

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук
(ИТПЭ РАН)**

Программа одобрена
на заседании
Ученого совета ИТПЭ РАН

Протокол № 2
« 12 » апреля 2022 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИТПЭ РАН

К.Н. Розанов

« 12 » апреля 2022 г.



**ПРОГРАММА
кандидатского экзамена по дисциплине**

1.3.13. «Электрофизика, электрофизические установки»
(наименование дисциплины)

Москва 2022 г.

Введение

Настоящая программа составлена на основе дисциплин специализаций направлений «Электроэнергетика», «Техническая физика», связанных с особенностями анализа механизмов взаимодействия физических тел, веществ, макро- и микрочастиц с электрическим, магнитным и электромагнитным полями в различных средах и вакууме, с изучением методов и принципов использования электрофизических явлений в технических приложениях.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по энергетике, электрификации энергетическому машиностроению при участии экспертного совета по физике и Московского инженерно-физического института (технического университета).

I. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Электростатика. Закон Кулона. Теорема Гаусса. Проводники в электрическом поле. Работа электрических сил, потенциал электрического поля. Уравнение Пуассона и Лапласа. Потенциал объемных и поверхностных зарядов. Двойной электрический слой. Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия электрического поля. Пондеромоторные силы.

Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Свободные и связанные заряды. Уравнения электрического поля в произвольной среде. Пондеромоторные силы в диэлектриках. Энергия электрического поля в диэлектриках. Тензор натяжений электрического поля. Пьезоэлектрики. Сегнетоэлектрики.

Магнитостатика. Магнитное поле постоянных токов. Сила Лоренца. Векторный потенциал магнитного поля. Уравнения магнитного поля. Потенциальные и соленоидальные магнитные поля. Граничные условия в магнитном поле токов. Пондеромоторные силы в магнитном поле. Взаимная индукция и самоиндукция линейных проводников.

Магнитное поле в веществе. Намагниченность магнитов. Уравнения макроскопического магнитного поля в магнетиках. Механизм намагничивания магнетиков. Теорема Лармора. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм.

Электромагнитное поле в неподвижной среде. Электромагнитные волны. Уравнение Максвелла. Теорема Пойнтинга. Уравнение для потенциалов электромагнитного поля. Решение волнового уравнения. Запаздывающие и опережающие потенциалы. Скорость распространения электромагнитных возмущений.

Квазистационарное электромагнитное поле. Глубина проникновения магнитного поля в проводник. Скин-эффект.

Распространение электромагнитного поля в волноводах. Критическая длина волны. Фазовая и групповая скорость. Дисперсия.

Электромагнитные колебания в полых резонаторах.

Излучение заряженных частиц. Условия излучения в неограниченном пространстве. Поле излучения системы зарядов. Волновая зона. Дипольное излучение осциллятора. Излучение релятивистской частицы. Магнитотормозное излучение. Переходное излучение. Черенковское излучение электромагнитных волн в среде. Спонтанное и индуцированное излучение. Вынужденное комбинационное рассеяние.

Численные методы решения краевых задач электродинамики. Метод конечных разностей. Быстрое преобразование Фурье, методы прогонки и циклической редукции. Метод конечных элементов. Вариационно-разностные методы. Функции Грина. Метод интегральных уравнений.

II. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Линейные цепи. Методы расчета линейных электрических цепей в стационарном режиме. Уравнения Кирхгофа. Метод комплексных амплитуд. Метод контурных токов. Метод узловых напряжений. Метод эквивалентного генератора. Цепи с зависимыми источниками. Цепи с взаимными индуктивностями.

Методы расчета линейных цепей в нестационарных режимах. Классический метод. Операторный метод (преобразование Лапласа). Метод переменных состояний. Спектральный метод (преобразование Фурье). Интеграл Дюамеля. Цепные схемы, передаточные функции. Обратная связь, электрические фильтры.

Цепи с распределенными параметрами. Длинные линии. Телеграфные уравнения. Решение телеграфных уравнений в стационарном режиме. Падающие и отраженные волны. Распределение токов и напряжений в линии. Входное сопротивление линии. Согласование длинных линий.

Решение телеграфных уравнений в нестационарном режиме. Переходные процессы при коммутации предварительно заряженных линий.

Синтез линейных электрических цепей. Синтез пассивных двухполюсников. Свойства входных функций пассивных двухполюсников. Положительные вещественные функции. Критерии физической реализуемости. Алгоритм Кауэра. Алгоритм Фостера.

Элементы синтеза четырехполюсника. Синтез четырехполюсников по трем заданным Z - или Y -параметрам, по передаточной функции в виде Γ -образного звена из rC или rL -элементов. Синтез неуравновешенных четырехполюсников в виде каскадного соединения.

Нелинейные цепи. Методы расчета нелинейных цепей постоянного тока. Метод условной линеаризации. Графические методы – лестничная структура, схемы с двумя узлами. Метод кусочно-линейной аппроксимации. Трансформатор с ферромагнитным сердечником. Цепи с ферромагнетиками. Феррорезонанс.

Методы расчета нелинейных цепей в нестационарном режиме. Метод интегрируемой аппроксимации. Метод кусочно-линейной аппроксимации. Метод медленно меняющихся амплитуд. Метод малого параметра. Метод интегральных уравнений. Вариационные методы. Цепи с инерционными элементами, параметрические цепи.

III. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Газы. Основы кинетической теории газов. Давление газа, уравнение состояния идеального газа. Распространение звуковых волн в идеальном газе. Ударные волны в идеальном газе. Эффективное сечение и средняя длина свободного пробега. Процессы переноса.

Плазма. Основные понятия. Кинетическая теория плазмы, распределение частиц по скоростям, эффективные сечения и частоты столкновений. Механизмы ионизации и рекомбинации в плазме. Термическая ионизация, уравнение Саха. Дебаевский радиус.

Плазменная частота. Испускание и поглощение фотонов. Диффузия и дрейф частиц. Амбиполярная диффузия. Соотношение между подвижностью и коэффициентами диффузии.

Проводимость низкотемпературной плазмы. Проводимость полностью ионизированного газа (формула Спитцера). Образование непрерывного спектра в плазме. Свободно-связанные переходы в нагретом ионизированном газе.

Системы и методы плазменной энергетики. Плазменный пиролиз органических веществ. Плазменные системы переработки токсичных отходов. Генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны), физические основы и техническая реализация.

Жидкости. Макроскопические свойства жидкостей. Силы взаимодействия молекул. Явление переноса в жидкостях.

Твердые тела. Кристаллическая решетка. Силы связи в решетке. Электронный газ, модель потенциальной ямы Шоттки. Зонная модель. Проводники, полупроводники, диэлектрики. Работа выхода. Явление сверхпроводимости.

IV. ВЕЩЕСТВО В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Эмиссия заряженных частиц с поверхности вещества. Эмиссия электронов из твердого тела. Термоэмиссия, автоэлектронная эмиссия, фотоэмиссия, вторичная электронная эмиссия, взрывная эмиссия, ионная эмиссия.

Газовый разряд. Формы разряда в газах, самостоятельный и несамостоятельный разряды. Лавинный разряд. Закон Пашена. Стримерная форма разряда, переход от стримера к канальной форме разряда. Коронный и тлеющий разряды. Дуговой разряд. Изоляционные свойства газовых диэлектриков. Сильноточный газовый разряд в плотных средах.

Прохождение тока через жидкость. Проводимость электролитов. Топливные элементы. Технический электролиз. Проводимость жидких изоляторов. Диэлектрические потери. Электрическая прочность и пробой жидких диэлектриков. Ударные волны, генерируемые в конденсированной среде. Разряд в жидкостях.

Проводники, твердые диэлектрики, полупроводники в сильных полях. Проводимость. Криопроводимость. Сверхпроводимость. Эффект Холла. Термоэлектричество. Электрический взрыв проводников. Диэлектрические потери, электрическая прочность, пробой в твердом диэлектрике. Поверхностный разряд.

Механическая прочность диэлектриков в сверхсильных магнитных полях. Магнитные материалы.

Сверхпроводимость в постоянных и высокочастотных полях. Эффект Месснера. Остаточное сопротивление.

V. НАКОПЛЕНИЕ И КОММУТАЦИЯ ЭНЕРГИИ БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ

Пространственно-временная концентрация энергии. Способы накопления энергии и типы накопителей. Характеристики накопителей энергии, сравнительные характеристики различных типов накопителей. Максимальная плотность энергии у различных типов накопителей, физические ограничения на плотность энергии в накопителях. Способы передачи энергии от

накопителей к нагрузке, оптимизация процесса передачи энергии. Согласование различных видов энергии.

Емкостные накопители энергии (ЕНЭ). Емкостные накопители энергии на основе малоиндуктивных импульсных конденсаторов. Принципы построения генераторов импульсных напряжений и генераторов импульсных токов. Классификация емкостных накопителей энергии. Защита конденсаторных батарей на высокую энергию. Коммутаторы емкостных накопителей энергии на основе конденсаторов (вакуумные, газовые, жидкостные разрядники, разрядные колонны). Схемы поджига и синхронизации разрядников. Особенности работы коммутаторов в генераторах импульсных напряжений и генераторах импульсных токов.

Методы формирования импульсов с помощью емкостных накопителей энергии. Емкостные накопители на линиях с распределенными параметрами. Первичные и промежуточные емкостные накопители энергии. Особенности работы емкостных накопителей энергии на линиях с распределенными параметрами в режиме заряда (хранения) и разряда. Оптимизация по напряжению и мощности накопителей энергии на линиях коаксиального типа с распределенными параметрами. Коммутаторы емкостных накопителей энергии на линиях с распределенными параметрами различных типов (газовые, жидкостные и твердотельные разрядники; разрядники V/N-типа, рельсовые разрядники). Особенности работы коммутаторов накопителей на линиях, конструкции коммутаторов. Методы обеспечения режима многоканальной коммутации.

VI. ФИЗИКА СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Распространение сильноточных пучков в вакууме. Предельный ток, ограниченный пространственным зарядом. Предельный ток Альвена. Формирование виртуального катода. Нейтрализованный самофокусированный пучок. E-слой. Магнитная изоляция в диодах и линиях передач.

Распространение сильноточных пучков в плазме и газе. Электромагнитные поля, возбуждаемые пучком при инжекции. Равновесное состояние пучка в плазме. Нестационарная ионизация при инжекции пучка в газах. Токовая нейтрализация пучка.

Генерация сильноточных электронных и ионных пучков. Взрывная эмиссия в сильноточном диоде. Плоский диод в режиме Богуславского-Ленгмюра. Парапотенциальный поток в плоском диоде. Коаксиальный диод с магнитной изоляцией. Сильноточные ионные диоды – диод с магнитной изоляцией, рефлексный диод, пинч-рефлексный диод.

Волны и неустойчивости в сильноточных пучках заряженных частиц. Волны в холодной стационарной плазме. Продольные волны в холодной дрейфующей плазме. Собственные волны в сильноточных пучках. Волны пространственного заряда в замагниченном пучке.

Электростатическая и электродинамическая неустойчивости волн пространственного заряда. Циклотронный резонанс. Неустойчивости в многокомпонентной системе.

VII. ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Особенности физических процессов в низкотемпературной плазме. Плазмохимические, металлургические и другие устройства на основе совместного применения мощных электрических дуговых разрядов и электромагнитных полей. Физика приэлектродных процессов в сильноточных дуговых разрядах.

VIII. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Компьютер как инструмент научной работы. Математическое моделирование с применением компьютерных технологий. Возможности пакетов математических вычислительных программ для решения прикладных задач.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА

Уравнения Максвелла. Уравнение непрерывности. Теорема взаимности. Аналог волнового уравнения в электродинамике. Плоские волны в изотропной и анизотропной средах.

Временная дисперсия. Волновые пакеты, групповая скорость. Плотность энергии волнового пакета при наличии дисперсии.

Электродинамика среды с одновременно отрицательными ε и μ (среды Веселаго). Обратные волны.

Разложение поля на плоские волны (распространяющиеся и нераспространяющиеся) в однородной среде. Волновой (рэлеевский) предел разрешения. Передаточная функция линейной системы. Линзы Веселаго и Пендри, влияние потерь и детектирования на изображение. Многослойная и ассиметричная линза Пендри.

Мультипольное разложение. Дальнее и ближнее поле диполя. Взаимодействие диполей.

Поверхностные волны и состояния в электродинамике и квантовой механике. Обнаружение поверхностной волны по спектру прохождения.

Фотонные кристаллы. Флоке-гармоники. Брэгговское отражение как механизм образования запрещенных зон. Зонная структура фотонных кристаллов.

Ближние поля в металлах и диэлектриках (полное отражение от границы). Перенос энергии ближними полями. Плазмонный резонанс. Резонансное образование разрешенных зон в плазмонных кристаллах.

Объемные магнитооптические (МО) эффекты. Квантовое и классическое объяснение МО эффектов. Усиление вращения плоскости поляризации в эксперименте Фарадея. Влияние поверхности на эффект Фарадея. Усиление эффекта Фарадея резонаторами: дефект-модой, оптическим аналогом таммовского состояния, поверхностным плазмоном.

Длинные линии. Волноводы (прямоугольный, круглый). Медленные волны. Резонаторы. Смещение частоты, вызванное изменением заполненного резонатора. Возбуждение резонатора: метод собственных частот.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит, 2003.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретический курс физики в 10 томах. Т. 2. Теория поля / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Под ред. Л.П. Питаевского. М.: Физматгиз, 2001.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретический курс физики в 10 томах. Т. 5. Электродинамика сплошных сред. / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Под ред. Л.П. Питаевского. М.: Физматгиз, 2001.
4. Демирчян К.С., Чечурин В.А. Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высш.шк., 1986.
5. Бутырин П.А., Козьмина И.С., Миронов И.В. Основы компьютерных технологий электротехники. М.: Изд-во МАИ, 2000.
6. Попов В.И. Основы теории цепей. М.: Высш.шк., 2007.
7. Зельдович И.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Изд.3, исправл., М.: URSS, 2008.
8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Изд.3, испр. и доп., М.: URSS, 2009.
9. Шнеерен Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Изд. 2-е, М.: Энергоатомиздат, 1992.
10. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 1-4 / Под ред. В.Е. Фортова, М.: Наука, 2000.
13. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры, М.: Мир, 1977.
14. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. М.: Высш.шк., 1972.
15. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. / Издание 5-е, переработанное, М.: Энергоатомиздат, 1989.
16. Л.О.Чуа, Лен-Мин Лин Машинный анализ электронных схем. М.: Энергия, 1980.
17. Савельев И.В. Основы теоретической физики, т.1, т.2 / 2-е изд., М.: Наука. 1991.
18. Техника высоких напряжений / Под ред. М.С.Костенко, М.: Высш.шк., 1983.
19. Накопление и коммутация энергии больших плотностей / Под ред. У. Бостика, М.: Мир, 1979.
20. Физика высоких плотностей энергии / Под ред. П. Кальдаролы, Г. Кнопфеля, М.: Мир, 1974.
21. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля, М.: Мир, 1972.
22. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц, М.: Мир, 1984.
23. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов / Под ред. Б.З. Каценеленбаума, М.: Эдиториал УРСС, 2001.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика / Под ред. Ю.В. Пименова, М.: Радио и связь, 2000.
2. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн, М.: Радио и связь, 2000.
3. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. / Изд. 2-ое, М.: URSS, 2012.
4. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. / Изд. 6-ое, М.: URSS, 2012.
5. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ, М.: Высш.шк., 1990.
6. Черенкова Е.Л., Чернышов О.В. Распространение радиоволн, М.: Радио и связь, 1988.
7. Яковлев О.И. Космическая радиофизика, М.: Научная книга, 1998.
8. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского, М.: Радиотехника, 2003.
9. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского, М.: Радиотехника, 2008.

10. Гоноровский И.С., Демин М.П. Радиотехнические цепи и сигналы, М.: Радио и связь, 1994.
11. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы, М.: Высш.шк., 2000.
12. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем, М.: Радио и связь, 2004.
13. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Тарлыков В.А. Основы лазерной техники, Л.: Машиностроение, 1990.
14. Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности, М.: Радио и связь, 1991.
15. Кугушев А.М., Голубева Н.С., Митрохин В.И. Основы электроники. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов, М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

Заместитель директора
по научной работе ИТПЭ РАН



А.М. Мерзликин