнитного типа в круглом волноводе от частоты? Поперечные размеры волновода и проводимость его стенок фиксированы.**

- Не зависит от частоты.
- Пропорционален корню квадратному из частоты.
- Обратно пропорционален корню квадратному из частоты.
- Пропорционален частоте.
- Обратно пропорционален частоте.
- Пропорционален частоте в степени  $3/2$ .
- Обратно пропорционален частоте в степени  $3/2$ .
- Пропорционален частоте в степени  $5/2$ .
- Обратно пропорционален частоте в степени  $5/2$ .

**61. Какая электромагнитная волна называется замедленной?**



- Волна, фазовая скорость которой меньше групповой скорости
- Волна, фазовая скорость которой меньше групповой скорости
- Волна, фазовая скорость которой меньше скорости света в вакууме
- Волна, групповая скорость которой меньше скорости света в вакууме

**62. Как ширина этих полос непропускания изменяется с глубиной гофрировки?**

Увеличивается.

Уменьшается.

Ширина полос непропускания определяется только периодом гофрировки и близостью частоты к соответствующему брэгговскому резонансу.

**63. Указать правильное выражение для фазовой скорости  $m$ -ой пространственной гармоники волны в периодическом волноводе**

(А)  $v_{\phi,m} = \frac{\omega}{h_0 - h_m}$       (Б)  $v_{\phi,m} = \frac{\omega}{h_0 + m\bar{h}}$

(В)  $v_{\phi,m} = v_{\phi,0} + \frac{\omega}{m\bar{h}}$       (Г)  $v_{\phi,m} = v_{\phi,0} - \frac{\omega}{m\bar{h}}$

(Д)  $v_{\phi,m} = v_{\phi,0} + m \frac{\omega}{h}$       (Е)  $v_{\phi,m} = m v_{\phi,0}$

**64. Каким образом выделить в чистом виде поле отдельной (ненулевой) пространственной гармоники структурной волны гофрированного волновода?**

Путем адиабатически медленной трансформации гофрированного волновода в гладкий с сохранением его среднего радиуса.

Путем адиабатически медленного приведения периода гофрировки волновода к условию соответствующего брэгговского резонанса.

Путем адиабатически медленного приведения периода гофрировки волновода к условию соответствующего брэгговского резонанса и последующей медленной трансформацией полученного волновода в гладкий с сохранением его среднего радиуса.

Путем адиабатически медленного приведения периода гофрировки волновода к условию одного из брэгговского резонанса и последующего резкого обрыва гофрировки.

Никак.

**65. Как распределены поля замедленных электромагнитных волн в плоскости поперечного сечения волноведущей системы?**

Моноotonно спадают по направлению от стенок волновода к его середине.

Электрическое поле максимально в середине волновода и монотонно спадает по направлению к стенке, обращаясь на ней в нуль. Магнитное поле максимально в середине волновода и монотонно спадает по направлению к стенке, удовлетворяя на ней условию Неймана.

Спадают по направлению от стенок волновода к его середине осциллирующим образом (следуя ходу функции Бесселя с соответствующим индексом).

Возрастают по направлению от стенок волновода к его середине осциллирующим образом (следуя ходу функции Бесселя с соответствующим индексом).

**66. Какое геометрическое тело в трехмерном пространстве волновых чисел соответствует поверхности равных частот?**

Плоскость.

Сфера.

Поверхность куба.

Поверхность эллипсоида.



Гиперболоид вращения.  
Параболоид вращения.

**67. Как зависит плотность мод объемного резонатора (относительная величина интервала между соседними частотами) от объема резонатора и длины волны?**

- Пропорциональна объему резонатора и длине волны.
- Пропорциональна объему резонатора и квадрату длины волны.
- Пропорциональна объему резонатора и кубу длины волны.
- Обратно пропорциональна объему резонатора и длине волны.
- Обратно пропорциональна объему резонатора и квадрату длины волны.
- Обратно пропорциональна объему резонатора и кубу длины волны.
- Пропорциональна объему резонатора и обратно пропорциональна длине волны.
- Пропорциональна объему резонатора и обратно пропорциональна квадрату длины волны.
- Пропорциональна объему резонатора и обратно пропорциональна кубу длины волны.
- Обратно пропорциональна объему резонатора и пропорциональна длине волны.
- Обратно пропорциональна объему резонатора и пропорциональна квадрату длины волны.
- Обратно пропорциональна объему резонатора и пропорциональна кубу длины волны.

**68. Как изменятся частоты собственных колебаний резонатора при заполнении его однородным непоглощающим диэлектриком?**

- Увеличатся в «эпсилон» раз.
- Уменьшатся в «эпсилон» раз.
- Увеличатся в корень квадратный из «эпсилон» раз.
- Уменьшатся в корень квадратный из «эпсилон» раз.
- Не изменятся.

**69. Указать правильное определение добротности собственного колебания резонатора**

(А)  $Q = \omega \frac{P}{W}$       (Б)  $Q = \omega \frac{W}{P}$       (В)  $Q = P \frac{W}{\omega}$   
(Г)  $Q = \omega \frac{(W - P)}{W}$       (Д)  $Q = \frac{(W - P)}{\omega}$       (Е)  $Q = \omega \frac{dW}{dP}$

**70. Указать выражение для «правила сложения» добротностей**

(А)  $Q = \sum_{i=1}^N Q_i$       (Б)  $\frac{1}{\sqrt{Q}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{Q_i}}$   
(В)  $\frac{1}{Q} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i}$       (Г)  $\frac{1}{Q^2} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i^2}$

**71. Как связана ширина спектральной линии собственного колебания резонатора с добротностью этого колебания?**

- Пропорционально добротности.
- Обратно пропорционально добротности.
- Пропорционально квадрату добротности.
- Обратно пропорционально квадрату добротности.
- Ширина спектральной линии колебания резонатора инвариантна по отношению к добротности этого колебания.



**72. Как зависит резистивная добротность волноводного резонатора круглого сечения с симметричной волной магнитного типа от частоты колебания в пределе больших частот? Размер резонатора и проводимость его стенок фиксированы.**

Не зависит от частоты.

Пропорциональна частоте.

Обратно пропорциональна частоте.

Пропорциональна частоте в степени  $3/2$ .

Обратно пропорциональна частоте в степени  $3/2$ .

Пропорциональна частоте в степени  $5/2$ .

Обратно пропорциональна частоте в степени  $5/2$ .

**73. От чего и как зависит добротность резонатора, ограниченного двумя одинаковыми отражателями?**

Добротность пропорциональна длине резонатора, обратно пропорциональна длине волны, коэффициенту пропускания зеркал по энергии и групповой скорости волны.

Добротность пропорциональна длине резонатора, обратно пропорциональна частоте, коэффициенту отражения зеркал по энергии и групповой скорости волны.

Добротность пропорциональна частоте и коэффициенту отражения зеркал по энергии, обратно пропорциональна длине резонатора и групповой скорости волны.

Добротность пропорциональна длине волны, групповой скорости, обратно пропорциональна длине резонатора, коэффициенту пропускания зеркал по энергии.

Добротность пропорциональна длине резонатора, коэффициенту отражения зеркал по мощности и групповой скорости волны и обратно пропорциональна частоте колебания.

**74. От чего и как зависит дифракционная добротность открытого резонатора при малом угле дифракции на краях зеркал?**

Добротность пропорциональна радиусу зеркал и длине волны и обратно пропорциональна расстоянию между зеркалами.

Добротность обратно пропорциональна радиусу зеркал и длине волны.

Добротность пропорциональна квадратам радиуса зеркал и длины волны.

Добротность пропорциональна расстоянию между зеркалами и обратно пропорциональна квадратам радиуса зеркал и длины волны.

Добротность пропорциональна квадрату отношения радиуса зеркал к расстоянию между ними.

Добротность пропорциональна отношению радиуса зеркал к длине волны.

Добротность пропорциональна квадрату отношения радиуса зеркал к длине волны.

Добротность пропорциональна расстоянию между зеркалами и квадрату отношения радиуса зеркал к длине волны

Добротность пропорциональна отношению длины волны к радиусу зеркала.

Добротность обратно пропорциональна отношению длины волны к радиусу зеркала.

**75. В чем смысл взаимной ортогональности полей собственных колебаний резонатора?**

Для каждого собственного колебания резонатора магнитное поле в любой точке резонатора ортогонально электрическому.

Для любых двух колебательных мод скалярное произведение векторов их электрических (магнитных) полей равно нулю в среднем по объему резонатора.

Для любых двух колебательных мод векторное произведение векторов их электрических (магнитных) полей равно нулю в каждой точке резонатора.

Для двух любых различных колебательных мод их электрические (магнитные) поля, усредненные за период колебания, ортогональны друг другу в каждой точке резонатора.

Для любых двух колебательных мод скалярное произведение вектора электрического поля одной моды на вектор магнитного поля другой моды равно нулю в среднем по объему резонатора.



Для двух любых различных колебательных мод их электрические (магнитные) поля ортогональны друг другу в каждой точке резонатора.

Для любых двух колебательных мод скалярное произведение векторов их электрических (магнитных) полей равно нулю в любой точке резонатора.

Для каждой колебательной моды векторное произведение векторов магнитного и электрического полей равно нулю в каждой точке резонатора.

Для каждой колебательной моды скалярное произведение векторов магнитного и электрического полей равно нулю в любой точке резонатора.

**76. Указать все правильные варианты записи для нормы собственного колебания резонатора**

$$\begin{array}{lll}
 \text{(А)} \quad \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{E}_m \mathbf{E}_m dV & \text{(Б)} \quad \frac{c}{4\pi} \int \mathbf{E}_m \mathbf{E}_m dS & \text{(В)} \quad \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{E}_m^2 dV \\
 \text{(Г)} \quad -\frac{1}{4\pi} \int \mathbf{H}_m \mathbf{H}_m dV & \text{(Д)} \quad \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2 dV & \text{(Е)} \quad \frac{1}{8\pi} \int \mathbf{E}_m \mathbf{E}_n dV \\
 \text{(Ж)} \quad \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{E}_n \mathbf{E}_m dV & \text{(З)} \quad \frac{c}{8\pi} \int [\mathbf{E}_m \times \mathbf{E}_m] dV & \text{(И)} \quad \frac{1}{4\pi} \int [\mathbf{H}_m \times \mathbf{H}_n] dS
 \end{array}$$

**77. Каков физический смысл нормы собственного колебания резонатора (в случае слабого затухания)?**

Учетверенная величина мощности (усредненной за период колебания), переносимой через поперечное сечение резонатора полем колебания единичной амплитуды.

Удвоенная величина мощности потерь (усредненных за период колебания) при единичной амплитуде колебания.

Удвоенная величина энергии (усредненная за период колебания) в объеме резонатора при единичной амплитуде колебания.

Учетверенная величина энергии (усредненная за период колебания), приходящаяся на единицу объема резонатора при единичной амплитуде колебания.

**78. Выбрать правильную форму записи для уравнения возбуждения волноводной моды в нестационарном случае.**

$$\begin{array}{ll}
 \text{(А)} \quad \frac{1}{v_{zp}} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{N} e^{ihz} \int_{S_{\perp}} \mathbf{j}_{\omega} \hat{\mathbf{E}}_{\omega} dS & \text{(Б)} \quad \frac{1}{v_{zp}} \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{1}{N} e^{ihz} \int_{S_{\perp}} \mathbf{j}_{\omega} \hat{\mathbf{E}}_{\omega} dS \\
 \text{(В)} \quad \frac{1}{v_{zp}} \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -\frac{1}{N} e^{ihz} \int_{S_{\perp}} \mathbf{j}_{\omega} \hat{\mathbf{E}}_{\omega}^* dS & \text{(Г)} \quad \frac{1}{v_{zp}} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{N} e^{ihz} \int_{S_{\perp}} \mathbf{j}_{\omega} \hat{\mathbf{E}}_{\omega} dS \\
 \text{(Д)} \quad \frac{1}{v_{zp}} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{N} e^{ihz} \int_{S_{\perp}} \mathbf{j}_{\omega} \hat{\mathbf{E}}_{\omega}^* dS & \text{(Е)} \quad \frac{1}{v_{zp}} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial z} = -N e^{ihz} \int_{S_{\perp}} \mathbf{j}_{\omega} \hat{\mathbf{E}}_{\omega}^* dS
 \end{array}$$

**79. Каков физический смысл нормы волноводной моды?**

Учетверенная величина мощности (усредненной за период колебания), переносимая через поперечное сечение волновода волной единичной амплитуды данной моды.

Учетверенная величина энергии (усредненная за период колебания), приходящаяся на единицу длины волновода с волной данной моды, при единичной амплитуде волны.

**80. Выбрать правильную форму записи для уравнения резонансного возбуждения моды резонатора заданным монохроматическим током:**



$$\begin{array}{ll}
 \text{(А)} \quad \frac{\partial A}{\partial z} + \omega'' A = -\frac{1}{2N} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_\omega^* dV & \text{(Б)} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \omega'' A = -\frac{1}{2N} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_\omega dV \\
 \text{(В)} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \omega' A = -\frac{1}{2N} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_\omega dV & \text{(Г)} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \omega'' A = -\frac{1}{2} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_\omega^* dV \\
 \text{(Д)} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \omega'' A = -\frac{1}{2N} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_\omega^* dV & \text{(Е)} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + (\omega' - \omega'') A = -\frac{1}{2} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_\omega^* dV
 \end{array}$$

**81. В резонаторе под действием монохроматического тока, имеющего некоторую частоту, возбужден набор стационарных колебаний. Структура полей в каждом из них определяется соответствующей собственной модой резонатора. С какими частотами будут происходить колебания возбужденных мод?**

С частотами собственных колебательных мод резонатора.

С частотой возбуждающего тока.

На комбинационных частотах, представляющих собой суммы различных гармоник частот собственных колебаний и частоты возбуждающего тока.

**82. При каких условиях, рассматривая движение заряженной частицы в электромагнитном поле высокой частоты, мы можем считать это поле слабонеоднородным?**

Если за время характерного смещения частицы величина поля не претерпевает существенных изменений.

Если движение частицы представимо в виде суперпозиции высокочастотных осцилляций и медленного дрейфового движения.

Если амплитуда высокочастотных осцилляций частицы много меньше дрейфового смещения частицы за один период колебания поля.

Если смещение частицы за период колебания поля мало в масштабе пространственного изменения поля.

Если дрейфовое смещение частицы за один период колебания поля много меньше амплитуды ее высокочастотных осцилляций.

**83. Сила Миллера...**

Пропорциональна заряду частицы, амплитуде электрического поля, обратно пропорциональна частоте поля, массе частицы и направлена по градиенту квадрата амплитуды поля.

Пропорциональна квадрату заряда частицы, амплитуде электрического поля, обратно пропорциональна квадратам массы частицы и частоты поля. Направление действия силы определяется градиентом амплитуды поля, умноженным на знак заряда частицы.

Пропорциональна квадратам заряда частицы и амплитуды электрического поля, обратно пропорциональна квадратам массы частицы и частоты поля и направлена в сторону скорейшего убывания величины квадрата модуля амплитуды поля.

Рабочая программа составлена на основании:

федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлениям подготовки 03.06.01 Физика и астрономия и 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи, утвержденных приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 867;

- паспортов специальностей научных работников 01.04.04 — физическая электроника; 01.04.13 — электрофизика, электрофизические установки; 05.27.02 — вакуумная и плазменная электроника;



- программ-минимумов кандидатских экзаменов по выше перечисленным специальностям, утвержденных приказом Минобрнауки РФ от 08.10.2007 г. № 274.

Составитель рабочей программы  
проф. ООД, д.ф.-м.н., с.н.с.



И. В. Пегель

Рабочая программа рассмотрена и одобрена ученым советом ИСЭ СО РАН.  
Протокол № 13 от «24» августа 2018 г.

Секретарь ученого совета, д.ф.-м.н.



И. В. Пегель



**Дополнения и изменения в рабочей программе**  
за \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ учебный год

В рабочую программу дисциплины «Электродинамика сверхвысоких частот» вносятся следующие дополнения и изменения:

Дополнения и изменения внес \_\_\_\_\_  
(должность, Ф.И.О., подпись)

Рабочая программа пересмотрена и одобрена на заседании ученого совета ИСЭ СО РАН.  
Протокол № \_\_\_ от «    » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Секретарь ученого совета

подпись

Ф. И. О.