

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по науке и инновациям

Комаров И.И.

« ____ » _____ 2025 г.

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В
АСПИРАНТУРУ**

Группа научных специальностей – 2.4. Энергетика и электротехника

Научная специальность – 2.4.3 Электроэнергетика (Техника высоких напряжений)

Москва, 2025

**Программа специальной дисциплины по кафедре
Техники и электрофизики высоких напряжений**

1. Электрофизические процессы в газах, жидких и твердых диэлектриках.

Движение заряженных частиц в электрическом поле. Их энергия и скорость дрейфа, подвижность. Диффузия, амбиполярная диффузия. Столкновения частиц, их вероятность, сечение столкновения, средняя длина свободного пробега. Упругие и неупругие столкновения частиц. Процессы диссоциации молекул. Процессы возбуждения и ионизации атомов и молекул. Различные виды ионизации в газах. Образование и развал отрицательных ионов. Процессы ионной и электронной рекомбинации. Процессы на катоде: авто- и фото- и термоэлектронная эмиссия. Поведение ионизованного газа в электрических и магнитных полях. Понятие плазмы. Дебаевский радиус. Равновесная и неравновесная плазма.

Поляризация диэлектриков в постоянном и переменном электрическом поле, виды поляризации. Механизмы появления свободных электрических зарядов в диэлектриках. Виды электропроводности жидких диэлектриков. Проводимость твёрдых диэлектриков. Диэлектрические потери, тангенс угла диэлектрических потерь, влияние температуры.

2. Теория и практика электрических разрядов в условиях, характерных для техники высоких напряжений.

Развитие электрического разряда в газах. Лавина электронов. Условие самостоятельности разряда. Понятия начального напряжения возникновения разряда и пробивного напряжения. Закон Пашена и закон подобия электрических разрядов. Разряд в сильно неоднородном электрическом поле. Влияние полярности на начальные напряжения. Лавинная, стримерная и лидерная формы разряда. Условия лавинно-стримерного и стример-лидерного перехода, влияние полярности на пробивные напряжения. Развитие разряда при импульсных напряжениях. Время формирования разряда, понятие вольт-секундной характеристики. Вольт-секундные характеристики воздушных промежутков при грозовых и коммутационных импульсах.

Коронный разряд при различных видах воздействующего напряжения. Начальная напряжённость коронного разряда. Униполярный и биполярный коронные разряды. Распределение напряженности электрического поля и плотности объёмного заряда в промежутке при униполярном коронном разряде. Вольт-амперная характеристика коронного разряда. Потери на корону при переменном напряжении на проводах линии электропередачи. Электромагнитные и акустические помехи. Разряд в газе вдоль поверхности твёрдого диэлектрика. Влияние структуры электрического поля, материала и толщины слоя твердого диэлектрика на начальные и пробивные напряжения поверхностного разряда. Стримерный и

скользящий разряды по поверхности диэлектрика. Разряд по загрязнённой и увлажнённой поверхности диэлектрика.

Механизмы пробоя жидких диэлектриков. Пробой жидкости и предразрядные процессы, влияние примесей, материала электродов, температуры и давления. Развитие импульсного разряда в жидкости. Формы пробоя твёрдых диэлектриков. Влияние формы и размеров электродов, вида и длительности воздействующего напряжения. Тепловой пробой твёрдых диэлектриков.

3. Физика молнии и молниезащита.

Электричество атмосферы, глобальная электрическая цепь. Электрические характеристики «ясной погоды» и облаков. Механизмы электризации частиц в облаках. Теория грозы. Виды молнии. Физическая картина формирования молнии. Электрические характеристики разрядов молнии. Статистический характер параметров молнии. Характеристики грозовой деятельности. Опасные воздействия молнии на поражаемые объекты. Общая характеристика электромагнитных, газодинамических, тепловых и электродинамических воздействий молнии. Молниеотводы. Основные элементы конструкции молниеотводов и требования к ним. Защитное действие молниеотводов. Методика определения зон защиты молниеотводов по экспериментальному, электрогеометрическому и вероятностному методу. Зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов.

Заземление молниеотводов. Естественные и искусственные заземлители. Стационарное и импульсное сопротивление заземлителей. Молниезащита воздушных линий электропередачи (ВЛ). Грозовые отключения ВЛ, защищаемых тросовыми молниеотводами. Кривая опасных параметров. Грозовые отключения ВЛ без тросовых молниеотводов. Грозовые отключения ВЛ при индуктированных перенапряжениях. Применение защитных аппаратов на ВЛ для повышения эффективности молниезащиты. Молниезащита электрических подстанций. Защита от прямых ударов молнии. Защита подстанции от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с линии. Защищенный подход к подстанции. Методика оценки эффективности молниезащиты подстанции. Молниезащита зданий, промышленных сооружений и коммуникаций. Классификация зданий и сооружений по степени опасности поражения молнией. Особенности молниезащиты взрывоопасных и пожароопасных объектов. Молниезащита летательных аппаратов. Особенности поражения молнией летательных аппаратов и их молниезащиты. Персональная защита от молнии.

4. Внутренние перенапряжения в электрических системах и их ограничение.

Механизмы возникновения перенапряжений. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью. Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сетях 6-35 кВ.

Феррорезонансные перенапряжения. Феррорезонансные перенапряжения в сетях с электромагнитными трансформаторами напряжения. Перенапряжения при работе вакуумных выключателей. Перенапряжения при коротких замыканиях на линии и при их отключении. Перенапряжения на ВЛ при автоматическом повторном включении. Установившиеся перенапряжения в электрических сетях высокого напряжения. Влияние емкостного эффекта, насыщения стали трансформаторов, коронного разряда и подключённых реакторов на напряжение промышленной частоты. Перенапряжения при несимметричных коротких замыканиях на воздушных линиях. Ограничители перенапряжений (ОПН). Конструкция ограничителей. Энергоемкость ОПН.

5. Изоляция установок высокого напряжения.

Основные требования к электрической изоляции, условия работы.

Внешняя изоляция установок и оборудования высокого напряжения. Характерные изоляционные промежутки в атмосферном воздухе. Особенности внешней изоляции. Разрядные напряжения чисто воздушных промежутков при разных видах воздействующего напряжения. Линейная изоляция. Конструкции и материалы изоляторов. Выбор типа и числа изоляторов и воздушных изоляционных промежутков ВЛ и открытых распределительных устройств. Вольт-секундные характеристики.

Внутренняя изоляция установок и оборудования высокого напряжения. Требования, предъявляемые к изоляции и изоляционным материалам. Основные виды внутренней изоляции. Электрическая прочность внутренней изоляции. Понятие о кратковременной и длительной электрической прочности. Основные факторы, влияющие на кратковременную электрическую прочность внутренней изоляции. Старение изоляции. Механизмы старения. Частичные разряды и их характеристики. Длительная электрическая прочность внутренней изоляции: закономерности старения изоляции, основные технические средства ограничения темпов электрического старения. Основы конструирования внутренней изоляции. Характерные формы электрических полей в изоляционных конструкциях и методы их регулирования. Краевой эффект. Применение комбинированных диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью. Полупроводящие покрытия, применение экранов.

Структура изоляции силовых трансформаторов: главная и продольная изоляция. Маслобарьерная изоляция силовых трансформаторов. Кратковременная и длительная электрическая прочность внутренней изоляции трансформаторов и конденсаторной изоляции. Кабельные линии: области применения, виды изоляции силовых кабелей высокого напряжения. Конструкция изоляции кабелей высокого напряжения с градированием изоляции и без градирования. Изоляция кабельных муфт. Проходные изоляторы: конструкции, изоляционные материалы. Элегазовые изоляционные конструкции: выключатели и измерительные трансформаторы с элегазовой изоляцией, КРУЭ. Разрядные характеристики

промежутков с элегазовой изоляцией при различных формах воздействующего напряжения и давления.

6. Испытания и диагностика изоляции в условиях эксплуатации.

Задачи диагностики и контроля технического состояния изоляции оборудования и установок высокого напряжения. Координация изоляции устройств высокого напряжения.

Общие правила проведения испытаний изоляции высоким напряжением промышленной частоты, грозовыми и коммутационными импульсами, постоянным (выпрямленным) напряжением. Особенности воздействия на изоляцию разных видов испытательного напряжения.

Контроль состояния изоляции установок высокого напряжения по характеристикам частичных разрядов (ЧР). Основы электрического и акустического методов регистрации и измерения характеристик ЧР. Связь тангенса угла диэлектрических потерь с основными электрическими характеристиками однородной и неоднородной изоляции. Факторы, влияющие на результаты измерений $\tan\delta$. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь. Использование явления абсорбции для оценки состояния изоляции оборудования высокого напряжения. Основные внешние проявления абсорбционных процессов при постоянном и переменном напряжениях, использование их для диагностики. Измерение сопротивления изоляции. Ёмкостные методы контроля влажности изоляции. Контроль состояния маслонаполненного оборудования путём испытания проб масла. Измерение физико-химических характеристик масла, нормы, выявляемые дефекты. Хроматографический анализ газов, растворённых в масле. Акустический и тепловизионный контроль состояния изоляции оборудования высокого напряжения. Ультразвуковая дефектоскопия.

7. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения.

Испытания высоким напряжением и сильными токами. Цели и объекты испытаний, общая схема испытательных комплексов, нормированные испытательные высокие напряжения и импульсные токи. Испытательные установки высокого напряжения промышленной частоты. Испытательные трансформаторы высокого напряжения, каскадные схемы испытательных трансформаторов и резонансные схемы для испытаний переменным высоким напряжением. Установки высокого напряжения постоянного тока. Схемы с выпрямителями, каскадный выпрямитель. Электростатический генератор Ван-де-Граафа, роторный генератор. Генераторы импульсных напряжений (ГИН). Основные схемы одноступенчатых и многоступенчатых ГИН, их элементы и параметры. Типы накопителей энергии для испытательных и электрофизических установок и их характеристики. Ёмкостные накопители энергии. Разрядный контур ёмкостного накопителя энергии и его схема замещения. Индуктивные накопители энергии. Работа индуктивного накопителя энергии на омическую, индуктивную и ёмкостную нагрузку. Механические накопители энергии.

Основные типы ударных генераторов и их характеристики. Накопители энергии с распределенными параметрами. Основные типы формирующих линий и их свойства. Основные схемы ГИН на основе длинных линий без умножения и с умножением напряжения. Генератор Блюмляйна. Измерение высоких напряжений. Измерительные шаровые разрядники, электростатические вольтметры. Делители напряжения. Требования к делителям, общая схема замещения, типы, частотные характеристики, реакция на прямоугольный импульс. Омические делители напряжения. Емкостные делители напряжения. Смешанные делители напряжения. Измерение сильных токов. Измерение сильных импульсных и периодических токов с помощью шунтов. Измерение сильных токов с помощью воздушного трансформатора тока и устройства на основе эффекта Холла. Измерения напряженности электрического поля. Измерения напряженности магнитного поля. Электрофизические установки высокого напряжения. Ускорители макротел. Рельсотроны, индукционные ускорители. Формирование и ускорение электронных пучков.

8. Высоковольтные электротехнологические процессы, устройства и аппараты.

Направления применения высоких напряжений и сильных токов в технологических процессах. Характеристика аэрозольных систем. Зарядка частиц. Силы, действующие на частицы в электрических полях. Движение заряженных частиц. Сопротивление среды движению частиц. Числа Рейнольдса и Стокса. Осаждение частиц из ламинарного и турбулентного потока.

Процессы на осадительном электроде. Силы адгезии частиц к электроду. Поведение отдельно взятой частицы в электрическом поле в поле коронного разряда. Характеристики порошкового слоя. Зарядка и разрядка слоя на электроде. Обратная корона с порошкового слоя. Время возникновения обратной короны. Сила, действующая на слой в электрическом поле и при коронном разряде в промежутке. Влияние слоя на вольт-амперную характеристику коронного разряда. Коллективные процессы в аэрозольных системах. Электростатическое рассеяние монодисперсного аэрозоля. Влияние концентрации частиц на характеристики коронного разряда. Движение частиц по силовым линиям электрического поля. Движение частиц поперек силовых линий. Электротехнологические процессы и аппараты, основанные на применении сильных электрических полей. Очистка газов от аэрозольных частиц электрофильтрами. Конструкция электрофильтров. Степень очистки газов в электрофильтрах. Особенности определения эффективности осаждения в электрофильтрах. Способы борьбы с обратной короной в электрофильтрах. Электросепарация. Классификация электросепараторов. Сепарация по электропроводности. Трибоэлектростатическая сепарация. Пироэлектрическая сепарация. Диэлектрическая сепарация. Нанесение покрытий в электрическом поле. Электроокраска.

Электропневмораспылители. Нанесение порошковых покрытий. Электropечать. Технологии обезвреживания нефтепродуктов. Высоковольтные плазмохимические технологии. Основы плазмохимических преобразований. Генераторы озона и озонные технологии. Электросинтез озона. Технологии конверсии газов в плазме газового разряда. Модификация поверхности материалов в плазме газового разряда. Процессы статической электризации и методы борьбы с проявлениями статического электричества. Нейтрализаторы зарядов статического электричества. Высоковольтные технологии импульсного воздействия на материалы. Электрогидравлические технологии. Электроэрозионная обработка материалов. Магнитно-импульсная обработка материалов.

9. Методы расчета электрических и магнитных полей в технике высоких напряжений.

Основные уравнения и граничные условия, описывающие электростатическое поле. Методы эквивалентных зарядов и интегральных уравнений для случаев однородной и неоднородной сред. Применение метода эквивалентных зарядов для расчёта электрических полей вблизи воздушных линий электропередачи. Применение метода интегральных уравнений для расчёта электрических полей устройств высокого напряжения. Принципы расчёта электрических полей методом конечных элементов. Метод конечных разностей для расчета электрических полей в однородных средах. Понятие самосогласованного электрического поля с объёмным зарядом и особенности его расчёта. Постановка задачи расчета магнитного поля промышленной частоты вблизи объектов электроэнергетики. Магнитные поля систем проводников с током. Магнитные поля в пролете воздушных линий электропередачи.

10. Электромагнитная совместимость.

Источники электромагнитных воздействий на объектах электроэнергетики. Чувствительные к электромагнитным воздействиям оборудование и системы на объектах электроэнергетики. Каналы передачи помех. Кондуктивные и полевые помехи. Нормативная база обеспечения электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики. Закон об электромагнитной совместимости. Допустимые уровни электромагнитных помех на объектах электроэнергетики. Биологические проблемы обеспечения электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики. Допустимые электрические и магнитные поля для населения и персонала на рабочих местах. Методы и средства определения электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики. Методы и средства защиты от электромагнитных воздействий вторичного оборудования и систем связи.

Основная литература:

1. Бортник И.М., Белогловский А.А, Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н., Калинин А.В., Кучинский Г.С., Ларионов В.П., Монастырский АЕ., Орлов А.В., Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г., Соколова М.В., Темников А.Г. Электрофизические основы техники высоких напряжений. Учебник для вузов / Под ред. Верещагина И.П. - М: Издательский дом МЭИ, 2010. - 704 с.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник, под ред. И.П. Верещагина. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 732 с.
3. А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов, А.В. Жуков, И.П. Кужекин, А.Г. Темников. Электромагнитная совместимость и молниезащита в современной электроэнергетике: учебн. пособие, под ред. Б.К. Максимова. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 688 с.
4. Высоковольтные электротехнологии. Учеб. пособие / О.А. Аношин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; Под ред. И.П. Верещагина. - М.: Изд-во МЭИ, 2000.
5. Физико-математические основы техники высоких напряжений. Учеб. пособие для вузов / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, Е.С. Колечицкий и др.; Под ред. К.П. Кадомской. - М.: Энергоатомиздат, 1995.
6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. - М.: Физматлит, 2001.
7. Техника высоких напряжений. Учебник для вузов / И.Н. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова и др. Под ред. Г.С. Кучинского. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003.
8. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения: учебное пособие / И.П. Белоедова, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
9. Е. Куффель, В. Цаенгль, Дж. Куффель. Техника и электрофизика высоких напряжений. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. - 520 с.
10. А.Г. Темников, И.П. Верещагин, С.А. Кривов, Г.З. Мирзабекян, В.В. Панюшкин. Сборник задач по высоковольтным электротехнологиям: Учебное пособие / Под ред. Темникова А.Г., - М.: Издательство МЭИ, 2004. - 64 с.
11. А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010.
12. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учеб. для вузов / Под ред. В.П. Ларионова. 3-е изд., перераб. и дополн. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
13. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. Учеб. для вузов / М.: Энергоатомиздат, 1987.
14. Авруцкий В.А., Кужекин П.П., Чернов Е.Н. Испытательные и электрофизические

установки. Техника эксперимента. Учеб. пособие / Под ред. И.П. Кужекина. - М.: МЭИ, 1983.

15. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. Учебное пособие для вузов / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.П. Пашин. - М.: Энергия, 1974.

16. А. Шваб. Измерения на высоком напряжении. Измерительные приборы и способы измерений. Изд. 2-е. Пер. с нем. И.П. Кужекина. - М.: Энергоатомиздат.

17. Колечицкий Е.С., Романов В.А., Карташев В.Г. Защита биосферы от влияния электромагнитных полей: - М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

18. М.В. Соколова, С.А. Кривов. Электрофизические процессы в газовой изоляции. Учебное пособие - М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

19. М.В. Соколова, С.А. Кривов, Л.Л. Черненский, В.В. Воеводин, А.В. Лазукин, Н.Ю. Лысов, А.Г. Темников. Поверхностный электрический разряд в электротехнологических устройствах и изоляционных конструкциях: учебн. пособие, - 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 128 с.

Дополнительная литература:

1. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К. и др. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. / под ред. Дьякова А.Ф.. - М.: Энергоатомиздат, 2003. - 768 с.

2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Издательство Интеллект, 2009.

3. Веревкин В.Н., Смелков Г.И., Черкасов В.Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита. - М.: МИЭЭ, 2006.

4. Александров Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды: Учеб. пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1989.

5. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

6. Колечицкий Е.С. Расчёт электрических полей устройств высокого напряжения. - М.:

«Согласовано»

Директор ИЭЭ

к.т.н., доцент

Тульский В.Н.