

**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Направление подготовки/специальность: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника**

**Наименование образовательной программы: Высоковольтные электротехнологии**

**Уровень образования: высшее образование - магистратура**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Математическое моделирование в технике и электрофизике высоких  
напряжений и высоковольтных электротехнологиях**

**Москва  
2022**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель  
(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Белогловский А.А.
	Идентификатор	R86421057-BeloglovskyAA-22f7da4

А.А.  
Белогловский  
(расшифровка подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы  
(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Лебедева Н.А.
	Идентификатор	R75716a03-LebedevaNA-9930664

Н.А.  
Лебедева  
(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры  
(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Темников А.Г.
	Идентификатор	Ra0abb123-TemnikovAG-2d4db00

А.Г.  
Темников  
(расшифровка  
подписи)

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Способен принимать участие в проведении научных исследований в области объектов профессиональной деятельности (высоковольтных электротехнологий)

ИД-3 Демонстрирует знания и умения разрабатывать и использовать методы численного моделирования в научных исследованиях в области высоковольтных электротехнологий

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Письменная работа

1. Защита лабораторной работы №1: «Оптимизация параметров системы электродов при помощи численных методов математического программирования» (Лабораторная работа)

2. Защита лабораторной работы №2: «Расчёт потенциала и напряжённости электрического поля заданной системы зарядов, распределённых в пространстве» (Лабораторная работа)

3. Защита лабораторной работы №3: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с сосредоточенными параметрами» (Лабораторная работа)

4. Защита лабораторной работы №4: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с распределёнными параметрами» (Лабораторная работа)

5. Защита расчётного задания: «Расчёт и анализ электрических полей в изоляционных конструкциях установок высокого напряжения с газовой изоляцией» (Расчётно-графическая работа)

6. Контрольная работа: «Решение линейных и нелинейных уравнений и их систем» (Контрольная работа)

7. Тест: «Математическое моделирование, понятие, задачи и схема вычислительного эксперимента, его место в ТЭВН» (Тестирование)

## БРС дисциплины

2 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %							
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6	КМ-7
	Срок КМ:	2	3	5	8	12	16	16
Введение в математическое моделирование в ТЭВН и ВВЭТ								
Введение в математическое моделирование в ТЭВН и ВВЭТ	+							
Методы решения линейных и нелинейных уравнений и их систем								

Методы решения линейных и нелинейных уравнений и их систем		+	+	+			
Основы решения нелинейных задач математического программирования							
Основы решения нелинейных задач математического программирования		+	+	+			
Приближённое вычисление определённых интегралов функций одной переменной							
Приближённое вычисление определённых интегралов функций одной переменной		+	+	+			
Численные методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений							
Численные методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений					+	+	
Дифференциальные уравнения в частных производных и их применение в ТЭВН и ВВЭТ							
Дифференциальные уравнения в частных производных и их применение в ТЭВН и ВВЭТ					+	+	
Интегральные методы расчёта электрических полей							
Интегральные методы расчёта электрических полей							+
Вес КМ:	10	20	10	10	10	10	30

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

### I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-1	ИД-3ПК-1 Демонстрирует знания и умения разрабатывать и использовать методы численного моделирования в научных исследованиях в области высоковольтных электротехнологий	Знать: понятие, основные этапы и средства проведения вычислительного эксперимента, как современного метода исследования электрофизических процессов в технике высоких напряжений численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов характерные математические модели электрических цепей УВН,	Тест: «Математическое моделирование, понятие, задачи и схема вычислительного эксперимента, его место в ТЭВН» (Тестирование) Контрольная работа: «Решение линейных и нелинейных уравнений и их систем» (Контрольная работа) Защита лабораторной работы №1: «Оптимизация параметров системы электродов при помощи численных методов математического программирования» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №2: «Расчёт потенциала и напряжённости электрического поля заданной системы зарядов, распределённых в пространстве» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №3: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с сосредоточенными параметрами» (Лабораторная работа) Защита лабораторной работы №4: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с распределёнными параметрами» (Лабораторная работа) Защита расчётного задания: «Расчёт и анализ электрических полей в изоляционных конструкциях установок высокого напряжения с газовой изоляцией» (Расчётно-графическая работа)

		<p>методы дискретизации этих моделей и вычислительные алгоритмы расчёта токов и напряжений в них, как инструментов, позволяющих прогнозировать свойства и поведение УВН математические модели и применяемые для их дискретизации интегральные численные методы, позволяющие вычислять параметры электрических полей электроэнергетических и электрофизических УВН</p> <p>Уметь:</p> <p>ставить задачи исследования, выбирать в соответствии с ними и использовать численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных</p>	
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

		<p>экспериментов формулировать математические модели электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, применять методы их дискретизации для численного определения токов и напряжений в цепях с целью прогнозирования их свойств и поведения формулировать математические модели, применять интегральные численные методы для их дискретизации и реализовывать их в виде программ для ЭВМ для расчёта параметров электрических полей электроэнергетических и электрофизических УВН с целью прогнозирования их свойств и поведения рассчитывать, анализировать и регулировать электрические поля электроэнергетических и электрофизических УВН с целью ограничения</p>	
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

		воздействия их полей на население и персонал	
--	--	----------------------------------------------	--



## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. Тест: «Математическое моделирование, понятие, задачи и схема вычислительного эксперимента, его место в ТЭВН»

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Тестирование

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Вариант задания выдаётся студенту в аудитории (отправляется почтой ОСЭП). Студент подготавливает письменный развёрнутый ответ и сдаёт на проверку преподавателю (отправляет фотографию или скан задания почтой ОСЭП). Время выполнения - 60 минут.

#### Краткое содержание задания:

Тест включает в себя три различных вопроса, охватывающих следующие темы:

- 1 Математическое моделирование и вычислительный эксперимент, их роль в различных областях ТЭВН и ВВЭТ;
- 2 Дифференциальные уравнения в частных производных и формулируемые с их использованием типичные математические модели электрофизических процессов в ТЭВН и ВВЭТ;
- 3 Схема вычислительного эксперимента;
- 4 Вычислительный алгоритм;
- 5 Требования к вычислительным методам;
- 6 Погрешности округления вещественных чисел в компьютере, накопление таких погрешностей и его влияние на свойства вычислительных методов.

#### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: понятие, основные этапы и средства проведения вычислительного эксперимента, как современного метода исследования электрофизических процессов в технике высоких напряжений</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.Что такое вычислительный эксперимент? Перечислите его этапы, приведите принципиальную схему вычислительного эксперимента. Охарактеризуйте место вычислительного эксперимента в ТЭВН.</li><li>2.Что такое вычислительный алгоритм? В чём заключается понятие его устойчивости?</li><li>3.Перечислите и охарактеризуйте погрешности, возникающие в ходе реализации вычислительного алгоритма.</li><li>4.Что такое вычислительный эксперимент? Каковы его этапы? Каково место вычислительного эксперимента в ТЭВН?</li><li>5.Что такое численный метод? Какова роль выбора численного метода в вычислительном эксперименте?</li><li>6.Сформулируйте требования, предъявляемые к численным методам и вычислительным алгоритмам.</li><li>7.Запишите и поясните математическую модель внешней области униполярного коронного разряда.</li><li>8.Запишите и поясните математическую модель переходного процесса зарядки конденсатора через последовательно соединённые с ним индуктивность и сопротивление при подключении в цепь ЭДС.</li></ol>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Описание шкалы оценивания:**

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 90

Описание характеристики выполнения знания: Тест считается выполненным на оценку «Отлично» если выполнены следующие условия: - даны правильные ответы не менее чем на 90% вопросов теста, исключая вопросы, на которые студент должен дать свободный ответ; - на все вопросы, предполагающие свободный ответ, студент дал правильный и полный ответ.

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Тест считается выполненным на оценку «Хорошо» если выполнены следующие условия: - даны правильные ответы не менее чем на 75% вопросов теста, исключая вопросы, на которые студент должен дать свободный ответ; - на все вопросы, предполагающие свободный ответ, студент дал правильный ответ, но допустил незначительные ошибки и не показал необходимой полноты.

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Тест считается выполненным на оценку «Удовлетворительно» если выполнены следующие условия: - даны правильные ответы не менее чем на 50% вопросов теста, исключая вопросы, на которые студент должен дать свободный ответ; - на все вопросы, предполагающие свободный ответ, студент дал непротиворечивый ответ, или при ответе допустил значительные неточности и не показал полноты.

**КМ-2. Контрольная работа: «Решение линейных и нелинейных уравнений и их систем»**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в письменной форме в виде изложения развернутого ответа на вопросы задания. Время на подготовку ответа – 60 минут.

**Краткое содержание задания:**

Контрольная работа состоит из двух задач и посвящена методам решения линейных и нелинейных уравнений и их систем. Рассматриваются такие темы, как:

- 1 Решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ);
- 2 Прямые методы решения СЛАУ;
- 3 Метод Гаусса численного решения СЛАУ и условия его применимости;
- 4 Обусловленность СЛАУ и устойчивость её решения. Число обусловленности;
- 5 Влияние погрешностей округления при решении СЛАУ методом Гаусса;
- 6 Методы регуляризации;
- 7 Итерационные методы решения СЛАУ и условия их сходимости;
- 8 Итерационные методы решения нелинейных уравнений и их систем, метод Ньютона 1-го порядка точности и его сходимость.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов	1.Метод Гаусса для решения систем линейных алгебраических уравнений. 2.Метод Якоби для решения систем линейных алгебраических уравнений и условие его сходимости.
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов</p>	<p>3.Метод Зейделя для решения систем линейных алгебраических уравнений и условие его сходимости.  4.Метод верхней релаксации для решения систем линейных алгебраических уравнений и условие его сходимости.  5.Обусловленность системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и устойчивость её решения. Число обусловленности.  6.Понятие о регуляризации системы линейных алгебраических уравнений.  7.Итерационные методы решения нелинейных уравнений и их систем, метод Ньютона 1-го порядка точности и его сходимость.</p>
<p>Уметь: ставить задачи исследования, выбирать в соответствии с ними и использовать численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов</p>	<p>1.Решите методом Гаусса следующую систему линейных алгебраических уравнений:</p> $5x_1 + 4x_2 + 2x_3 = 20,$ $4x_1 + 10x_2 + 6x_3 = 15,$ $2x_1 + 6x_2 + 5x_3 = 10.$ <p>2.Найдите методом Ньютона корень нелинейного уравнения:  <math>F(x) = x \times \ln(x) - 1 = 0</math>  на отрезке: <math>0 \leq x \leq 2</math>.</p> <p><b>Указание:</b> задайтесь начальным приближением <math>x = 1</math> и <math>\varepsilon = 0,01</math>.</p> <p>3.Решите итерационным методом Зейделя следующую систему линейных алгебраических уравнений:</p> $5x_1 + 4x_2 + 2x_3 = 20,$ $4x_1 + 10x_2 + 6x_3 = 15,$ $2x_1 + 6x_2 + 5x_3 = 10.$ <p><b>Указание:</b> задайтесь начальным приближением <math>x_1 = 4, x_2 = -1, x_3 = 2</math> и <math>\varepsilon = 0,01</math>.</p> <p>4.Найдите методом Ньютона корень нелинейного уравнения:  <math>F(x) = x \times \sin(2x-1) - 1/2 = 0</math>  на отрезке: <math>0,5 \leq x \leq 1,0</math>.</p> <p><b>Указание:</b> задайтесь начальным приближением <math>x =</math></p>

**Описание шкалы оценивания:***Оценка: 5**Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Контрольная работа считается выполненной на оценку «Отлично», если студент правильно выполнил практическое задание (задания) и показал при ответе на вопросы, что владеет материалом изучаемой дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

*Оценка: 4**Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Контрольная работа считается выполненной на оценку «Хорошо», если студент правильно выполнил практическое задание (задания) и в основном правильно ответил на вопросы, но допустил при этом не принципиальные ошибки.

*Оценка: 3**Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Контрольная работа считается выполненной на оценку «Удовлетворительно», если студент в ответах на вопросы допустил существенные ошибки, а также не выполнил практическое задание (задания), но наметил правильный путь его выполнения.

**КМ-3. Защита лабораторной работы №1: «Оптимизация параметров системы электродов при помощи численных методов математического программирования»**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в письменной форме в виде изложения развернутого ответа на вопросы задания. Время на подготовку ответа – 60 минут.

**Краткое содержание задания:**

Тема: «Оптимизация параметров системы электродов при помощи численных методов математического программирования».

**1. ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ**

1. Ознакомьтесь с методикой расчёта электрических полей тонких проводников круглого сечения.
2. Ознакомьтесь с методикой решения задач безусловной оптимизации методом Ньютона 2-го порядка.
3. Составьте математическую модель решаемой задачи, сформулированной ниже в разделе «Индивидуальные варианты заданий».
4. На базе построенной математической модели определите целевую функцию и ограничения задачи.

*Указание.* Вариант задания выбирается в разделе 3 в соответствии с номером бригады.

**2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

1. Разработайте вычислительный алгоритм отыскания экстремума целевой функции, записанной в результате выполнения предыдущего пункта задания, методом Ньютона 2-го порядка.

2. Реализуйте разработанный вычислительный алгоритм решения поставленной оптимизационной задачи на компьютере в виде программы в среде MATLAB.
3. Выполните с её помощью необходимые расчёты в соответствии с выбранными вариантами заданий.
4. Подготовьте отчёт о проделанной работе. Отчет должен содержать: титульный лист, задание, описание математической модели, принятой для решения задачи, вывод целевой функции, вычислительный алгоритм отыскания её экстремума целевой функции методами Ньютона 2-го порядка, график целевой функции, график, характеризующий сходимость метода Ньютона при решении конкретной задачи, программу её решения в среде MATLAB.

### Указания.

1. Предельное расхождение последовательных приближений к решению задачи безусловной оптимизации в условиях сходимости итераций принимается равным  $\varepsilon = 10^{-6}$ .
2. Каждый студент выполняет и представляет к защите индивидуальный отчёт, выполненный в соответствии с заданием. Отчёт представляется в печатной форме; выполнять отчёты лишь в электронной форме недопустимо.

## 3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

### 3.1. Вариант 1

Рассчитайте значение расстояния  $d$  между проводами расщеплённой фазы трёхпроводной воздушной линии электропередачи (рис. 1) с номинальным напряжением  $U_{ном}=330$  кВ, отвечающее требованию минимизации наибольшего значения напряжённости электрического поля на поверхности провода. Фазы расщеплены на 2 составляющие радиусом  $r_0=0,015$  м (рис. 2). Расстояние между ними равно  $a=7$  м, а высота их подвеса –  $h=8$  м. Расчёт выполняется в предположении, что максимальное напряжение приложено к центральной фазе. Землю можно считать идеально проводящей, а её потенциал – равным нулю.

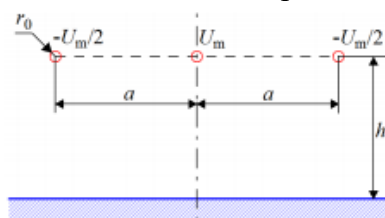


Figure 1 Рис. 1. К расчёту электрического поля трёхпроводной воздушной линии электропередачи

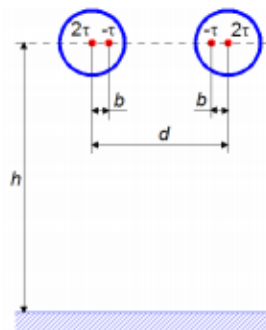


Figure 2 Рис. 2. К расчёту электрического поля одиночного фазного провода, расщеплённого на 2 составляющие

### 3.2. Вариант 2

Рассчитайте значение расстояния  $d$  между проводами расщеплённой фазы трёхпроводной воздушной линии электропередачи (рис. 1) с номинальным напряжением  $U_{ном}=500$  кВ, отвечающее требованию минимизации наибольшего значения

напряжённости электрического поля на поверхности провода. Фазы расщеплены на 3 составляющие радиусом  $r_0=0,02$  м (рис. 3.а). Расстояние между ними равно  $a=8$  м, а высота их подвеса –  $h=10$  м. Расчёт выполняется в предположении, что максимальное напряжение приложено к центральной фазе. Землю можно считать идеально проводящей, а ее потенциал – равным нулю.

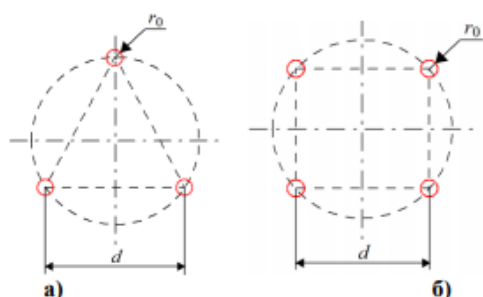


Figure 3 Рис. 3. К расчёту электрического поля одиночной фазы, расщеплённой на 3 (а) и на 4 (б) составляющие

### 3.3. Вариант 3

Вычислите значение расстояния  $d$  между проводами расщеплённой фазы биполярной двухпроводной воздушной линии электропередачи (рис. 4), удовлетворяющее требованию минимизации напряжённости электрического поля на поверхности провода. Фазы расщеплены на 4 составляющие радиусом  $r_0=0,02$  м (рис. 3.а). К проводам ВЛ приложено напряжение  $U=\pm 250$  кВ. Расстояние между фазами равно  $a=8$  м, а высота их подвеса –  $h=10$  м. Землю можно считать идеально проводящей, а ее потенциал – равным нулю.

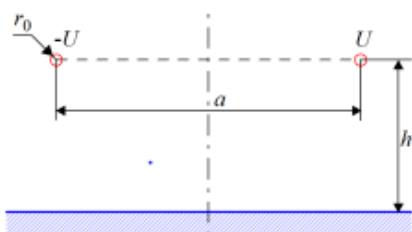


Figure 4 Рис. 4. К расчёту электрического поля биполярной воздушной линии электропередачи

### 3.4. Вариант 4

Определите значение радиуса  $r_0$  одиночного провода биполярной двухпроводной ошиновки (рис. 4), удовлетворяющее требованию максимизации начального напряжения возникновения коронного разряда на поверхности провода. Значение начальной напряжённости поля  $E_0$  вычисляется в В/см по формуле:

$$E_0 ( r_0 ) = 24,5 \cdot 10^3 \times \delta \left[ 1 + \frac{0,65}{(r_0 \times \delta)^{0,38}} \right],$$

где  $\delta$  – относительная плотность воздуха (в данном случае  $\delta=1$ ), а значение  $r_0$  измеряется в сантиметрах. Расстояние между проводами линии равно  $a=0,5$  м, а высота их подвеса –  $h=5$  м. Землю можно считать идеально проводящей, а её потенциал – равным нулю.

### 3.5. Вариант 5

Вычислите высоту  $h$  подвеса тросового электростатического экрана (рис. 5), которая удовлетворяла бы требованию минимизации напряжённости поля в расчетной точке М. Экран заземлен и состоит из 2 тросов радиусом  $r_0=0,01$  м, расстояние между которыми равно  $a=1$  м;  $h_0=1,8$  м. Напряженность внешнего электрического поля, однородного в отсутствие экрана, равна  $E_0=10$  кВ/м. Землю можно считать идеально проводящей. Ее потенциал (и, соответственно, потенциал экрана) полагается равным нулю.

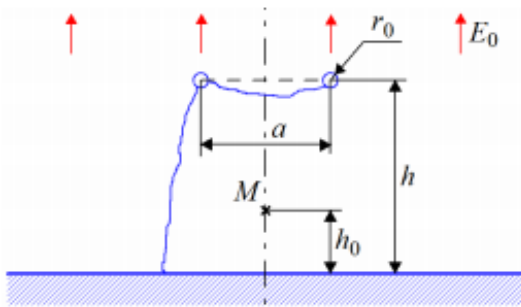


Рис. 5. К расчету поля под тросовым электростатическим экраном из 2 тросов

### 3.6. Вариант 6

Найдите расстояние  $a$  между тросами электростатического экрана (рис. 6), которое удовлетворяло бы требованию минимизации напряженности поля в расчетной точке  $M$ . Экран заземлен и состоит из 3 тросов радиусом  $r_0=0,008$  м, высота подвеса которых равна  $h=4$  м;  $h_0=1,8$  м. Напряженность внешнего электрического поля, однородного в отсутствие экрана, равна  $E_0 = 15$  кВ/м. Землю можно считать идеально проводящей. Ее потенциал (и, соответственно, потенциал экрана) полагается равным нулю.

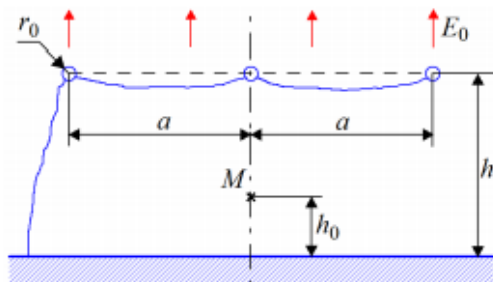


Figure 5 Рис. 6. К расчету поля под тросовым электростатическим экраном из 3 тросов

### Контрольные вопросы/задания:

Знать: численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов

1. Сформулируйте общую постановку задачи математического программирования. В чём состоит различие между задачами условной и безусловной оптимизации?
2. В чём заключаются особенности решения задачи математического программирования с ограничениями в виде равенств и в виде неравенств?
3. Перечислите основные этапы решения задач математического программирования.
4. Для чего предназначен метод Лагранжа? Поясните его основные положения.
5. Сформулируйте общий подход к численному решению задачи безусловной оптимизации.
6. Как выполняется численное решение задачи безусловной оптимизации методом Ньютона 2-го порядка точности?
7. В чём заключается условие сходимости итераций при использовании этого метода? Как её улучшить?
8. Как выполняется численное решение задачи безусловной оптимизации методом сопряжённых градиентов?

<p>Уметь: ставить задачи исследования, выбирать в соответствии с ними и использовать численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов</p>	<p>1. Найдите методом Ньютона 2-го порядка экстремум функции <math>F(x)=x*\exp(-2x)</math> на отрезке <math>0\leq x\leq 1</math>, задавшись начальным приближением <math>x=0,8</math> и <math>\epsilon=0,01</math>.</p> <p>2. Найдите методом Ньютона 2-го порядка экстремум функции <math>F(x)=\exp(x)/x</math> на отрезке <math>0,1\leq x\leq 1,0</math>, задавшись начальным приближением <math>x=0,8</math> и <math>\epsilon=0,01</math>.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено*

**КМ-4. Защита лабораторной работы №2: «Расчёт потенциала и напряжённости электрического поля заданной системы зарядов, распределённых в пространстве»**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 10

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в письменной форме в виде изложения развернутого ответа на вопросы задания. Время на подготовку ответа – 60 минут.

**Краткое содержание задания:**

Тема: «Расчёт потенциала и напряжённости электрического поля заданной системы зарядов, распределённых в пространстве».

**1. ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ**

1. Для заданных условий задачи получите выражения для потенциала и напряженности электрического поля в расчетной точке.

2. Получите точные выражения для потенциала и напряженности электрического поля в расчетной точке, вычислив аналитически определенные интегралы, фигурирующие в выражениях, полученных в пункте 1.

3. Разработайте алгоритм приближенного расчета потенциала и напряженности электрического поля в расчетной точке с использованием методов трапеций и Симпсона для вычисления значений определенных интегралов, фигурирующих в выражениях, полученных в пункте 1.



### Указания.

1. Вариант задания выбирается в соответствии с номером бригады. Индивидуальные варианты приведены в разделе 3.

### 2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Реализуйте разработанный в пункте 3 предварительной подготовки алгоритм решения поставленной задачи на компьютере.

2. В соответствии с полученными заданиями сделайте необходимые расчеты.

3. Сопоставьте результаты точного аналитического и приближенного численного расчета, сделайте выводы о точности численного расчета с использованием методов трапеций и Симпсона, о количестве последовательных шагов вычислений, необходимом в этих случаях.

4. Подготовьте отчет о проделанной работе. Отчет должен содержать: задание, вывод точных аналитических выражений для потенциала и напряженности электрического поля в расчетной точке, детальное описание алгоритма их приближенного численного расчета, результаты расчета и сопоставления результатов точного и приближенного расчета, а также выводы. Указание. Каждый студент выполняет и представляет к защите индивидуальный отчет, выполненный в соответствии с заданием. Отчет представляется в печатной форме; выполнять отчеты лишь в электронной форме недопустимо.

### 3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

#### 3.1. Вариант 1

Рассчитайте потенциал и напряженность электрического поля в точке А, удаленной от равномерно заряженного отрезка длиной  $L=1$  м с  $\tau=10^{-6}$  Кл/м на расстояние  $a=0,01$  м (см. рис. 1). Допустимая погрешность  $\delta$  приближенного вычисления интегралов, входящих в полученные выражения, равна  $\delta=1,0 \cdot 10^{-6}$ .

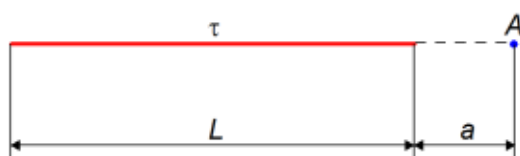


Рис. 1.

#### 3.2. Вариант 2

Рассчитайте потенциал и напряженность электрического поля в точке А, удаленной от равномерно заряженного отрезка длиной  $L=1,5$  м с  $\tau=1,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/м на расстояние  $a=0,1$  м (см. рис. 2). Допустимая погрешность  $\delta$  приближенного вычисления интегралов, входящих в полученные выражения, равна  $\delta=10^{-5}$ .

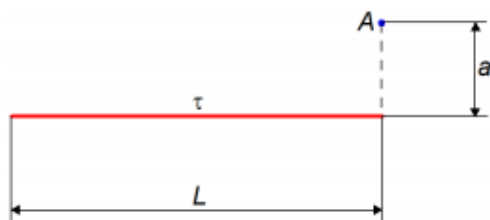


Рис. 2.

#### 3.3. Вариант 3

Рассчитайте потенциал и напряженность электрического поля в точке А, удаленной от равномерно заряженного отрезка длиной  $L=2$  м с  $\tau=5 \cdot 10^{-6}$  Кл/м на расстояние  $a=1$  м (см. рис. 3). Допустимая погрешность  $\delta$  приближенного вычисления интегралов, входящих в полученные выражения равна  $\delta=10^{-6}$ .

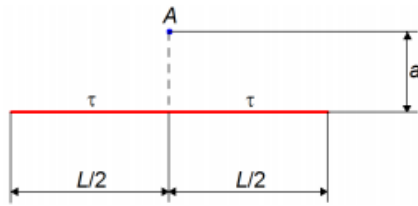


Рис. 3.

#### 3.4. Вариант 4

Рассчитайте потенциал и напряженность электрического поля в точке А, от двух равномерно заряженных отрезков, расположенных под прямым углом друг к другу (см. рис. 4). Длина каждого из отрезков  $L = 1$  м,  $\tau = 1,2 \cdot 10^{-6}$  Кл/м. Допустимая погрешность  $\delta$  приближенного вычисления интегралов, входящих в полученные выражения, составляет  $\delta = 2 \cdot 10^{-6}$ .

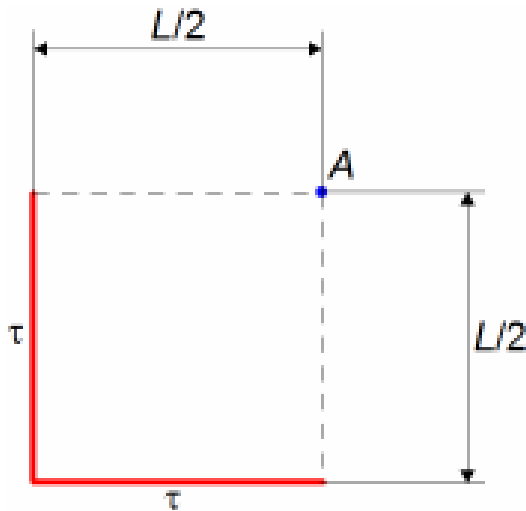


Рис. 4.

#### 3.5. Вариант 5

Рассчитайте потенциал и напряженность электрического поля в точке А от равномерно заряженного кольца на высоте  $a$  над его плоскостью (см. рис. 5). Поверхностная плотность заряда кольца составляет  $\tau = 1,3 \cdot 10^{-8}$  Кл/м,  $R_1 = 1$  м,  $R_2 = 2$  м,  $a = 0,1$  м. Допустимая погрешность  $\delta$  приближенного вычисления интегралов, входящих в полученные выражения, составляет  $\delta = 1,5 \cdot 10^{-6}$ .

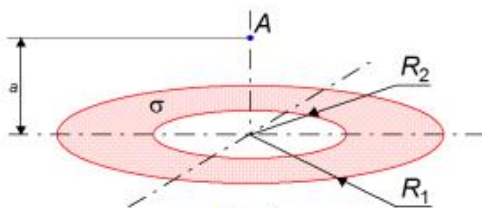


Рис. 5.

#### 3.6. Вариант 6

Рассчитайте потенциал и напряженность электрического поля в точке А, удаленной от заряженного отрезка длиной  $L = 2$  м с на расстояние  $a = 0,1$  м (см. рис. 6). Линейная плотность заряда по отрезку распределена по отрезку так, что в его середине она достигает максимального значения  $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$  Кл/см, а к концам по линейному закону снижается до нулевого значения. Допустимая погрешность  $\delta$  приближенного вычисления интегралов, входящих в полученные выражения, составляет  $\delta = 3 \cdot 10^{-6}$ .

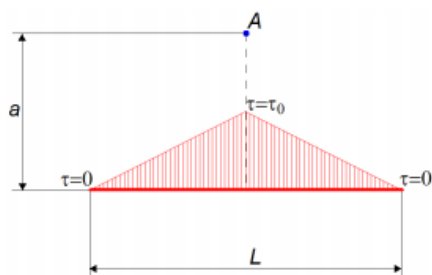


Рис. 6.

**Контрольные вопросы/задания:**

<p>Знать: численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. В чём состоит идея приближённого вычисления определённого интеграла функции одной переменной?</li> <li>2. Что такое квадратурные формулы для вычисления определённого интеграла функции одной переменной?</li> <li>3. Выведите формулу трапеций для приближённого вычисления определённого интеграла функции одной переменной. Какие допущения приняты при её выводе?</li> <li>4. Что такое формула Симпсона для приближённого вычисления определённого интеграла функции одной переменной? Какие допущения приняты при её выводе?</li> <li>5. Сопоставьте преимущества и недостатки формул трапеций и Симпсона.</li> <li>6. Как выполняется оценка погрешности приближённого вычисления определённого интеграла? Чем определяется шаг численного интегрирования?</li> <li>7. Сформулируйте подход к расчёту определённых интегралов функций с особенностями.</li> </ol>
<p>Уметь: ставить задачи исследования, выбирать в соответствии с ними и использовать численные методы решения задач математического программирования, вычисления определённых интегралов функций, решения линейных и нелинейных уравнений и их систем, применяемые при выполнении вычислительных экспериментов</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Найдите методом трапеций интеграл функции <math>F(x)=x \cdot \exp(-x)</math> на отрезке <math>0 \leq x \leq 1</math> при <math>\epsilon=0,01</math>.</li> <li>2. Найдите методом Симпсона интеграл функции <math>F(x)=\exp(x)/x</math> на отрезке <math>1 \leq x \leq 2</math> при <math>\epsilon=0,01</math>.</li> </ol>

**Описание шкалы оценивания:**

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 90

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто, выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено*

### **КМ-5. Защита лабораторной работы №3: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с сосредоточенными параметрами»**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 10**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в письменной форме в виде изложения развернутого ответа на вопросы задания. Время на подготовку ответа – 60 минут.

#### **Краткое содержание задания:**

Тема: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с сосредоточенными параметрами».

#### **1. ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ**

1. Для заданной схемы электрической цепи с сосредоточенными параметрами (рис. 1–6) составьте описывающую ее математическую модель, включающую систему дифференциальных уравнений и дополняющих их начальных условий. Рассчитайте постоянные времени контуров цепи  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

2. Опираясь на результаты, полученные в пункте 1, составьте алгоритмы приближенного расчета токов в контурах и падений напряжения на накопителях энергии в поставленной задаче методом Эйлера (как явным, так и неявным).

*Указание. Вариант задания выбирается в соответствии с номером бригады.*

#### **2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

1. Реализуйте разработанный в пункте 1 предварительной подготовки алгоритм решения поставленной задачи на компьютере.

2. Выполните необходимые расчеты в соответствии с заданными вариантами заданий, варьируя значение  $N$ . Предельная погрешность составляет  $\varepsilon=10^{-6}$ .

3. Сопоставьте результаты точного аналитического и приближенного численного расчета, сделайте выводы о точности и устойчивости явного и неявного метода Эйлера.

4. Подготовьте отчет о проделанной работе. Отчет должен содержать: задание, детальное описание вычислительного алгоритма приближенного численного решения задачи, текст программы, реализующей его в среде MATLAB, результаты расчета и сопоставления результатов точного и приближенного расчета, а также выводы. **Указание.**

*1. Считайте, что замыкание (размыкание) ключа происходит в момент времени  $t=0$ .*

*2. Интервал времени, в рамках которого необходимо получить численное решение поставленной задачи составляет  $0 \leq t \leq 5 + \tau$ , где  $\tau = \max(\tau_1, \tau_2)$ ,  $\tau_1, \tau_2$  – постоянные времени контуров цепи, рассчитанные в пункте 1 задания.*

*3. Результаты аналитического решения задачи можно заменить результатами её решения встроенными средствами MATLAB численным методом высокого порядка точности.*

4. Каждый студент выполняет и представляет к защите индивидуальный отчет, выполненный в соответствии с заданием. Отчет представляется в печатной форме; выполнять отчеты лишь в электронной форме недопустимо.

### 3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

1. Построить осциллограмму тока через индуктивность и напряжения на конденсаторе при подключении к источнику постоянного напряжения цепи, представленной на рис. 1.



Рис. 1.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 100 \text{ В,} \\ R_1 &= 1 \text{ Ом,} \\ R_2 &= 49 \text{ Ом,} \\ C &= 1 \text{ мкФ,} \\ L &= 10 \text{ мГн.} \end{aligned}$$

2. Построить осциллограмму тока через индуктивность и напряжения на конденсаторе при подключении к источнику постоянного напряжения цепи, представленной на рис. 2.

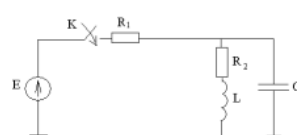


Рис. 2.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 15 \text{ В,} \\ R_1 &= 14 \text{ Ом,} \\ R_2 &= 1 \text{ Ом,} \\ C &= 1 \text{ мкФ,} \\ L &= 10 \text{ мГн.} \end{aligned}$$

3. Построить осциллограммы напряжений на конденсаторах при подключении к источнику постоянного напряжения цепи, представленной на рис. 3.

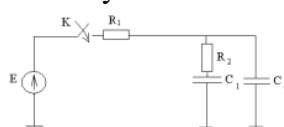


Рис. 3.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 3 \text{ В,} \\ R_1 &= 1 \text{ Ом,} \\ R_2 &= 100 \text{ Ом,} \\ C_1 &= 25 \text{ пкФ,} \\ C_2 &= 1000 \text{ пкФ.} \end{aligned}$$

4. Построить осциллограммы токов через индуктивности при подключении к источнику постоянного напряжения цепи, представленной на рис. 4.

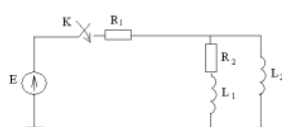


Рис. 4.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 4 \text{ В,} \\ R_1 &= 1 \text{ Ом,} \\ R_2 &= 3 \text{ Ом,} \\ L_1 &= 100 \text{ мГн,} \\ L_2 &= 40 \text{ мГн.} \end{aligned}$$

5. Построить осциллограмму тока через индуктивность и напряжения на конденсаторе при отключении от источника постоянного напряжения цепи, представленной на рис. 5.

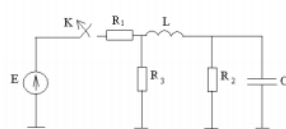


Рис. 5.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 100 \text{ В,} \\ R_1 &= 1 \text{ Ом,} \\ R_2 &= 4 \text{ Ом,} \\ R_3 &= 1 \text{ кОм,} \\ C &= 1000 \text{ пкФ,} \\ L &= 10 \text{ мГн.} \end{aligned}$$

6. Построить осциллограмму тока через индуктивность и напряжения на конденсаторе при отключении от источника постоянного напряжения цепи, представленной на рис. 6.

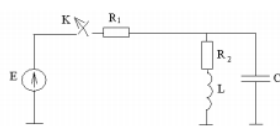


Рис. 6.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 15 \text{ В,} \\ R_1 &= 14 \text{ Ом,} \\ R_2 &= 1 \text{ Ом,} \\ C &= 1 \text{ мкФ,} \\ L &= 10 \text{ мГн.} \end{aligned}$$

#### Контрольные вопросы/задания:

Знать:	характерные	1. В чём заключается задача Коши для обыкновенного
--------	-------------	----------------------------------------------------

<p>математические модели электрических цепей УВН, методы дискретизации этих моделей и вычислительные алгоритмы расчёта токов и напряжений в них, как инструментов, позволяющих прогнозировать свойства и поведение УВН</p>	<p>дифференциального уравнения (ОДУ) первого порядка? В чём заключается метод сеток для её численного решения? Перечислите его основные объекты.</p> <p>2. Какие схемы реализации метода Эйлера Вы знаете? В чём их отличие? В чём заключаются их достоинства и недостатки?</p> <p>3. Дайте определения понятиям точности метода численного решения ОДУ, его аппроксимации и сходимости. Чем отличаются понятия точности и аппроксимации?</p> <p>4. Выведите основные соотношения метода Рунге-Кутты второго порядка точности. В чём заключается принципиальная разница между методами Эйлера и Рунге-Кутты?</p> <p>5. В чём состоит общая формулировка методов Рунге-Кутты?</p> <p>6. Что такое условно и абсолютно устойчивые методы численного решения ОДУ?</p> <p>7. Как и почему влияет на устойчивость и точность численного решения ОДУ величина шага разностной сетки?</p> <p>8. Запишите основные законы и соотношения, определяющие переходной процесс в электрической цепи с сосредоточенными параметрами.</p>
<p>Уметь: формулировать математические модели электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, применять методы их дискретизации для численного определения токов и напряжений в цепях с целью прогнозирования их свойств и поведения</p>	<p>1. Решите методом Адамса 2-го порядка обыкновенное дифференциальное уравнение <math>du/dx = u' \sin(x)</math> на отрезке <math>1 &lt; x &lt; 2</math> при <math>u(1) = 1,5</math>, создав на указанном отрезке равномерную конечно-разностную сетку из <math>N = 11</math> узлов.</p> <p>2. Решите методом Рунге-Кутты 2-го порядка обыкновенное дифференциальное уравнение <math>du/dx = u' \sin(x)</math> на отрезке <math>1 &lt; x &lt; 2</math> при <math>u(1) = 1,5</math>, создав на указанном отрезке равномерную конечно-разностную сетку из <math>N = 11</math> узлов.</p> <p>3. Составьте математическую модель в виде задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения 1-го порядка, которая описывает процесс разряда катушки с индуктивностью <math>L</math> через активное сопротивление <math>R</math>. Замыкание разделяющего их ключа происходит в момент <math>t = 0</math>. Ключ можно считать идеальным, а цепь – линейной, <math>iL _{t=0} = I_0</math>. Составьте дискретную модель для приближённого расчёта зависимости силы тока <math>i</math> в катушке от времени <math>t</math> на конечно-разностной сетке с постоянным шагом <math>t</math>, используя метод Рунге-Кутты 2-го порядка. Получите выражение для вычисления значений <math>i</math> в узлах сетки.</p> <p>4. Составьте математическую модель в виде задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения 1-го порядка, которая описывает процесс зарядки конденсатора с ёмкостью <math>C</math> от источника постоянного напряжения с ЭДС <math>E</math> и внутренним</p>

	сопротивлением $R$ . Замыкание разделяющего их ключа происходит в момент $t=0$ . Ключ можно считать идеальным, а цепь – линейной, $uC _{t=0}=0$ . Составьте дискретную модель для приближённого расчёта зависимости напряжения $u$ на конденсаторе от времени $t$ на конечно-разностной сетке с постоянным шагом $t$ , используя метод Рунге-Кутты 2-го порядка. Получите выражение для вычисления значений $u$ в узлах сетки.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено*

**КМ-6. Защита лабораторной работы №4: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с распределёнными параметрами»**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Лабораторная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 10**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в письменной форме в виде изложения развернутого ответа на вопросы задания. Время на подготовку ответа – 60 минут.

**Краткое содержание задания:**

Тема: «Расчёт переходного процесса в электрической цепи с сосредоточенными параметрами».

**1. ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ**

1. Для заданной схемы электрической цепи с распределёнными параметрами составьте описывающую её математическую модель, включающую волновое уравнение и дополняющие его начальные и граничные условия.

2. Опираясь на результаты, полученные в пункте 1, составьте алгоритмы приближенного расчёта напряжения в линии как функции координаты и времени. Для составления конечно-разностной (КР) аппроксимации волнового уравнения, начальных и граничных условий используйте КР схему «крест».

*Указание. Вариант задания выбирается в соответствии с номером бригады.*

**2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Цель лабораторной работы №4 заключается в овладении навыками составления математических моделей электрофизических процессов в ТЭВН (в данном случае —

распространения волны напряжения в идеальной длинной линии), их дискретизации с использованием изученных численных методов, опытом разработки вычислительных алгоритмов, реализующих полученные дискретные модели, и создания в среде MATLAB программ для ЭВМ, реализующих эти алгоритмы, обеспечивающих интерпретацию и представление результатов расчёта, способностью самостоятельно выполнять с помощью этих программ вычислительные эксперименты по исследованию электрофизических процессов. Переходный процесс (распространение волны напряжения  $u$ ) в идеальной длинной линии электропередачи длиной  $L$  описывается волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $x$  – продольная координата, начало отсчёта ( $x=0$ ) которой совпадает с началом линии,  $v$  – скорость распространения волны.

Уравнение (1) дополняется начальными (НУ) и граничными (ГУ) условиями. Начальные условия задаются для момента  $t=0$  и отражают допущения, что в этот момент линия заряжена до напряжения  $U_0$ , а скорость его изменения равна нулю:

$$u(x,0)=U_0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0}=0. \quad (2)$$

Форма граничных условий зависит от того, что происходит на левом ( $x=0$ ) и правом ( $x=L$ ) концах линии. Если, например, в начальный момент  $t=0$  к её левому концу подключается ЭДС  $E$ , то соответствующее ГУ имеет вид:

$$u(0,t)=E, \quad (3)$$

а если в этот момент левый конец заземляется, то оно приобретает вид:

$$u(0,t)=0. \quad (4)$$

Если линия короткозамкнутая, то есть её правый конец заземлён, то на нём выполняется ГУ:

$$u(L,t)=0, \quad (5)$$

а если она работает на холостом ходу (правый конец разомкнут), то протекающий через него ток  $i$  равен нулю:

$$i(L,t)=0. \quad (6)$$

Предметом исследования в работе №4 является распространение волны напряжения в длинной воздушной линии с распределёнными параметрами. Выполняя работу, следует считать, что всеми утечками можно пренебречь, и длинная линия является идеальной. Тогда процессы в ней описываются волновым уравнением (1).

В зависимости от варианта индивидуального задания моделируется процесс зарядки линии от подключаемого к ней источника ЭДС или нейтрализации первоначально заряженной линии. Если изначально она не заряжена, то в начальном условии (2)  $U_0=0$ , в противном случае значение  $U_0$  отлично от нуля и указано в задании. Если в нём предложено смоделировать зарядку линии от ЭДС  $E$ , то на левом конце выполняется граничное условие (3), а если задача состоит в изучении её нейтрализации, то ГУ (4). В зависимости от предложенного варианта на правом конце линии реализуются ГУ (5) или (6).

*Задание на математическое моделирование:*

- а) для указанного ниже варианта задания составьте математическую модель, включающую волновое уравнение (1), начальные условия (2) и граничные условия (3) или (4), (5) или (6);
- б) проведите дискретизацию записанной модели методом конечных разностей с постоянными шагами разностной сетки по времени  $t$  и координате  $x$ ;
- в) составьте вычислительный алгоритм решения полученных разностных уравнений;
- г) реализуйте его в виде программы для ЭВМ в среде MATLAB. Проведите её тестирование и обоснуйте выбор значения шагов разностной сетки;



д) рассчитайте при помощи разработанной программы разностный аналог функции  $u(x,t)$ .

*Отчёт по лабораторной работе №7 должен содержать следующие материалы:*

а) титульный лист с указанием названия лабораторной работы, фамилией и инициалами выполнившего её студента, номером индивидуального варианта задания, фамилией и инициалами преподавателя, принимающего её;

б) непрерывную математическую модель (пункт а) задания) с необходимыми пояснениями;

в) дискретную математическую модель (пункт б) задания) с необходимыми пояснениями;

г) вычислительный алгоритм решения полученных при выполнении пункта б) разностных уравнений и распечатку реализующей программы для ЭВМ в среде MATLAB;

д) обоснование выбора значений шагов разностной сетки;

е) представленные в графическом виде результаты расчёта разностного аналога функции  $u(x,t)$ , полученные при помощи этой программы.

### 3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

1. Вариант 1. В момент  $t=0$  к левому концу короткозамкнутой линии с распределёнными параметрами длиной  $L=100$  км подключается ЭДС  $E=100$  кВ (см. рис.

1). Решите для неё волновое уравнение (1) относительно функции  $u(x,t)$  при  $0 \leq x \leq L$ ,  $0 \leq t \leq T$ , где  $T=1,5L/v$ .

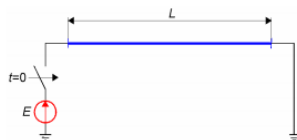


Рис. 1. К расчёту переходного процесса в длинной линии, вариант 1

2. Вариант 2. В момент  $t=0$  к левому концу незаряженной линии с распределёнными параметрами длиной  $L=150$  км подключается ЭДС  $E=100$  кВ (линия на холостом ходу, см. рис. 2). Решите для неё волновое уравнение (1) относительно функции  $u(x,t)$  при  $0 \leq x \leq L$ ,  $0 \leq t \leq T$ , где  $T=1,5L/v$ .

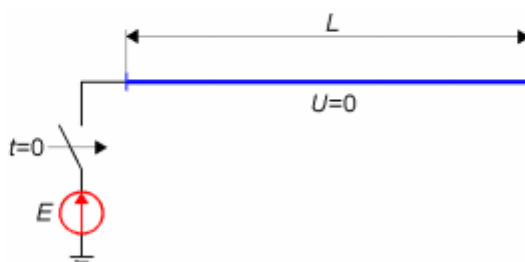


Рис. 2. К расчёту переходного процесса в длинной линии, вариант 2

3. Вариант 3. В момент  $t=0$  к левому концу линии с распределёнными параметрами длиной  $L=200$  км подключается ЭДС  $E=200$  кВ (линия на холостом ходу, изначально заряжена до напряжения  $U_0=-E$  см. рис. 3). Решите для неё волновое уравнение (1) относительно функции  $u(x,t)$  при  $0 \leq x \leq L$ ,  $0 \leq t \leq T$ , где  $T=2L/v$ .

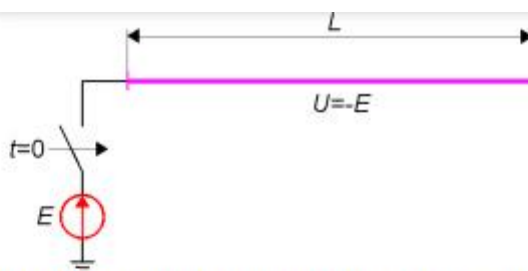


Рис. 3. К расчёту переходного процесса в длинной линии, вариант 3

4. Вариант 4. В момент  $t=0$  закорачивается левый конец линии с распределёнными параметрами длиной  $L=250$  км (линия на холостом ходу, изначально заряжена до напряжения  $U_0=200$  кВ, см. рис. 4). Решите для неё волновое уравнение (1) относительно функции  $u(x,t)$  при  $0 \leq x \leq L$ ,  $0 \leq t \leq T$ , где  $T=2L/v$ .

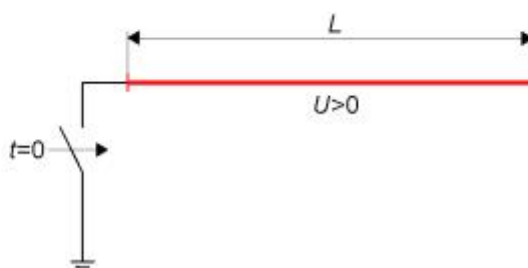


Рис. 4. К расчёту переходного процесса в длинной линии, вариант 4

### Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: характерные математические модели электрических цепей УВН, методы дискретизации этих моделей и вычислительные алгоритмы расчёта токов и напряжений в них, как инструментов, позволяющих прогнозировать свойства и поведение УВН</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сформулируйте математическую модель переходного процесса в однородной линейной незаряженной длинной линии без потерь при её подключении к источнику ЭДС для случаев короткозамкнутой линии и линии на холостом ходу.</li> <li>2. Как изменится эта модель, если источник подключается к линии через активное или реактивное сопротивление?</li> <li>3. Как изменится эта модель, если к линия имеет нагрузки активную, ёмкостную или индуктивную нагрузку?</li> <li>4. Какие конечно-разностные аппроксимации волнового уравнения Вы знаете? Какую из них целесообразно применить в данном случае?</li> <li>5. В чём в данном случае состоит особенность конечно-разностной аппроксимации начальных условий для волнового уравнения?</li> <li>6. Какие основные объекты метода конечных</li> </ol>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>разностей были использованы при записи аппроксимации волнового уравнения?</p> <p>7. Чем определяется в данном случае выбор пространственного и временного шагов конечно-разностной сетки?</p> <p>8. Сформулируйте вычислительный алгоритм численного решения волнового уравнения для случая выбранной схемы его аппроксимации.</p>
<p>Уметь: формулировать математические модели электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, применять методы их дискретизации для численного определения токов и напряжений в цепях с целью прогнозирования их свойств и поведения</p>	<p>1. Составьте математическую модель переходного процесса в длинной линейной однородной воздушной линии электропередачи с распределёнными параметрами, возникающего при подключении к её левому концу источника постоянного напряжения с ЭДС <math>E</math>. Линия имеет длину <math>l</math>, её правый конец разомкнут, продольными и поперечными потерями в ней можно пренебречь. Погонная ёмкость линии составляет <math>C_0</math>, а индуктивность - <math>L_0</math>. Составьте конечно-разностную (КР) модель процесса в линии, используя для этого явную КР схему «крест».</p> <p>2. Составьте математическую модель в виде задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения 1-го порядка, которая описывает процесс разрядки конденсатора с ёмкостью <math>C</math> через активное сопротивление <math>R</math>. Замыкание разделяющего их ключа происходит в момент <math>t=0</math>. Ключ можно считать идеальным, а цепь – линейной, <math>u_C _{t=0}=U_0</math>. Составьте дискретную модель для приближённого расчёта зависимости напряжения <math>u</math> на конденсаторе от времени <math>t</math> на конечно-разностной сетке с постоянным шагом <math>t</math>, используя неявный метод Эйлера 1-го порядка. Получите выражение для вычисления значений <math>u</math> в узлах сетки.</p> <p>3. Составьте математическую модель переходного процесса в длинной линейной однородной воздушной линии электропередачи с распределёнными параметрами, возникающего при подключении к её левому концу источника постоянного напряжения с ЭДС <math>E</math>. Линия имеет длину <math>l</math>, её правый конец разомкнут, продольными потерями в ней можно пренебречь. Погонная ёмкость линии составляет <math>C_0</math>, а индуктивность - <math>L_0</math>, поперечная проводимость - <math>G_0</math>. Составьте конечно-разностную (КР) модель процесса в линии, используя для этого явную КР схему «крест».</p>

**Описание шкалы оценивания:**

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 90

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

### **КМ-7. Защита расчётного задания: «Расчёт и анализ электрических полей в изоляционных конструкциях установок высокого напряжения с газовой изоляцией»**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Расчетно-графическая работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в письменной форме в виде изложения развернутого ответа на вопросы задания. Время на подготовку ответа – 60 минут.

#### **Краткое содержание задания:**

Тема: «Расчёт и анализ электрических полей в изоляционных конструкциях установок высокого напряжения с газовой изоляцией».

*Выполнить:*

На основе расчёта напряжённости электрического поля в соответствии с выданным вариантом индивидуального задания и анализа полученных результатов, следует найти ответ на поставленный в задании вопрос. Номер варианта задания определяется номером студента в списке группы.

*Исходные данные для задания (индивидуальные варианты заданий):*

Вариант 1.

Тросовый электростатический экран для ограничения воздействия внешнего электрического поля состоит из 5 параллельных друг другу и поверхности земли круглых заземлённых проводников радиусом  $r_2 = 0,75$  см, подвешенных на высоте  $h = 4$  м над землёй на равном расстоянии  $a$  друг от друга. Каково оптимальное значение  $a$ , минимизирующее напряжённость поля в расчётной точке  $M$  на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй под средним тросом, в предположении, что в отсутствие экрана внешнее поле является однородным, его вектор напряжённости перпендикулярен поверхности земли и равен по модулю  $E_0 = 30$  кВ/м?

Вариант 2.

Ошиновка открытого распределительного устройства (ОРУ) подстанции 500 кВ имеет следующую конфигурацию (рис. 1). Расщеплённые фазные провода, состоящие из  $n = 3$  составляющих, находятся на высоте  $h_1 = 10$  м, расстояние между ними составляет  $a_1 = 10$  м. Радиус расщепления  $r_p = 23$  см, радиус составляющих их проводников  $r_1 = 1,5$  см. Для ограничения напряжённости электрического поля под центральным фазным проводом на высоте  $h_2 = 3,5$  м помещён тросовый электростатический экран, состоящий из двух проводников. Они расположены симметрично относительно оси  $y$  на расстоянии  $2 \times a_2$  друг от друга и имеют радиус  $r_2 = 0,5$  см. Чему равно оптимальное значение  $a_2$ , соответствующее наименьшему значению напряжённости поля на высоте  $h_0 = 1,8$  м над поверхностью земли на оси  $y$ ? Чему было бы равно значение напряжённости в этой точке без экрана?

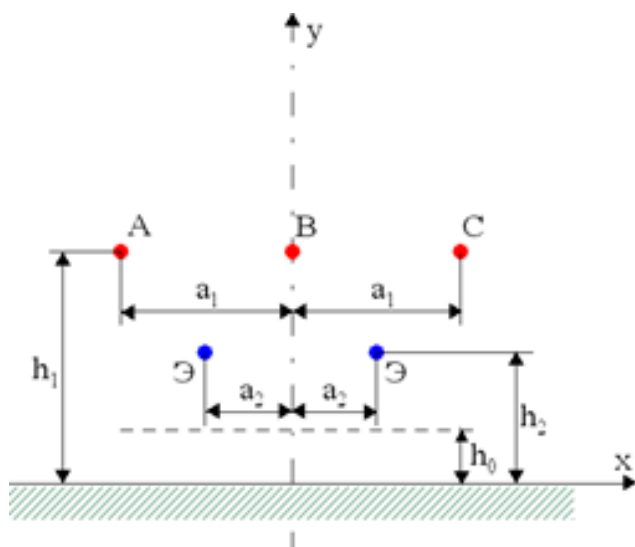


Рис. 1. Ограничение электрического поля ошиновки ОРУ 500 кВ под центральным проводом

### Вариант 3.

Тросовый электростатический экран для ограничения воздействия внешнего электрического поля состоит из 5 параллельных друг другу и поверхности земли круглых заземлённых проводников радиусом  $r_2 = 0,5$  см, подвешенных на высоте  $h$  над землёй на равном расстоянии  $a = 1$  м друг от друга. Каково оптимальное значение  $h$ , минимизирующее напряжённость поля в расчётной точке  $M$  на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй под средним тросом, в предположении, что в отсутствие экрана внешнее поле является однородным, его вектор напряжённости перпендикулярен поверхности земли и равен по модулю  $E_0 = 25$  кВ/м?

### Вариант 4.

Электрическое поле ошиновки ОРУ с номинальным напряжением  $U_{ном}=500$  кВ и горизонтальным расположением фазных проводов ограничивается тросовым электростатическим экраном Э, состоящим из двух пар заземлённых проводников (рис. 2). Фазные провода состоят из  $n = 3$  составляющих радиусом  $r_1 = 2$  см и имеют радиус расщепления  $r_p = 23$  см. Они расположены на высоте  $h_1 = 12$  м на расстоянии  $a_1 = 10$  м друг от друга. Каждая пара проводников экрана Э состоит из тросов радиусом  $r_2 = 1$  см, разделённых расстоянием  $d = 0,5$  м. Тросы находятся на одинаковой высоте  $h_2 = 4$  м. Чему равно оптимальное расстояние  $a_2$  между осью ошиновки и экранами Э, минимизирующее напряжённость поля под крайними проводами на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй?

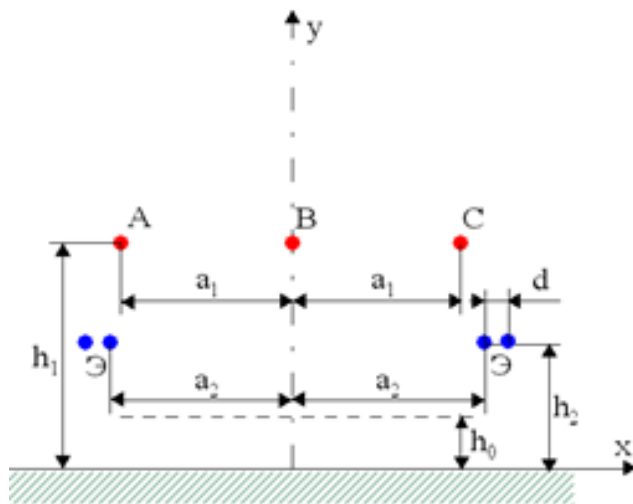


Рис. 2. Ограничение электрического поля ошиновки ОРУ 500 кВ под её крайними проводами

Вариант 5.

Какова допустимая высота  $h_1$  подвеса фазных проводов воздушной линии электропередачи (ВЛ) с номинальным напряжением  $U_{ном} = 500$  кВ и горизонтальным расположением расщеплённых фазных проводов (рис. 3)? Следует исходить из того, что действующее значение напряжённости электрического поля под проводами на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй не должно превышать 5 кВ/см. Фазные провода расположены на расстоянии  $a_1 = 10$  м друг от друга, состоят из  $n = 3$  составляющих радиусом  $r_0 = 1,5$  см и имеют радиус расщепления  $r_p = 23$  см.

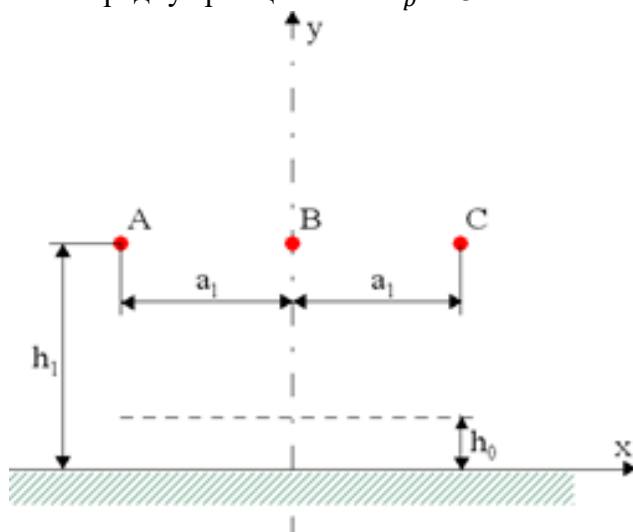


Рис. 3. К расчёту электрического поля под фазными проводами ВЛ с их горизонтальным размещением

Вариант 6.

Какова допустимая высота  $h_1$  подвеса нижнего фазного провода ВЛ с номинальным напряжением  $U_{ном} = 500$  кВ и вертикальным расположением расщеплённых фазных проводов (рис. 4)? Нужно исходить из того, что действующее значение напряжённости электрического поля под проводами на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй не должно превышать 5 кВ/см. Фазные провода расположены на расстоянии  $a_1 = 10$  м друг от друга (то есть  $h_2 = h_1 + a_1$ ,  $h_3 = h_1 + 2 a_1$ ), состоят из  $n = 3$  составляющих радиусом  $r_0 = 1,5$  см и имеют радиус расщепления  $r_p = 23$  см.

Вариант 7.

Чему равна допустимая высота  $h_1$  подвеса фазных проводов ВЛ с номинальным напряжением  $U_{ном} = 750$  кВ и горизонтальным расположением расщеплённых фазных проводов (рис. 3)? Исходите из того, что действующее значение напряжённости электрического поля под проводами на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй не должно превышать 5 кВ/см. Фазные провода расположены на расстоянии  $a_1 = 12$  м друг от друга, состоят из  $n = 4$  составляющих радиусом  $r_0 = 2$  см и имеют радиус расщепления  $r_p = 28,3$  см.

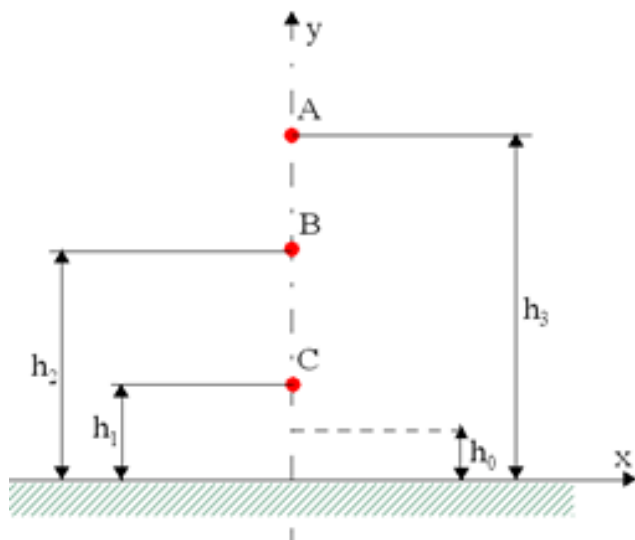


Рис. 4. К расчёту электрического поля под проводами ВЛ с их вертикальным размещением

Вариант 8.

Какова допустимая высота  $h_1$  расположения нижнего фазного провода ВЛ с номинальным напряжением  $U_{ном} = 750$  кВ и вертикальным расположением расщеплённых фазных проводов (рис. 4)? Следует исходить из того, что действующее значение напряжённости электрического поля под проводами на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй не должно превышать 5 кВ/см. Фазные провода расположены на расстоянии  $a_1 = 12$  м друг от друга (то есть  $h_2 = h_1 + a_1$ ,  $h_3 = h_1 + 2a_1$ ), состоят из  $n = 4$  составляющих радиусом  $r_0 = 2$  см и имеют радиус расщепления  $r_p = 28,3$  см.

Вариант 9.

Каково оптимальное значение радиуса расщепления фазных проводов ВЛ с номинальным напряжением  $U_{ном} = 500$  кВ и горизонтальным расположением фаз (рис. 3)? Исходите из критерия минимизации наибольшего значения напряжённости поля на поверхности проводников центрального фазного провода. Фазные провода расположены на высоте  $h_1 = 8$  м над землёй на расстоянии  $a_1 = 10$  м друг от друга, состоят из  $n = 3$  проводников радиусом  $r_0 = 1,5$  см при радиусе расщепления  $r_p = 23$  см.

Вариант 10.

Чему равно оптимальное значение радиуса расщепления фазных проводов ВЛ с номинальным напряжением  $U_{ном} = 500$  кВ и вертикальным расположением фаз (рис. 4)? Нужно исходить из критерия минимизации наибольшего значения напряжённости поля на поверхности проводников нижнего фазного провода. Фазные провода расположены на высотах  $h_1$ ,  $h_2 = h_1 + a_1$  и  $h_3 = h_1 + 2a_1$  над землёй на расстоянии  $a_1 = 10$  м друг от друга, состоят из  $n = 3$  проводников радиусом  $r_0 = 1,5$  см и имеют радиус расщепления  $r_p = 23$  см. Высота нижнего провода составляет  $h_1 = 8$  м.

Вариант 11.

Какова допустимая высота  $h_1$  расположения нижних фазных проводов одноцепной ВЛ с номинальным напряжением  $U_{ном}=220$  кВ (рис. 5), если исходить из того, что действующее значение напряжённости электрического поля под проводами на высоте  $h_0 = 1,8$  м над землёй не должно превышать  $5$  кВ/см? Нижние фазные провода находятся на высоте  $h_1 = 7$  м, а верхний — на высоте  $h_2 = 13$  м;  $a_1 = 3$  м,  $a_2 = 1,5$  м. Радиус проводов  $r_0 = 1,0$  см.

Вариант 12.

Для защиты персонала от биологического воздействия электрического поля используется электростатический тросовый экран, проводники которого расположены на двух уровнях (рис. 6) и заземлены. Проводники верхнего уровня расположены на высоте  $h_1 = 4$  м, расстояние между ними  $2 \times a_1 = 5$  м, радиус  $r_1 = 0,5$  см. Проводники нижнего уровня расположены на высоте  $h_2 = 3$  м, расстояние между ними  $2 \times a_2$ , радиус  $r_2 = r$ . Каким должно быть значение  $a_2$ , чтобы минимизировать напряженность поля на оси симметрии на высоте  $h_0 = 1,8$  м? В отсутствие экрана внешнее поле является однородным, его вектор напряжённости перпендикулярен поверхности земли и равен по модулю  $E_0 = 25$  кВ/м.

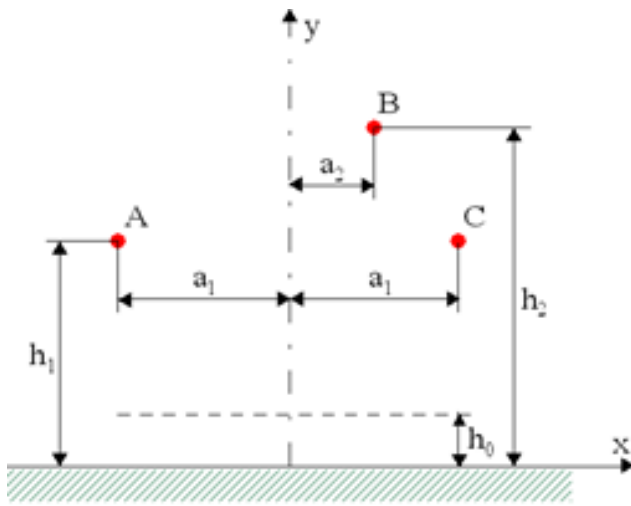


Рис. 5. К расчёту электрического поля под фазными проводами ВЛ 220 кВ

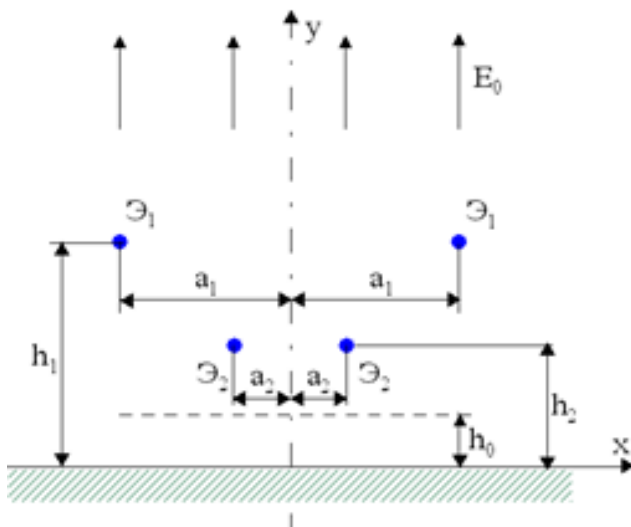


Рис. 6. К расчёту электрического поля под тросовым электростатическим экраном

Ш. *Технология выполнения задания:*



Для выполнения задания необходимо соблюдать следующую последовательность действий:

- а) В соответствии с полученным индивидуальным вариантом задания составить расчётную модель задачи и реализовать её в виде программы MATLAB.
- б) С помощью указанной программы рассчитать зависимость значения целевой функции (искомого значения напряжённости электрического поля) от определённой в задании переменной. Представить эту зависимость в табличном и графическом виде.
- в) Проанализировать полученные данные и получить ответ на сформулированный в задании зачёт.

г) Подготовить отчёт, включающий в себя следующее:

- титульный лист;
- индивидуальный вариант задания;
- расчётную модель с необходимыми пояснениями;
- оценку достоверности результатов расчёта с необходимыми пояснениями;
- результаты расчёта значений целевой функции (искомого значения напряжённости электрического поля) в зависимости от величин указанной в задании переменной в табличном виде и в виде графика;
- ответ на поставленный в задании вопрос;
- список использованных источников.

Объём отчёта должен составлять не менее 7 страниц, включая титульный лист и список использованных источников.

#### **Контрольные вопросы/задания:**

Знать: математические модели и применяемые для их дискретизации интегральные численные методы, позволяющие вычислять параметры электрических полей электроэнергетических и электрофизических УВН	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Сформулируйте математическую модель полеобразующей системы, принятую Вами для выполнения индивидуального варианта задания.</li><li>2. Какие допущения были приняты Вами при построении этой модели? Обоснуйте их применимость при решении Вашего варианта задания.</li><li>3. Какой численный метод расчёта электрического поля был применён Вами для решения выполнения индивидуального варианта задания? Обоснуйте оптимальность сделанного Вами выбора.</li><li>4. Сформулируйте основные положения выбранного Вами метода.</li><li>5. Каков механизм воздействия электрических и магнитных полей промышленной частоты на живые организмы?</li><li>6. Перечислите основные нормативные документы, ограничивающие воздействие электрических и магнитных полей промышленной частоты на персонал и население действуют в настоящее время в России?</li><li>7. Что в данном случае означают термины «персонал» и «население»?</li><li>8. Какие параметры электрического и магнитного поля нормируются этими документами?</li><li>9. Чем отличается подход к ограничению воздействия полей промышленной частоты на персонал и население?</li><li>10. Назовите предельные уровни напряжённости</li></ol>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>электрического и магнитного поля промышленной частоты для персонала, обслуживающего источники поля. О каких значениях напряжённости в данном случае идёт речь? Где и каким образом они должны определяться?</p> <p>11. Назовите предельные уровни напряжённости электрического и магнитного поля промышленной частоты для населения.</p> <p>12. Какие подходы и способы ограничения воздействия электрического и магнитного поля промышленной частоты на организм человека Вам известны?</p> <p>13. Что представляют собой экраны для ограничения электрического поля промышленной частоты?</p> <p>14. Какие виды экранов Вам известны? Поясните принцип их действия.</p> <p>Какие разновидности средств защиты человека от воздействия электрического поля промышленной частоты вам известны? В каких случаях они применяются?</p>
<p>Уметь: рассчитывать, анализировать и регулировать электрические поля электроэнергетических и электрофизических УВН с целью ограничения воздействия их полей на население и персонал</p>	<p>1. Рассчитайте напряжённость электрического поля под одиночным расщеплённым фазным проводом (РФП) в расчётной точке, находящейся на высоте 1,8 м над землёй. РФП состоит из 2 проводников, параллельных друг другу и поверхности земли. Они подвешены на высоте 8 м, имеют радиус 0,015 м, и разделены расстоянием 0,4 м. К проводу приложено напряжение 280 кВ. Земля идеально гладкая, проводящая и бесконечная.</p> <p>2. Рассчитайте напряжённость электрического поля посередине между 2 заземлёнными тросами электростатического экрана, подвешенными на одинаковой высоте 4 м над землёй. Они параллельны друг другу и земле, разделены расстоянием 0,5 м и имеют радиус 0,01 м. Внешнее однородное электрическое поле имеет напряжённость 20 кВ/м, его вектор перпендикулярен земле. Расчётная точка находится на высоте 1,8 м над её поверхностью. Земля идеально гладкая, проводящая и бесконечная.</p>
<p>Уметь: формулировать математические модели, применять интегральные численные методы для их дискретизации и реализовывать их в виде программ для ЭВМ для расчёта параметров электрических полей электроэнергетических и электрофизических УВН с целью прогнозирования их свойств и поведения</p>	<p>1. Рассчитайте наибольшее значение напряжённости электрического поля на поверхности проводов биполярной ВЛ постоянного тока с напряжением 200 кВ, чьи провода подвешены на высоте 8 м над землёй. Её проводники имеют радиус 0,02 м и разделены расстоянием 8 м. Они параллельны друг другу и поверхности земли. Подстилающий грунт идеально ровный и проводящий. Его поверхность можно считать бесконечной, а провод – бесконечным и идеально гладким.</p> <p>2. Составьте математические непрерывную и дискретную модели, описывающую распределение напряжённости электрического поля в коаксиальном</p>

	<p>кабеле с однородной изоляцией.  3. Составьте математические непрерывную и дискретную модели, описывающую распределение напряжённости электрического поля в коаксиальном кабеле с двухслойной изоляцией.</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено*

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 2 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Экзамен

### Пример билета

*Билет №1.*

1. Итерационные методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Итерационные методы Якоби и Зейделя. Условия сходимости итерационных методов.
2. Понятие о приближённом вычислении определённого интеграла. Формулы трапеций и Симпсона.

Задача.

3. Решите методом Адамса 2-го порядка обыкновенное дифференциальное уравнение  $du/dx = u \times \sin(x)$  на отрезке  $1 \leq x \leq 2$  при  $u(1)=1,5$ , создав на указанном отрезке равномерную конечно-разностную сетку из  $N = 11$  узлов.

### Процедура проведения

Проводится в устной форме по билетам в виде подготовки и изложения развернутого ответа. Время на подготовку ответа – 60 минут.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-3пк-1 Демонстрирует знания и умения разрабатывать и использовать методы численного моделирования в научных исследованиях в области высоковольтных электротехнологий

### Вопросы, задания

*1.Билет №2.*

1. Постановка задачи математического программирования. Задачи условной оптимизации и их решение с применением метода Лагранжа.
2. Постановка задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений. Явный и неявный методы Эйлера.

Задача.

3. Найдите методом Симпсона интеграл функции  $F(x)=exp(x)/x$  на отрезке  $1 \leq x \leq 2$  при  $\epsilon = 0,01$ .
2. Обусловленность систем линейных алгебраических уравнений и устойчивость их решения. Число обусловленности. Влияние погрешностей округления при решении методом Гаусса. Понятие о методах регуляризации.
3. Итерационные методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
4. Итерационные методы Якоби и Зейделя. Условия сходимости итерационных методов.
5. Итерационные методы решения нелинейных уравнений. Метод простых итераций и условия его сходимости. Метод Ньютона и его сходимость.
6. Постановка задачи математического программирования. Задачи безусловной и условной оптимизации.
7. Задачи условной оптимизации и их решение с применением метода Лагранжа.
8. Особенности отыскания решений в задачах математического программирования с ограничениями в виде равенств и неравенств.

9. Принципы численного решения задач безусловной оптимизации. Метод Ньютона 2-го порядка точности.
  10. Принципы численного решения задач безусловной оптимизации. Методы наискорейшего спуска и сопряжённых градиентов.
  11. Понятие о приближённом вычислении определённого интеграла. Формулы трапеций и Симпсона.
  12. Оценка погрешности, автоматический выбор шага интегрирования в процессе приближённого вычисления определённого интеграла.
  13. Способы конечно-разностной аппроксимации производной, порядок точности разностной аппроксимации.
  14. Постановка задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений. Явный и неявный методы Эйлера.
  15. Методы Рунге-Кутты, их общая формулировка, семейство методов второго порядка точности.
  16. Многошаговые разностные методы, их формулировка. Погрешность аппроксимации, устойчивость и сходимость разностных методов.
  17. Метод Гаусса численного решения систем линейных алгебраических уравнений и условия его применимости. Обращение матрицы.
  18. Решение систем линейных алгебраических уравнений как базовая процедура алгоритмов решения задач вычислительной физики. Прямые методы решения.
  19. Погрешности округления вещественных чисел в компьютере, накопление таких погрешностей и его влияние на свойства вычислительных методов.
  20. Понятие и схема вычислительного эксперимента.
- Понятия численного метода и вычислительного алгоритма. Требования к вычислительным методам.

#### 21. Билет №3.

1. Особенности отыскания решений в задачах математического программирования с ограничениями в виде равенств и неравенств.
2. Методы Рунге-Кутты, их общая формулировка, семейство методов второго порядка точности.

#### Задача.

3. Решите итерационным методом Зейделя систему линейных алгебраических уравнений

$$5x_1 + 4x_2 + 2x_3 = 20,$$

$$4x_1 + 10x_2 + 6x_3 = 15,$$

$$2x_1 + 6x_2 + 5x_3 = 10.$$

задавшись начальным приближением  $x_1=4$ ,  $x_2=-1$ ,  $x_3=2$  и  $\varepsilon=0,01$ .

#### 22. Билет №4.

1. Принципы численного решения задач безусловной математической оптимизации. Метод Ньютона 2-го порядка точности.
2. Явные и неявные многошаговые методы Адамса и их свойства. Методы Адамса второго порядка точности.

#### Задача.

3. Рассчитайте наименьшее значение напряжённости электрического поля на высоте  $h_0 = 1.8$  м над землёй под проводниками тросового электростатического экрана, которые находятся на высоте  $h = 4$  м на расстоянии  $a = 1$  м друг от друга. Экран состоит из трёх заземлённых тросов радиусом  $r = 0,0075$  м, параллельных друг другу и поверхности земли. Он экранирует внешнее электрическое поле, которое в отсутствие экрана является однородным и имеет напряжённость  $E_0 = 50$  кВ/м. Подстилающий грунт идеально ровный и проводящий.

23. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент, их роль в различных областях ТЭВН и ВВЭТ.
24. Дифференциальные уравнения в частных производных и формулируемые с их использованием типичные математические модели электрофизических процессов в ТЭВН и ВВЭТ.
25. Понятие жёсткой системы дифференциальных уравнений. Чисто неявные разностные методы.
26. Волновое уравнение, разностные схемы его аппроксимации, условия их устойчивости.  
Разностное решение волнового уравнения для переходного процесса в длинной линии с различными видами нагрузок (активными и реактивными).
27. Уравнение движения и диффузии ключевого компонента в окружающей среде, разностные схемы его аппроксимации, условия их устойчивости.
28. Явные и неявные многошаговые методы Адамса и их свойства. Методы Адамса второго порядка точности.
29. Уравнение Пуассона, связь между скалярным потенциалом и напряжённостью электрического поля. Разностные схемы аппроксимации одномерного и двумерного уравнения Пуассона и уравнения связи между потенциалом и напряжённостью в однородных средах.
30. Итерационные методы решения пятиточечных разностных уравнений: явные и неявные схемы итераций. Неявные методы верхней релаксации и переменных направлений. Явный метод с чебышевским набором шагов.
31. Поясните основные принципы, лежащие в основе методов вторичных источников поля (интегральных методов) расчёта электрических полей.
32. Сформулируйте и поясните основные положения метода эквивалентных зарядов для расчёта электрических полей. В чём заключаются его достоинства и недостатки по сравнению с другими методами?
33. Сформулируйте и поясните основные положения метода интегральных уравнений для расчёта электрических полей. В чём заключаются его достоинства и недостатки по сравнению с другими методами?
34. Назовите предельные уровни напряжённости электрического поля промышленной частоты для персонала, обслуживающего источники поля, и для населения. О каких значениях напряжённости в данном случае идёт речь? Где и каким образом они должны определяться?
35. Какие подходы и способы ограничения воздействия электрического и магнитного поля промышленной частоты на организм человека Вам известны?
36. Какие разновидности средств защиты человека от воздействия электрического поля промышленной частоты вам известны? В каких случаях они применяются?
37. Решение трёхточечных разностных уравнений методом прогонки.
38. Численное интегрирование жёстких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Условно и абсолютно устойчивые разностные методы.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Какой из перечисленных ниже методов Вы бы предложили использовать для итерационного решения системы линейных алгебраических уравнений?

Ответы:

- 1 - метод Гаусса;
- 2 - метод Якоби;
- 3 - метод LU-разложения (декомпозиции);
- 4 - метод Зейделя.

Верный ответ: 4

2. К какому классу задач относится задача  $F(x) = x * \exp(-x) \rightarrow \max$ ?

Ответы:

- 1 - условной математической оптимизации;
- 2 - приближённое вычисление определённого интеграла;
- 3 - безусловной математической оптимизации;
- 4 - численного решения дифференциального уравнения.

Верный ответ: 3

3. Какой численный метод решения задачи  $F(x)=[\ln(x-1)]/(x-1) \rightarrow \max$  из ниже перечисленных вы бы предложили использовать?

Ответы:

- 1 - метод Ньютона 2-го порядка;
- 2 - метод Ньютона 1-го порядка;
- 3 - метод сопряжённых градиентов;
- 4 - метод покоординатного спуска.

Верный ответ: 1

4. Какой из названных ниже видов погрешностей не относится к числу погрешностей, возникающих при проведении вычислительного эксперимента;

Ответы:

- 1 - погрешности округления;
- 2 - погрешности измерения физических величин;
- 3 - методическая погрешность;
- 4 - погрешность дискретизации.

Верный ответ: 2

5. Какое семейство численных методов Вы бы предложили использовать для приближённого решения задачи Коши для одного обыкновенного дифференциального уравнения  $du/dt=f(u,t)$ ,  $0 < t < T$ ,  $u(0)=U_0$ ?

Ответы:

- 1 - неявные методы Адамса;
- 2 - явные методы Адамса;
- 3 - методы Рунге-Кутты;
- 4 - методы Эйлера 1-го порядка.

Верный ответ: 1

6. Какой численный метод Вы предложили бы использовать для приближённого вычисления интеграла функции одной переменной?

Ответы:

- 1 - метод прямоугольников;
- 2 - метод трапеций;
- 3 - метод Симпсона;
- 4 - семейство методов Гаусса.

Верный ответ: 3

7. Какую схему конечно-разностной (КР) аппроксимации первой производной по времени целесообразно использовать для составления дискретной КР модели для уравнения дрейфа и диффузии ключевого компонента среды?

Ответы:

- 1 - неявную левую КР аппроксимацию;
- 2 - неявную правую КР аппроксимацию;
- 3 - явную правую КР аппроксимацию;
- 4 - явную левую КР аппроксимацию.

Верный ответ: 4

8. Какой из ниже перечисленных методов Вы предложили бы для решения системы пятиточечных разностных линейных уравнений?

Ответы:

- 1 - метод прогонки;

- 2 - метод Зейделя;
- 3 - метод Якоби;
- 4 - метод верхней релаксации.

Верный ответ: 4

9. Какой численный метод Вы считаете правильным использовать для расчёта электрических полей систем тонкопроволочных проводников?

Ответы:

- 1 - метод интегральных уравнений;
- 2 - метод конечных элементов;
- 3 - метод эквивалентных зарядов;
- 4 - метод конечных разностей.

Верный ответ: 1

10. Какой численный метод Вы считаете правильным использовать для решения уравнения Пуассона в расчётах электрических полей электрических зарядов?

Ответы:

- 1 - метод эквивалентных зарядов;
- 2 - метод конечных разностей;
- 3 - метод конечных элементов;
- 4 - метод интегральных уравнений.

Верный ответ: 2

## **II. Описание шкалы оценивания**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется студенту, правильно выполнившему практическое задание, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка «ХОРОШО» выставляется студенту, правильно выполнившему практическое задание и в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом не принципиальные ошибки.

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется студенту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам, а также не выполнил практическое задание из экзаменационного билета, но либо наметил правильный путь его выполнения, либо по указанию экзаменатора решил другую задачу из того же раздела дисциплины.

## **III. Правила выставления итоговой оценки по курсу**

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих.