

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе



Драгунов В.К.

« 16 »

июня

2015 г.

Программа аспирантуры

Направление 13.06.01 Электро- и теплотехника

Направленность (специальность) 05.14.12 Техника высоких напряжений

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины по выбору

«Специальные физико-математические вопросы техники высоких напряжений»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ДВ.1.2

Всего: 108 часов

Семестр 1,

в том числе 6 часов – контактная работа,
84 часа – самостоятельная работа,
18 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки

13.06.01 Электро- и теплотехника,

код и название направления

утвержденного приказом Минобрнауки России от 30 июля 2014 г. № 878, и паспорта специальности, указанной в номенклатуре специальностей научных работников

05.14.12 Техника высоких напряжений,

шифр и название специальности

утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является формирование углублённых знаний об электрофизических процессах в газовой изоляции, обеспечивающих в ней возникновение и развитие электрических разрядов, о лавинной и стримерной стадиях разряда, униполярном коронном разряде и их современных математических моделях, численных методах решения входящих в них уравнений и применение среды MATLAB для проведения вычислительных экспериментов по исследованию электрических разрядов.

Задачами дисциплины являются:

1. Изучение электрофизических процессов в газовой изоляции, протекающих в сильных электрических полях, лавинной и стримерной стадий разряда в газе, их физико-математических моделях в воздухе;
2. Формирование знаний об условии самостоятельности разряда и его реализации в однородном и неоднородном электрическом поле;
3. Изучение униполярного коронного разряда, его характеристик и математической модели;
4. Формирование знаний о численных методах и вычислительных алгоритмах решения дифференциальных уравнений в частных производных и их систем, составляющих названные выше математические модели;

5. Знакомство с возможностями среды для научных и инженерных расчётов MATLAB для проведения вычислительных экспериментов по исследованию электрических разрядов.

В процессе освоения дисциплины **формируются следующие компетенции:**

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-1).

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

3. Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-4).

4. Способностью планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6).

5. Владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1).

6. Владение культурой научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий (ОПК-2).

7. Способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности (ОПК-3).

8. Способность к экспериментальным и теоретическим исследованиям электрических разрядов и электрофизических процессов в различных средах, а также в изоляции установок, устройств и аппаратов высокого напряжения (ПК-1).

9. Способность к разработке физических основ проектирования и конструирования, эксплуатации и методов диагностики изоляционных

конструкций высокого напряжения (ПК-2).

10. Способность к экспериментальным и теоретическим исследованиям воздействия электрических разрядов, сильных электрических и магнитных полей на дисперсные системы, твердые и жидкие материалы (ПК-4).

11. Владение современными методами и средствами расчёта электрических и магнитных полей, диагностики изоляции и испытания оборудования высокого напряжения (ПК-7).

12. Способность к экспериментальным и теоретическим исследованиям формирования перенапряжений в электрических системах и разработке методов их расчета (ПК-8).

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

знать:

- основные электрофизические процессы, обеспечивающие развитие электрического разряда в газах, и их математическое описание в моделях разрядных явлений (ПК-1);

- лавинную и стримерную стадии электрического разряда в газах и их диффузионно-дрейфовые модели для случая воздушного изоляционного промежутка (ПК-9);

- униполярный коронный разряд, его математическое описание и математическую модель его внешней области (ПК-9);

- метод конечных разностей в применении к численному решению дифференциальных уравнений в частных производных (Пуассона и переноса носителей заряда), его основные идеи и объекты (ПК-9);

- алгоритмы совместного решения уравнений Пуассона и переноса носителей заряда при численном моделировании электрических разрядов (ПК-9);

– понятие, основные элементы и схему вычислительного эксперимента, его роль в исследованиях электрических разрядов в ТВН (ПК-9).

уметь:

– формулировать математические модели лавинной и стримерной стадий электрического разряда в воздухе (ПК-9);

– применять метод конечных разностей для дискретизации уравнений моделей лавинной и стримерной стадий электрического разряда в воздухе (ПК-9);

– реализовывать полученные дискретные конечно-разностные модели разряда в виде вычислительных алгоритмов и программ для ЭВМ в среде MATLAB (ПК-9).

владеть:

– навыками проведения вычислительных экспериментов по исследованию лавинного, стримерного разряда и униполярного коронного разряда в воздушных изоляционных промежутках (ПК-9).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электрофизические процессы в газовой изоляции.

Роль и место электрических разрядов в технике высоких напряжений. Классификация электрических разрядов в воздушной изоляции конструкций установок высокого напряжения. Упругие и неупругие столкновения частиц. Процессы возбуждения атомов и молекул газа. Диссоциация молекул. Ударная ионизация атомов и молекул свободными электронами. Процессы в газе с захватом и отрывом электронов. Рекомбинация ионов и электронов. Процессы в газе с участием фотонов. Процессы на электродах и вблизи их поверхности при электрическом разряде в газах. Характеристики коллективного движения заряженных частиц в электрическом поле: функция распределения электронов по энергиям и уравнение Больцмана, диффузия, дрейф электронов в поле, их подвижность и средняя длина свободного пробега, ударная ионизация и прилипание электронов, термическая ионизация. Математическое описание этих процессов в моделях разрядных явлений.

2. Лавинный механизм развития электрического разряда.

Понятие и основные параметры электронной лавины. Диффузионно-дрейфовая математическая модель электронной лавины. Влияние поля зарядов электронной лавины на её радиус и число электронов в ней. Расчётное и эмпирическое определение параметров лавины. Статистика лавинного усиления.

3. Условие самостоятельности электрического разряда.

Понятия вторичной ионизации в газе и условия самостоятельности электрического разряда. Условие самостоятельности разряда в лавинной форме. Начальное напряжение. Закон Пашена. Влияние неоднородности поля и полярности приложенного напряжения на возникновение самостоятельного разряда в резконеоднородном электрическом поле, закон подобия электрических разрядов.

4. Униполярный коронный разряд.

Униполярный коронный разряд в воздухе, его формы и структура, математическое описание униполярного коронного разряда. Математическая модель внешней области униполярного коронного разряда. Вольтамперные характеристики униполярного коронного разряда.

5. Стримерный механизм развития электрического разряда.

Условие перехода электронной лавины в стример и её критические параметры: число электронов в лавине, её радиус и пройденный ею путь. Условие самостоятельности разряда в стримерной форме. Особенности формирования и распространения анодонаправленного и катодонаправленного стримера. Роль фотоионизации газа излучением разряда в их распространении. Особенности возникновения и развития стримеров в промежутках с резконеоднородным полем, влияние полярности приложенного напряжения. Диффузионно-дрейфовая математическая модель стримера. Расчётное и эмпирическое определение параметров стримера, характерные значения параметров стримеров. Ветвление стримеров и гипотезы, объясняющие этот процесс.

6. Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей.

Применение метода конечных разностей для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных, основные идеи и объекты метода. Уравнение Пуассона, пятиточечная разностная схема его аппроксимации, понятие узловых потенциалов, их вычисление методом верхней релаксации. Уравнения диффузии и переноса, разностные схемы их аппроксимации, устойчивость разностных схем. Разностные схемы для уравнения, одновременно учитывающего диффузию и направленное движение носителей заряда. Алгоритмы совместного решения уравнений Пуассона и переноса носителей заряда при численном моделировании электрических разрядов. Оценка современных научных достижений в решении исследовательских задач в области математического моделирования электрических разрядов в воздухе.

7. Основы работы с программой для научных расчётов MATLAB.

Структура программы MATLAB. Выполнение простейших расчётов. Файлы MATLAB. Основы программирования в MATLAB: пользовательские функции, циклы вычисления по условию. Работа с векторами и матрицами. Построение графиков. Применение встроенных функций MATLAB для численных расчётов: дифференцирование, интегрирование, решение систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, систем обыкновенных дифференциальных уравнений, оптимизационных задач. Современные web-ресурсы по решению научных и научно-образовательных задач средствами MATLAB и интернет-коммуникации в этой области на государственном языке Российской Федерации в целях собственного профессионального развития.

8. Вычислительные эксперименты в ТВН.

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент, их роль в исследованиях электрических разрядов в ТВН. Понятие, основные элементы и схема вычислительного эксперимента. Место численного метода и вычислительного алгоритма в вычислительном эксперименте. Требования к вычислительным методам. Принципы планирования и проведения вычислительных экспериментов.

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины:

1 семестр – дифференцированный зачет.

Вопросы для самоконтроля и проведения зачета

Вопросы для самоконтроля

1. Каково место электрических разрядов в технике высоких напряжений и в природе?
2. Назовите основные стадии электрических разрядов в воздухе, приведите и поясните их классификацию.

3. Какова роль процессов возбуждения и диссоциации молекул газа в развитии электрического разряда?

4. Что такое ударная ионизация атомов и молекул свободными электронами и при каких условиях она происходит?

5. Какова роль процессов прилипания и отлипания электронов в формировании и развитии электрического разряда в воздухе? В каких газах они возможны?

6. Каков механизм фотоионизации молекул в воздухе? Какую роль играет этот процесс в формировании и развитии электрического разряда?

7. Какую роль играют процессы на электродах и вблизи них при электрическом разряде в газах?

8. Что такое термическая ионизация? Опишите её место в развитии электрических разрядов в газах.

9. Какие способы математического описания перечисленных процессов Вы знаете?

10. Что такое электронная лавина и каковы её основные параметры?

11. Запишите уравнения, начальные и граничные условия диффузионно-дрейфовой математической модели электронной лавины.

12. Как и почему поле зарядов электронной лавины влияет на её радиус и число электронов в ней?

13. Какова роль диффузии в развитии электронной лавины?

14. Приведите количественные оценки числа электронов и радиуса электронной лавины к моменту её перехода в стример. Какова роль случайных процессов в её развитии?

15. В чём заключается условие самостоятельности электрического разряда? Как оно связано с понятием вторичной ионизации в газе?

16. Сформулируйте условие самостоятельности разряда в лавинной форме, понятие начального напряжения и закон Пашена.

17. Как и почему влияют неоднородность электрического поля и полярность приложенного напряжения на возникновение самостоятельного

разряда в резконеоднородном поле?

18. Сформулируйте закон подобия электрических разрядов.

19. Что такое униполярный коронный разряд в воздухе? Каковы его формы и структура?

20. Запишите математическую модель для чехла и внешней области униполярного коронного разряда (уравнения, начальные и граничные условия).

21. Сформулируйте математическую модель внешней области униполярного коронного разряда (уравнения и граничные условия) и приведите её решение для системы электродов «коаксиальные цилиндры».

22. Что такое вольтамперная характеристика униполярного коронного разряда? Каков её общий вид для различных систем электродов?

23. В чём состоит условие перехода электронной лавины в стример? Как оценить её критические параметры (число электронов в ней, её радиус, пройденный ею путь)?

24. Сформулируйте условие самостоятельности электрического разряда в стримерной форме.

25. В чём заключаются особенности формирования и распространения анодонаправленного и катодонаправленного стримера? Какова роль фотоионизации газа излучением разряда в их развитии?

26. В чём состоят особенности возникновения и развития стримеров в промежутках с резконеоднородным полем? Как влияет полярность приложенного напряжения на эти процессы?

27. Сформулируйте диффузионно-дрейфовую математическую модель стримера (уравнения, начальные и граничные условия).

28. Приведите характерные значения параметров анодонаправленного и катодонаправленного стримеров: напряжённости поля и концентрации электронов в канале, напряжённости в головке, скорости распространения, напряжённости внешнего поля, в котором возможно их устойчивое распространение.

29. Чем объясняется ветвление стримеров?

30. В чём заключаются основные положения метода конечных разностей для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Назовите основные объекты метода.

31. Запишите пятиточечную разностную схему аппроксимации уравнения Пуассона. Что такое узловые потенциалы? Как они вычисляются методом верхней релаксации?

32. Каковы разностные схемы аппроксимации уравнений диффузии и переноса? В чём заключается понятие их устойчивости? Сформулируйте условия устойчивости этих разностных схем.

33. Какие разностные схемы применяются для численного решения уравнения, одновременно учитывающего диффузию и направленное движение носителей заряда?

34. Сформулируйте алгоритм совместного решения уравнений Пуассона и переноса носителей заряда при численном моделировании электрических разрядов.

35. Оцените современные научные достижения в решении исследовательских задач в области математического моделирования электрических разрядов в воздухе.

36. Какова структура программы MATLAB? Каков порядок выполнения простейших расчётов в ней?

37. Файлы MATLAB. Основы программирования в MATLAB: пользовательские функции, циклы вычисления по условию.

38. Работа с векторами и матрицами в MATLAB.

39. Как построить графики функций двух и трёх переменных в MATLAB?

40. Какие встроенные функции MATLAB для численных расчётов Вы знаете (численное дифференцирование, интегрирование, решение систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, систем обыкновенных дифференциальных уравнений, оптимизационных задач)? Каков порядок их использования?

41. Какие современные web-ресурсы по решению научных и научно-

образовательных задач средствами MATLAB и интернет-коммуникациям в этой области Вы знаете?

42. Какую роль играют математическое моделирование и вычислительные эксперименты в исследованиях электрических разрядов в ТВН?

43. Что такое вычислительный эксперимент, каковы его основные элементы и схема?

44. Охарактеризуйте место численного метода и вычислительного алгоритма в вычислительном эксперименте.

45. Перечислите и поясните требования к вычислительным методам.

46. В чём заключаются принципы планирования и проведения вычислительных экспериментов?

Вопросы, включаемые в билеты для проведения зачета

1. Роль и место электрических разрядов в технике высоких напряжений.
2. Классификация электрических разрядов в воздухе.
3. Упругие и неупругие столкновения частиц. Процессы возбуждения атомов и молекул газа. Диссоциация молекул.
4. Ударная ионизация атомов и молекул свободными электронами.
5. Процессы в газе с захватом и отрывом электронов.
6. Рекомбинация ионов и электронов.
7. Процессы в газе с участием фотонов.
8. Процессы на электродах и вблизи их поверхности при электрическом разряде в газах.
9. Термическая ионизация.
10. Математическое описание процессов ударной ионизации, прилипания и отлипания свободных электронов, рекомбинации ионов и электронов, фотоионизации в моделях разрядных явлений.
11. Понятие и основные параметры электронной лавины.
12. Диффузионно-дрейфовая математическая модель электронной лавины.

13. Влияние поля зарядов электронной лавины на её радиус и число электронов в ней.

14. Расчётное и эмпирическое определение параметров лавины. Статистика лавинного усиления.

15. Понятия вторичной ионизации в газе и условия самостоятельности электрического разряда.

16. Условие самостоятельности разряда в лавинной форме. Начальное напряжение. Закон Пашена.

17. Влияние неоднородности поля и полярности приложенного напряжения на возникновение самостоятельного разряда в резконеоднородном электрическом поле.

18. Закон подобия электрических разрядов.

19. Униполярный коронный разряд в воздухе, его формы и структура.

20. Математическое описание униполярного коронного разряда.

21. Математическая модель внешней области униполярного коронного разряда.

22. Вольтамперные характеристики униполярного коронного разряда.

23. Условие перехода электронной лавины в стример и её критические параметры: число электронов в лавине, её радиус, пройденный ею путь.

24. Условие самостоятельности разряда в стримерной форме.

25. Особенности формирования и распространения анодонаправленного и катодонаправленного стримера. Роль фотоионизации газа излучением разряда в их распространении.

26. Особенности возникновения и развития стримеров в промежутках с резконеоднородным полем, влияние полярности приложенного напряжения.

27. Диффузионно-дрейфовая математическая модель стримера.

28. Расчётное и эмпирическое определение параметров стримера, характерные значения параметров стримеров.

29. Ветвление стримеров и гипотезы, объясняющие этот процесс.

30. Основные положения и объекты метода конечных разностей для

численного решения дифференциальных уравнений в частных производных.

31. Уравнение Пуассона, пятиточечная разностная схема его аппроксимации, понятие узловых потенциалов, их вычисление методом верхней релаксации.

32. Уравнения диффузии и переноса, разностные схемы их аппроксимации, их устойчивость разностных схем.

33. Разностные схемы для уравнения, одновременно учитывающего диффузию и направленное движение носителей заряда.

34. Алгоритмы совместного решения уравнений Пуассона и переноса носителей заряда при численном моделировании электрических разрядов.

35. Оценка современных научных достижений в решении исследовательских задач в области математического моделирования электрических разрядов в воздухе.

36. Структура программы MATLAB и выполнение простейших расчётов в её среде.

37. Файлы MATLAB. Основы программирования в MATLAB: пользовательские функции, циклы вычисления по условию.

38. Работа с векторами и матрицами в MATLAB.

39. Построение графиков в MATLAB.

40. Применение встроенных функций MATLAB для численных расчётов: дифференцирование, интегрирование, решение систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, систем обыкновенных дифференциальных уравнений, оптимизационных задач.

41. Современные web-ресурсы по решению научных и научно-образовательных задач средствами MATLAB и интернет-коммуникации в этой области на государственном языке Российской Федерации в целях собственного профессионального развития.

42. Роль математического моделирования и вычислительных экспериментов в исследованиях электрических разрядов в ТВН.

43. Понятие, основные элементы и схема вычислительного эксперимента.

44. Место численного метода и вычислительного алгоритма в вычислительном эксперименте.

45. Требования к вычислительным методам.

46. Принципы планирования и проведения вычислительных экспериментов.

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. – 2-е изд., перераб., и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. – 3-е изд., перераб., и доп. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009.

3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учебное пособие для физико-математических специальностей вузов. – 6-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.

4. Калиткин Н.Н. Численные методы: учебное пособие для вузов / Н.Н. Калиткин; ред. А.А. Самарский. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014.

5. Белогловский А.А. Трёхмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе: проблемы и пути их решения // Электричество. 2011. № 3. С. 19-29.

6. Белогловский А.А. Верещагин И.П. Трёхмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учётом ветвления: экономичный расчёт электрического поля // Электричество. 2011. № 11. С. 17-24.

Дополнительная литература:

7. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2009.
8. Кетков Ю., Кетков А., Шульц М. MATLAB 7. Программирование, численные методы. – СПб.: «БХВ-Петербург», 2005.
9. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. 3-е издание: Перевод с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.
10. Черненский Л.Л., Белогловский А.А. Математическое моделирование в ТЭВН. Сборник лабораторных работ: методическое пособие по курсу «Математическое моделирование». – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
11. Интернет-ресурсы:
 - 11.1. Белогловский А.А., Черненский Л.Л. Математическое моделирование с примерами из техники высоких напряжений: численные методы решения задач математического моделирования в ТЭВН. – М.: НИУ «МЭИ», 2011. Web-ресурс: <http://fee.mpei.ac.ru/mathmod/>.
 - 11.2. <http://matlab.exponenta.ru/>.
 - 11.3. <http://www.youtube.com/user/MATLABinRussia>.
 - 11.4. <http://www.tvn-moscow.ru/>.