

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ"

Кафедра № 32

УТВЕРЖДАЮ

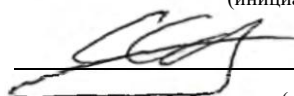
Руководитель образовательной программы

К.Т.Н., доц.

(должность, уч. степень, звание)

С.В. Солёный

(инициалы, фамилия)



(подпись)

«18» февраля 2026 г

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Моделирование и оптимизация в электроэнергетике»

(Наименование дисциплины)

Код направления подготовки/ специальности	13.05.02
Наименование направления подготовки/ специальности	Специальные электромеханические системы
Наименование направленности/ специализации	Электромеханические системы специальных устройств и изделий
Форма обучения	очная
Год приема	2026

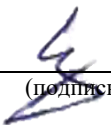
Санкт-Петербург– 2026

Лист согласования рабочей программы дисциплины

Программу составил (а)

доц., к.т.н., доц.

(должность, уч. степень, звание)

 18.02.2026  
(подпись, дата)

В.П. Кузьменко

(инициалы, фамилия)

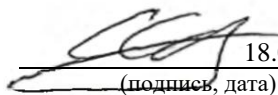
Программа одобрена на заседании кафедры № 32

«18» февраля 2026 г, протокол № 8

Заведующий кафедрой № 32

к.т.н., доц.

(уч. степень, звание)

 18.02.2026  
(подпись, дата)

С.В. Солёный

(инициалы, фамилия)

Заместитель директора института №3 по методической работе

доц., к.т.н.

(должность, уч. степень, звание)

 18.02.2026  
(подпись, дата)

Н.В. Решетникова

(инициалы, фамилия)

## Аннотация

Дисциплина «Моделирование и оптимизация в электроэнергетике» входит в образовательную программу высшего образования – программу специалитета по направлению подготовки/ специальности 13.05.02 «Специальные электромеханические системы» направленности/специализации «Электромеханические системы специальных устройств и изделий». Дисциплина реализуется кафедрой «№32».

Дисциплина не является обязательной при освоении обучающимся образовательной программы и направлена на углубленное формирование следующих компетенций:

ПК-2 «Способность участвовать в конструировании электротехнических и электроэнергетических устройств, специальных электромеханических систем»

ПК-4 «Способность участвовать в планировании, подготовке, выполнении и обработке результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ»

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с моделированием электрических и электромагнитных процессов в электроэнергетике для оптимизации энергетических процессов.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, лабораторные работы, самостоятельная работа обучающегося.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости, промежуточная аттестация в форме дифференцированного зачета (9 семестр).

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа.

Язык обучения по дисциплине «русский»

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

### 1.1. Цели преподавания дисциплины

Целью преподавания дисциплины является формирование у обучающихся профессиональных знаний и умений в области математического и компьютерного моделирования электрических и магнитных полей, а также движения электрических зарядов в постоянных электрических и магнитных полях с учетом применения современных программных средств численного моделирования физических процессов. Дисциплина направлена на освоение методов постановки расчетных задач, выбора математических моделей, численного решения уравнений электростатики и магнитостатики, анализа траекторий заряженных частиц и интерпретации результатов моделирования применительно к объектам и процессам электроэнергетики и электротехнических систем.

1.2. Дисциплина является факультативной дисциплиной по специальности образовательной программы высшего образования (далее – ОП ВО).

1.3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОП ВО.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен обладать следующими компетенциями или их частями. Компетенции и индикаторы их достижения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень компетенций и индикаторов их достижения

Категория (группа) компетенции	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Профессиональные компетенции	ПК-2 Способность участвовать в конструировании электротехнических и электроэнергетических устройств, специальных электромеханических систем	ПК-2.3.2 использует методы разработки оригинальных алгоритмов и программных решений с использованием современных технологий
Профессиональные компетенции	ПК-4 Способность участвовать в планировании, подготовке, выполнении и обработке результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ	ПК-4.У.2 умеет применять актуальную нормативную документацию при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

## 2. Место дисциплины в структуре ОП

Дисциплина может базироваться на знаниях, ранее приобретенных обучающимися при изучении следующих дисциплин:

- «Энергетическая электроника»,
- «Электрические системы и сети»,
- «Общая энергетика»

Знания, полученные при изучении материала данной дисциплины, имеют как самостоятельное значение, так и вспомогательное использование при прохождении производственной преддипломной практики и подготовке выпускной квалификационной работы, и изучении других дисциплин:

- «Основы теории переходных процессов»,
- «Основы релейной защиты и автоматики»,
- «Электромагнитная совместимость».

### 3. Объем и трудоемкость дисциплины

Данные об общем объеме дисциплины, трудоемкости отдельных видов учебной работы по дисциплине (и распределение этой трудоемкости по семестрам) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Объем и трудоемкость дисциплины

Вид учебной работы	Всего	Трудоемкость по семестрам
		№9
1	2	3
<b>Общая трудоемкость дисциплины, ЗЕ/ (час)</b>	2/ 72	2/ 72
<b>Из них часов практической подготовки</b>	17	17
<b>Аудиторные занятия, всего час.</b>	34	34
в том числе:		
лекции (Л), (час)	17	17
практические/семинарские занятия (ПЗ), (час)		
лабораторные работы (ЛР), (час)	17	17
курсовой проект (работа) (КП, КР), (час)		
экзамен, (час)		
<b>Самостоятельная работа, всего (час)</b>	38	38
<b>Вид промежуточной аттестации:</b> зачет, дифф. зачет, экзамен (Зачет, Дифф. зач, Экз.)	Дифф. зач.	Дифф. зач.

### 4. Содержание дисциплины

#### 4.1. Распределение трудоемкости дисциплины по разделам и видам занятий.

Разделы, темы дисциплины и их трудоемкость приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Разделы, темы дисциплины, их трудоемкость

Разделы, темы дисциплины	Лекции (час)	ПЗ (СЗ) (час)	ЛР (час)	КП/КР (час)	СР (час)
Семестр 9					
Раздел 1. Моделирование электростатических полей системы неподвижных зарядов Тема 1.1. Электростатическое поле системы неподвижных электрических зарядов Тема 1.2. Расчет напряженности и потенциала электростатического поля Тема 1.3. Визуализация силовых линий и эквипотенциальных поверхностей	5		5		10
Раздел 2. Моделирование магнитных полей проводников с постоянным током Тема 2.1. Магнитное поле витка с постоянным током Тема 2.2. Магнитное поле соленоида с постоянным током Тема 2.3. Магнитное поле тороидальной обмотки с постоянным током	5		5		10

Раздел 3. Численное решение уравнений Лапласа и Пуассона Тема 3.1. Постановка краевых задач электростатики Тема 3.2. Численное решение уравнения Лапласа Тема 3.3. Численное решение уравнения Пуассона	2		2		8
Раздел 4. Моделирование движения электрических зарядов в постоянных полях Тема 4.1. Постановка задачи движения заряженной частицы в электрическом и магнитном поле Тема 4.2. Рассеивание частиц в центральном поле. Опыт Резерфорда Тема 4.3. Движение электрических зарядов в постоянном магнитном поле Тема 4.4. Движение электрических зарядов в постоянных электрических и магнитных полях Тема 4.5. Анализ траекторий заряженных частиц и интерпретация результатов моделирования	5		5		10
Раздел 5.					
Итого в семестре:	17		17		38
Итого	17	0	17	0	38

Практическая подготовка заключается в непосредственном выполнении обучающимися определенных трудовых функций, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

#### 4.2. Содержание разделов и тем лекционных занятий.

Содержание разделов и тем лекционных занятий приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Содержание разделов и тем лекционного цикла

Номер раздела	Название и содержание разделов и тем лекционных занятий
1	Раздел 1. Моделирование электростатических полей системы неподвижных зарядов. Тема 1.1. Электростатическое поле системы неподвижных электрических зарядов. Демонстрация слайдов. Рассматриваются основные положения моделирования электростатических полей, создаваемых системой неподвижных электрических зарядов. Тема 1.2 Расчет напряженности и потенциала электростатического поля. Демонстрация слайдов. Изучаются понятия напряженности и потенциала электростатического поля, принцип суперпозиции, способы расчета результирующего поля и представления результатов моделирования в виде силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Тема 1.3 Визуализация силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Демонстрация слайдов. Рассматриваются методы графического представления результатов моделирования электростатического поля, построение карт распределения потенциала, силовых линий и областей с различной напряженностью поля.
2	Раздел 2. Моделирование магнитных полей проводников с постоянным током. Раздел посвящен моделированию магнитных полей, создаваемых проводниками и обмотками с постоянным током. Рассматриваются магнитное поле витка, соленоида и тороидальной обмотки, особенности распределения магнитной индукции и зависимость параметров поля от геометрии токовой системы. Тема 2.1 Магнитное поле витка с постоянным током. Демонстрация слайдов. Изучается постановка задачи моделирования магнитного поля кругового витка, распределение магнитной индукции в пространстве и влияние силы тока и

	<p>геометрических параметров витка на поле.</p> <p>Тема 2.2 Магнитное поле соленоида с постоянным током. Демонстрация слайдов. Рассматривается модель магнитного поля соленоида, распределение поля внутри и вне соленоида, зависимость магнитной индукции от числа витков, длины соленоида и силы тока.</p> <p>Тема 2.3 Магнитное поле тороидальной обмотки с постоянным током. Демонстрация слайдов. Изучаются особенности моделирования магнитного поля тороидальной обмотки, распределение магнитной индукции в тороидальной области и влияние параметров обмотки на форму и интенсивность поля.</p>
3	<p>Раздел 3. Численное решение уравнений Лапласа и Пуассона. Рассматриваются численные методы решения краевых задач электростатики. Изучаются уравнения Лапласа и Пуассона, задание граничных условий, построение расчетной сетки, итерационные методы решения и анализ точности получаемого численного результата.</p> <p>Тема 3.1 Постановка краевых задач электростатики. Демонстрация слайдов. Рассматриваются физический смысл краевых условий, задание области моделирования, источников поля и граничных значений потенциала.</p> <p>Тема 3.2 Численное решение уравнения Лапласа. Демонстрация слайдов. Изучается решение задач для областей без объемного заряда, построение сеточной модели, итерационное вычисление потенциала и визуализация распределения поля.</p> <p>Тема 3.3 Численное решение уравнения Пуассона. Демонстрация слайдов. Рассматривается моделирование электростатических полей при наличии распределенного заряда, особенности учета правой части уравнения и анализ полученного распределения потенциала.</p>
4	<p>Раздел 4. Моделирование движения электрических зарядов в постоянных полях. Раздел посвящен моделированию траекторий заряженных частиц в постоянных электрических и магнитных полях. Рассматриваются уравнение движения заряда, сила Лоренца, численное интегрирование уравнений движения, рассеивание частиц в центральном поле и движение зарядов в однородном магнитном поле.</p> <p>Тема 4.1 Постановка задачи движения заряженной частицы в электрическом и магнитном поле. Демонстрация слайдов. Изучаются исходные уравнения движения, начальные условия, параметры частицы и поля, а также выбор численного метода для расчета траектории.</p> <p>Тема 4.2 Рассеивание частиц в центральном поле. Опыт Резерфорда. Демонстрация слайдов. Рассматривается моделирование движения заряженной частицы в центральном поле, анализ отклонения траектории и связь модели с физической интерпретацией опыта Резерфорда.</p> <p>Тема 4.3 Движение электрических зарядов в постоянном магнитном поле. Демонстрация слайдов. Изучаются особенности движения заряженной частицы в однородном магнитном поле, круговое и винтовое движение, влияние массы, заряда, скорости и магнитной индукции на параметры траектории.</p> <p>Тема 4.4 Движение электрических зарядов в постоянных электрических и магнитных полях. Демонстрация слайдов. Рассматривается совместное действие электрического и магнитного полей на заряженную частицу, особенности изменения скорости, направления движения и формы траектории.</p> <p>Тема 4.5 Анализ траекторий заряженных частиц и интерпретация результатов моделирования. Демонстрация слайдов. Изучаются способы представления траекторий, оценка влияния параметров поля и частицы на результат моделирования, а также формулирование физических выводов по результатам расчета.</p>

#### 4.3. Практические (семинарские) занятия

Темы практических занятий и их трудоемкость приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Практические занятия и их трудоемкость

№ п/п	Темы практических занятий	Формы практических занятий	Трудоемкость, (час)	Из них практической подготовки, (час)	№ раздела дисциплины
Учебным планом не предусмотрено					
Всего					

#### 4.4. Лабораторные занятия

Темы лабораторных занятий и их трудоемкость приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Лабораторные занятия и их трудоемкость

№ п/п	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость, (час)	Из них практической подготовки, (час)	№ раздела дисциплины
Семестр 9				
1	Моделирование электростатического поля системы неподвижных электрических зарядов	3	3	1
2	Моделирование магнитного поля витка и соленоида с постоянным током	4	4	2
3	Численное решение уравнений Лапласа и Пуассона для электростатического поля	3	3	3
4	Моделирование движения электрического заряда в постоянном магнитном поле	3	3	4
5	Моделирование движения электрического заряда в постоянных электрических и магнитных полях	4	4	4
Всего		17	17	

#### 4.5. Выполнение курсового проекта/ курсовой работы

Учебным планом не предусмотрено

#### 4.6. Самостоятельная работа обучающихся

Виды самостоятельной работы и ее трудоемкость приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Виды самостоятельной работы и ее трудоемкость

Вид самостоятельной работы	Всего, час	Семестр 9, час
1	2	3
Изучение теоретического материала дисциплины (ТО)	30	30
Курсовое проектирование (КП, КР)		
Расчетно-графические задания (РГЗ)		
Выполнение реферата (Р)		
Подготовка к текущему контролю успеваемости (ТКУ)	4	4
Домашнее задание (ДЗ)		
Контрольные работы заочников (КРЗ)		
Подготовка к промежуточной аттестации (ПА)	4	4
Всего:	38	38



5. Перечень учебно-методического обеспечения  
для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)  
Учебно-методические материалы для самостоятельной работы обучающихся указаны в  
п.п. разделов 6-11.

6. Перечень печатных и электронных учебных изданий

Перечень печатных и электронных учебных изданий приведен в таблице 8.

Таблица 8– Перечень печатных и электронных учебных изданий

Шифр/ URL адрес	Библиографическая ссылка	Количество экземпляров в библиотеке (кроме электронных экземпляров)
<a href="https://e.lanbook.com/book/97981">https://e.lanbook.com/book/97981</a>	Митрофанов, С. В. Моделирование в электроэнергетике : учебное пособие / С. В. Митрофанов, Л. А. Семенова. — Оренбург : ОГУ, 2015. — 143 с. — ISBN 978-5-7410-1346-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/97981">https://e.lanbook.com/book/97981</a> — Режим доступа: для авториз. пользователей.	
<a href="https://e.lanbook.com/book/141608">https://e.lanbook.com/book/141608</a>	Моделирование в электроэнергетике : учебное пособие / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, И. К. Шарипов, С. В. Аникуев. — Ставрополь : СтГАУ, 2018. — 128 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/141608">https://e.lanbook.com/book/141608</a> — Режим доступа: для авториз. пользователей.	
<a href="https://e.lanbook.com/book/513278">https://e.lanbook.com/book/513278</a>	Бычкова, Математическое моделирование средствами Matlab : учебное пособие / Бычкова, В. Т. . — Брянск : Брянский ГАУ, 2025. — 104 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/513278">https://e.lanbook.com/book/513278</a> — Режим доступа: для авториз. пользователей.	

7. Перечень электронных образовательных ресурсов  
информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

URL адрес	Наименование
<a href="https://pro.guap.ru/">https://pro.guap.ru/</a>	Методические рекомендации для самостоятельной подготовки, учебно-методические материалы по темам, мультимедийные презентации по темам, извлечения из нормативно-правовых актов по дисциплине размещены <a href="#">внутри ЭИОС ГУАП «Интегрированная среда обучения»</a>

## 8. Перечень информационных технологий

8.1. Перечень программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Перечень используемого программного обеспечения представлен в таблице 10.

Таблица 10– Перечень программного обеспечения

№ п/п	Наименование
	Электронная информационно-образовательная среда ГУАП «Интегрированная среда обучения» ( <a href="https://pro.guap.ru/">https://pro.guap.ru/</a> ) разработана сотрудниками ГУАП (введена в эксплуатацию приказом ГУАП от 06.06.2017 № 05-215/17), перечень модулей и их функциональное назначение изложены по ссылке <a href="https://guap.ru/it/system/iso">https://guap.ru/it/system/iso</a>
2	Официальный сайт образовательной организации в сети «Интернет» ( <a href="https://guap.ru/">https://guap.ru/</a> ), разработан сотрудниками ГУАП (введен в эксплуатацию Приказом ГУАП от 23.03.2023 № 05-145/23)
3	Microsoft Office 2019 (договор ГУАП, информация о лицензии представлена по ссылке <a href="https://guap.ru/it/system/iso/po">https://guap.ru/it/system/iso/po</a> )
4	Python v3.1x (свободно распространяемое)
5	MathWorks MATLAB (договор ГУАП, информация о лицензии представлена по ссылке <a href="https://guap.ru/it/system/iso/po">https://guap.ru/it/system/iso/po</a> )

8.2. Перечень информационно-справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Перечень используемых информационно-справочных систем представлен в таблице 11.

Таблица 11– Перечень информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование
1	Электронный каталог библиотеки ГУАП с доступом к базе полнотекстовых изданий ( <a href="https://lib.guap.ru/">https://lib.guap.ru/</a> ), доступ через личный кабинет читателя библиотеки ГУАП
2	Научная электронная библиотека «eLIBRARY» ( <a href="https://elibrary.ru/">https://elibrary.ru/</a> ), доступ через личный кабинет читателя библиотеки ГУАП, а также по IP -адресам ГУАП
3	ЭБС «Лань» ( <a href="https://e.lanbook.com/">https://e.lanbook.com/</a> ), доступ через личный кабинет читателя библиотеки ГУАП, а также по IP -адресам ГУАП
4	ЭБС Znanium ( <a href="https://znanium.ru/">https://znanium.ru/</a> ), доступ через личный кабинет читателя библиотеки ГУАП, а также по IP -адресам ГУАП

## 9. Материально-техническая база

Состав материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине, представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Состав материально-технической базы

№ п/п	Наименование составной части материально-технической базы	Номер аудитории (при необходимости)
1	Лаборатория компьютерного моделирования: – специализированная мебель; – технические средства обучения, служащие для представления учебной информации; ПЭВМ - Дисплей интерактивный НТС- 1 шт. Лабораторное оборудование: ПЭВМ – «Место рабочее автоматизированное» – 18 шт. Обеспечен доступ в электронную информационно-образовательную среду ГУАП по локальной вычислительной сети или точке доступа WiFi.	31-04 (ул. Большая Морская, д.67, лит. А)
2	Компьютеры с установленным на них ПО из таблицы 10	31-04 (ул. Большая Морская, д.67, лит. А)

## 10. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

10.1. Состав оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Состав оценочных средств для проведения промежуточной аттестации

Вид промежуточной аттестации	Перечень оценочных средств
Дифференцированный зачёт	Список вопросов; Тесты.

10.2. В качестве критериев оценки уровня сформированности (освоения) компетенций обучающимися применяется 5-балльная шкала оценки сформированности компетенций, которая приведена в таблице 14. В течение семестра может использоваться 100-балльная шкала модульно-рейтинговой системы Университета, правила использования которой, установлены соответствующим локальным нормативным актом ГУАП.

Таблица 14 – Критерии оценки уровня сформированности компетенций

Оценка компетенции	Характеристика сформированных компетенций
5-балльная шкала	
«отлично» «зачтено»	Обучающийся: – глубоко и всесторонне усвоил программный материал; – уверенно, логично, последовательно и грамотно его излагает; – опираясь на знания основной и дополнительной литературы, тесно связывает усвоенные научные положения с практической деятельностью направления; – умело обосновывает и аргументирует выдвигаемые им идеи; – делает выводы и обобщения; – свободно владеет системой специализированных понятий. – правильно выполнил от 90% до 100% тестовых заданий**.

Оценка компетенции	Характеристика сформированных компетенций
5-балльная шкала	
«хорошо» «зачтено»	Обучающийся: – твердо усвоил программный материал, грамотно и по существу излагает его, опираясь на знания основной литературы; – не допускает существенных неточностей; – увязывает усвоенные знания с практической деятельностью направления; – аргументирует научные положения; – делает выводы и обобщения; – владеет системой специализированных понятий. – правильно выполнил от 70% до 89% тестовых заданий**.
«удовлетворительно» «зачтено»	– обучающийся усвоил только основной программный материал, по существу излагает его, опираясь на знания только основной литературы; – допускает несущественные ошибки и неточности; – испытывает затруднения в практическом применении знаний направления; – слабо аргументирует научные положения; – затрудняется в формулировании выводов и обобщений; – частично владеет системой специализированных понятий. – правильно выполнил от 51% до 69% тестовых заданий**.
«неудовлетворительно» «не зачтено»	– обучающийся не усвоил значительной части программного материала; – допускает существенные ошибки и неточности при рассмотрении проблем в конкретном направлении; – испытывает трудности в практическом применении знаний; – не может аргументировать научные положения; – не формулирует выводов и обобщений. – правильно выполнил менее 60% тестовых заданий**.

### 10.3. Типовые контрольные задания или иные материалы.

Вопросы (задачи) для экзамена представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Вопросы (задачи) для экзамена

№ п/п	Перечень вопросов (задач) для экзамена	Код индикатора
	Учебным планом не предусмотрено	

Вопросы для дифф. зачета представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Вопросы для дифф. зачета

№ п/п	Перечень вопросов дифф. зачета	Код индикатора
1	Что понимается под математическим моделированием электрического поля системы неподвижных зарядов?	ПК-2.3.2
2	В чем заключается физический смысл напряженности электростатического поля?	
3	В чем заключается физический смысл потенциала электростатического поля?	
4	Как применяется принцип суперпозиции при расчете электростатического поля системы зарядов?	
5	Какие исходные данные необходимы для моделирования электростатического поля системы точечных зарядов?	
6	Как связаны напряженность электростатического поля и потенциал?	
7	Что показывают силовые линии электростатического поля и	

	эквипотенциальные поверхности?	
8	Какие параметры определяют магнитное поле витка с постоянным током?	
9	Какие особенности имеет магнитное поле соленоида с постоянным током?	
10	Какие особенности имеет магнитное поле тороидальной обмотки с постоянным током?	
11	В каких случаях при моделировании электростатических полей используется уравнение Лапласа?	
12	В каких случаях при моделировании электростатических полей используется уравнение Пуассона?	
13	Какие граничные условия задаются при численном решении краевых задач электростатики?	
14	Какие силы действуют на электрический заряд в электрическом и магнитном полях?	
15	Как сила Лоренца определяет характер движения заряженной частицы в постоянном магнитном поле?	
16	Сформулируйте постановку задачи моделирования электростатического поля системы точечных зарядов.	ПК-4.У.2
17	Составьте алгоритм расчета напряженности электростатического поля в заданной точке пространства.	
18	Составьте алгоритм расчета потенциала электростатического поля в узлах расчетной сетки.	
19	Постройте схему вычисления результирующего поля системы нескольких неподвижных зарядов.	
20	Определите направление вектора напряженности поля в заданной точке относительно положительного и отрицательного зарядов.	
21	Выполните качественный анализ распределения силовых линий для системы двух разноименных зарядов.	
22	Выполните качественный анализ распределения силовых линий для системы двух одноименных зарядов.	
23	Составьте расчетную схему моделирования магнитного поля кругового витка с постоянным током.	
24	Сравните распределение магнитного поля внутри соленоида и вне его по результатам моделирования.	
25	Определите, как изменится магнитная индукция соленоида при увеличении силы тока или числа витков.	
26	Сформулируйте алгоритм численного решения уравнения Лапласа методом конечных разностей.	
27	Сформулируйте алгоритм численного решения уравнения Пуассона при наличии распределенного заряда.	
28	Определите начальные условия для моделирования движения заряженной частицы в постоянном магнитном поле.	
29	По заданным значениям заряда, массы, скорости и магнитной индукции определите характер траектории заряженной частицы.	
30	Проанализируйте влияние неоднородности магнитного поля на форму траектории заряженной частицы.	

Перечень тем для выполнения курсового проекта/ курсовой работы представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Перечень тем для выполнения курсового проекта / курсовой работы

№ п/п	Примерный перечень тем для выполнения курсового проекта/ курсовой работы
	Учебным планом не предусмотрено

Вопросы для проведения промежуточной аттестации в виде тестирования представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Примерный перечень вопросов для тестов

№ п/п	Примерный перечень вопросов для тестов	Код индикатора
	<b>Задание закрытого типа с выбором одного правильного ответа</b>	
1	<i>Прочитайте текст, выберите один правильный ответ.</i> Какая физическая величина характеризует силовое действие электростатического поля на единичный положительный пробный заряд? 1) Потенциал электростатического поля. 2) Напряженность электростатического поля. 3) Электрический заряд. 4) Магнитная индукция.	ПК-2.3.2
2	<i>Инструкция: Прочитайте текст, выберите один правильный ответ.</i> Какой набор исходных данных необходим для расчета траектории заряженной частицы в постоянном магнитном поле? 1) Только цвет траектории и размер расчетного окна. 2) Заряд, масса, начальная скорость частицы и магнитная индукция. 3) Только значение электрического сопротивления. 4) Только частота переменного тока.	ПК-4.У.2
	<b>Задание закрытого типа с выбором нескольких правильных ответов</b>	
3	<i>Прочитайте текст, выберите правильные ответы.</i> Выберите величины, которые необходимы для моделирования электростатического поля системы точечных зарядов. 1) Координаты зарядов. 2) Значения зарядов. 3) Масса проводника с током. 4) Координаты точек наблюдения. 5) Цвет расчетной сетки.	ПК-2.3.2
4	<i>Инструкция: Прочитайте текст, выберите правильные ответы.</i> Выберите действия, которые относятся к алгоритму численного решения уравнения Лапласа методом конечных разностей. 1) Задание расчетной сетки. 2) Задание граничных условий. 3) Итерационное уточнение значений потенциала в узлах сетки. 4) Определение коэффициента полезного действия трансформатора. 5) Анализ полученного распределения потенциала.	ПК-4.У.2
	<b>Задание закрытого типа на установление соответствия</b>	
5	<i>Инструкция: Прочитайте текст и установите соответствие.</i> Сопоставьте понятие и его содержание. А. Напряженность электрического поля Б. Потенциал электрического поля В. Уравнение Лапласа Г. Уравнение Пуассона  1. Уравнение для потенциала в области без объемного заряда. 2. Энергетическая характеристика электростатического поля. 3. Уравнение для потенциала при наличии распределенного заряда. 4. Силовая характеристика электростатического поля. 5. Характеристика теплового движения частиц.	ПК-2.3.2

	Запишите выбранные цифры под соответствующими буквами: А __ Б __ В __ Г __	
6	<p><i>Инструкция: Прочитайте текст и установите соответствие.</i></p> <p>Сопоставьте задачу моделирования и основной результат ее выполнения.</p> <p>А. Моделирование поля двух разноименных зарядов Б. Моделирование магнитного поля соленоида В. Решение уравнения Пуассона Г. Моделирование движения заряда в магнитном поле</p> <p>1. Распределение потенциала при наличии объемного заряда. 2. Траектория заряженной частицы под действием силы Лоренца. 3. Картина силовых линий между положительным и отрицательным зарядом. 4. Распределение магнитной индукции внутри и вне обмотки. 5. Значение температуры проводника.</p> <p>Запишите выбранные цифры под соответствующими буквами: А __ Б __ В __ Г __</p>	ПК-4.У.2
	<b>Задание закрытого типа на установление правильной последовательности</b>	
7	<p><i>Инструкция: Прочитайте текст и установите последовательность.</i></p> <p>Расположите этапы моделирования электростатического поля системы зарядов в правильной последовательности.</p> <p>1) Визуализировать распределение потенциала и силовые линии. 2) Задать координаты и значения электрических зарядов. 3) Выбрать расчетную область и точки наблюдения. 4) Рассчитать напряженность и потенциал поля.</p> <p>Запишите соответствующую последовательность цифр слева направо: _____</p>	ПК-2.3.2
8	<p><i>Инструкция: Прочитайте текст и установите последовательность.</i></p> <p>Расположите этапы моделирования движения электрического заряда в постоянном магнитном поле в правильной последовательности.</p> <p>1) Построить и проанализировать траекторию частицы. 2) Задать заряд, массу и начальную скорость частицы. 3) Задать параметры магнитного поля. 4) Численно проинтегрировать уравнения движения.</p> <p>Запишите соответствующую последовательность цифр слева направо: _____</p>	ПК-4.У.2
	<b>Задание открытого типа</b>	
9	<p><i>Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ.</i></p> <p>Раскройте физический смысл принципа суперпозиции при моделировании электростатического поля системы неподвижных зарядов.</p>	ПК-2.3.2
10	<p><i>Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ.</i></p> <p>Сформулируйте алгоритм качественного анализа траектории заряженной частицы в неоднородном магнитном поле.</p>	ПК-4.У.2

Перечень тем контрольных работ по дисциплине обучающихся заочной формы обучения, представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Перечень контрольных работ

№ п/п	Перечень контрольных работ
	Не предусмотрено

10.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания индикаторов, характеризующих этапы формирования компетенций, содержатся в локальных нормативных актах ГУАП, регламентирующих порядок и процедуру проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся ГУАП.

## 11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

11.1. Методические указания для обучающихся по освоению лекционного материала.

Основное назначение лекционного материала – логически стройное, системное, глубокое и ясное изложение учебного материала. Назначение современной лекции в рамках дисциплины не в том, чтобы получить всю информацию по теме, а в освоении фундаментальных проблем дисциплины, методов научного познания, новейших достижений научной мысли. В учебном процессе лекция выполняет методологическую, организационную и информационную функции. Лекция раскрывает понятийный аппарат конкретной области знания, её проблемы, дает цельное представление о дисциплине, показывает взаимосвязь с другими дисциплинами.

Планируемые результаты при освоении обучающимися лекционного материала:

- получение современных, целостных, взаимосвязанных знаний, уровень которых определяется целевой установкой к каждой конкретной теме;
- получение опыта творческой работы совместно с преподавателем;
- развитие профессионально-деловых качеств, любви к предмету и самостоятельного творческого мышления.
- появление необходимого интереса, необходимого для самостоятельной работы;
- получение знаний о современном уровне развития науки и техники и о прогнозе их развития на ближайшие годы;
- научиться методически обрабатывать материал (выделять главные мысли и положения, приходить к конкретным выводам, повторять их в различных формулировках);
- получение точного понимания всех необходимых терминов и понятий.

Лекционный материал может сопровождаться демонстрацией слайдов и использованием раздаточного материала при проведении коротких дискуссий об особенностях применения отдельных тематик по дисциплине.

Структура предоставления лекционного материала описана в таблице 4.

11.2. Методические указания для обучающихся по участию в семинарах  
*Учебным планом не предусмотрено.*

11.3. Методические указания для обучающихся по прохождению практических занятий.  
*Учебным планом не предусмотрено.*

11.4. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ.

В ходе выполнения лабораторных работ обучающийся должен углубить и закрепить знания, практические навыки, овладеть современной методикой и техникой эксперимента в соответствии с квалификационной характеристикой обучающегося. Выполнение лабораторных работ состоит из экспериментально-практической, расчетно-аналитической частей и контрольных мероприятий.



Выполнение лабораторных работ обучающимся является неотъемлемой частью изучения дисциплины, определяемой учебным планом, и относится к средствам, обеспечивающим решение следующих основных задач обучающегося:

- приобретение навыков исследования процессов, явлений и объектов, изучаемых в рамках данной дисциплины;
- закрепление, развитие и детализация теоретических знаний, полученных на лекциях;
- получение новой информации по изучаемой дисциплине;
- приобретение навыков самостоятельной работы с лабораторным оборудованием и приборами.

#### Задание и требования к проведению лабораторных работ

##### **Задание и требования к проведению лабораторных работ**

Лабораторные работы выполняются с использованием MATLAB либо Python. При использовании Python рекомендуется применять библиотеки NumPy, SciPy и Matplotlib.

При выполнении каждой лабораторной работы обучающийся должен задать исходные условия, реализовать расчетный алгоритм, получить графическое представление результата и дать физическую интерпретацию построенных зависимостей.

##### **Лабораторная работа №1. Моделирование электростатического поля системы неподвижных электрических зарядов**

**Цель работы:** освоить методику расчета потенциала и напряженности электростатического поля системы неподвижных точечных зарядов, построить поверхность потенциала, карту эквипотенциальных линий и векторное поле напряженности.

##### **Исходные условия работы**

В качестве базового варианта рассматривается электрический диполь, состоящий из двух точечных зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку:

$$q_1 = +q;$$

$$q_2 = -q;$$

$$r_1 = (-a, 0);$$

$$r_2 = (a, 0).$$

Дополнительно обучающийся изменяет условие и рассматривает случай, когда заряды имеют одинаковые знаки:

$$q_1 = +q;$$

$$q_2 = +q.$$

В качестве расширенного варианта допускается рассмотреть квадруполь: четыре заряда равной величины, расположенные в вершинах квадрата, при этом соседние заряды имеют разные знаки.

##### **Задание на лабораторную работу**

1. Задать координаты и значения зарядов.
2. Задать расчетную область на плоскости XOY.
3. Сформировать равномерную координатную сетку.
4. Рассчитать потенциал электростатического поля в узлах сетки.
5. Рассчитать напряженность поля через градиент потенциала или через сумму вкладов зарядов.
6. Построить поверхность потенциала.
7. Построить карту эквипотенциальных линий.
8. Построить векторное поле напряженности.
9. Сравнить картины поля для разноименных и одноименных зарядов.
10. Объяснить, почему силовые линии начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных и не пересекаются.

##### **Методика выполнения работы**

Сначала задаются расчетные единицы. В учебном примере используется заряд электрона и характерный масштаб расстояния:

```
e = 1.6e-16;
```

```
R0 = 1e-6;
```

Далее задаются заряды и их координаты. Для диполя можно использовать следующий набор исходных данных:

```
q = [e -e];
```

```
xq = [-2*R0 2*R0];
```

```
yq = [0 0];
```

Затем задается расчетная область и координатная сетка. В MATLAB для формирования двумерных массивов координат используется функция meshgrid:

```
N1 = 79;
```

```
Xmin = -10*R0; Xmax = 10*R0;
```

```
Ymin = -10*R0; Ymax = 10*R0;
```

```
i = 1:N1;
```

```
X = Xmin + (Xmax-Xmin)/N1*i;
```

```
Y = Ymin + (Ymax-Ymin)/N1*i;
```

```
[X1,Y1] = meshgrid(X,Y);
```

Далее реализуется функция расчета потенциала. Ее смысл состоит в том, что для каждого узла сетки вычисляется расстояние до каждого заряда, после чего потенциал находится как сумма вкладов всех зарядов. Алгоритм можно записать следующим образом:

```
e0 = 8.85e-12;
```

```
M = zeros(length(Y), length(X));
```

```
for i = 1:length(Y)
```

```
    for j = 1:length(X)
```

```
        s = 0;
```

```
        for k = 1:length(q)
```

```
            R = sqrt((X(j)-xq(k))^2 + (Y(i)-yq(k))^2);
```

```
            s = s + q(k)/R;
```

```
        end
```

```
        M(i,j) = s/(4*pi*e0);
```

```
    end
```

```
end
```

После расчета потенциала строится поверхность распределения потенциала:

```
surf(X1,Y1,M);
```

```
shading interp;
```

Карта эквипотенциальных линий строится командой contour. При необходимости значения линий уровня подписываются с помощью clabel:

```
[C,h] = contour(X1,Y1,M,33);
```

```
clabel(C,h);
```

Напряженность поля может быть рассчитана как отрицательный градиент потенциала. Для отображения направления силовых линий векторы рекомендуется нормировать:

```
[px,py] = gradient(-M);
```

```
mp = sqrt(px.^2 + py.^2);
```

```
px1 = px./mp;
```

```
py1 = py./mp;
```

```
quiver(X1,Y1,px1,py1,0.5);
```

В Python аналогичный расчет выполняется с использованием NumPy и Matplotlib:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

e0 = 8.85e-12
e = 1.6e-16
R0 = 1e-6

q = np.array([e, -e])
xq = np.array([-2*R0, 2*R0])
yq = np.array([0, 0])

x = np.linspace(-10*R0, 10*R0, 79)
y = np.linspace(-10*R0, 10*R0, 79)
X, Y = np.meshgrid(x, y)

Phi = np.zeros_like(X)
for k in range(len(q)):
    R = np.sqrt((X-xq[k])**2 + (Y-yq[k])**2)
    R[R == 0] = np.nan
    Phi += q[k]/R
Phi = Phi/(4*np.pi*e0)

plt.contour(X, Y, Phi, 33)
plt.figure()
Ey, Ex = np.gradient(-Phi)
plt.quiver(X, Y, Ex, Ey)
plt.show()
```

После получения графиков обучающийся меняет знак второго заряда и повторяет расчет:

```
q = [e e];
```

В отчете необходимо сравнить картины поля для разноименных и одноименных зарядов: форму эквипотенциалей, направление векторов напряженности и области с наибольшим модулем поля.

### **Требования к результатам**

В отчете должны быть представлены исходные данные, расчетная сетка, значения и координаты зарядов, поверхность потенциала, карта эквипотенциалей, поле векторов напряженности, сравнение поля диполя и поля одноименных зарядов, ответы на вопросы о направлении и непересечении силовых линий.

### **Лабораторная работа №2. Моделирование магнитного поля витка и соленоида с постоянным током**

**Цель работы:** освоить расчет магнитного поля токовых систем по закону Био-Савара-Лапласа, построить магнитное поле кругового витка и соленоида, сравнить распределение поля внутри и вне соленоида.

#### **Исходные условия работы**

Сначала моделируется одиночный круговой виток радиуса  $a = 1$ . Виток разбивается на конечное число элементов  $N_{\text{step}} = 100$ . Расчет выполняется в плоскости YOZ. Внутри расчетной функции каждый элемент витка задается радиус-вектором и элементом длины, а вклад в поле вычисляется через векторное произведение.

#### **Задание на лабораторную работу**

1. Создать расчетную сетку в плоскости YOZ.
2. Разбить виток на 100 элементов.
3. Для каждого узла сетки вычислить вклад всех элементов тока.

4. Получить компоненты магнитного поля  $B_y$  и  $B_z$ .
5. Построить поле единичных векторов, касательных к силовым линиям магнитного поля.
6. Построить карту линий уровня модуля магнитного поля или векторного потенциала.
7. Перейти к расчету соленоида.
8. Рассмотреть соленоид при разных длинах, числе витков и шаге намотки.
9. Сравнить поле витка и поле соленоида.
10. Сформулировать вывод о влиянии геометрии токовой системы на распределение магнитного поля.

#### **Методика выполнения работы**

Для витка задается расчетная сетка:

$$N1 = 21;$$

$$i = 1:N1+1;$$

$$Y_{min} = -5; Y_{max} = 5;$$

$$Z_{min} = -5; Z_{max} = 5;$$

$$Y = Y_{min} + (Y_{max} - Y_{min})/N1*(i-1);$$

$$Z = Z_{min} + (Z_{max} - Z_{min})/N1*(i-1);$$

$$a = 1;$$

Далее создается функция Ring. Ее логика состоит в том, что виток заменяется набором малых элементов тока, а в каждой точке расчетной сетки суммируются вклады всех элементов по закону Био-Савара-Лапласа:

function [By,Bz] = Ring(a,Y,Z)

$$Nstep = 100;$$

$$X = 0;$$

$$Ny = \text{length}(Y);$$

$$Nz = \text{length}(Z);$$

$$\text{deltaphi} = 2*\pi/Nstep;$$

for i = 1:Nz

for j = 1:Ny

$$s = [0 \ 0 \ 0];$$

for n = 1:Nstep+1

$$\text{phi} = \text{deltaphi}*(n-1);$$

$$dL = [-a*\sin(\text{phi})*\text{deltaphi}, a*\cos(\text{phi})*\text{deltaphi}, 0];$$

$$r = [a*\cos(\text{phi}), a*\sin(\text{phi}), 0];$$

$$R = [X, Y(j), Z(i)];$$

$$s = s + \text{cross}(dL, (R-r))/\text{norm}(R-r)^3;$$

end

$$\text{by}(i,j) = s(2);$$

$$\text{bz}(i,j) = s(3);$$

end

end

$$By = \text{by};$$

$$Bz = \text{bz};$$

end

После этого выполняется расчет и построение поля единичных векторов:

```
[By,Bz] = Ring(a,Y,Z);  
mp = sqrt(By.^2 + Bz.^2);
```

```
by1 = By./mp;  
bz1 = Bz./mp;
```

```
quiver(Y,Z,by1,bz1);  
axis square;  
grid on;
```

Для построения более гладкого изображения силовых линий можно использовать векторный потенциал: в узлах расчетной сетки вычисляется модуль векторного потенциала  $A$ , после чего строится карта линий уровня  $|A| = \text{const}$ .

После моделирования витка выполняется моделирование соленоида. Преподаватель может предложить два варианта: соленоид как система соосных витков либо соленоид как спиральная токовая линия. Первый вариант проще: поле каждого витка рассчитывается функцией `Ring` с учетом смещения витка вдоль оси  $z$ , затем вклады всех витков суммируются. Второй вариант ближе к модели однослойной спиральной обмотки, где учитываются круговая и продольная составляющие тока.

Пример расчетных условий для соленоида:

```
Radius = 0.5;  
Solenoid_Length = 6;  
N_Coil = 200;  
I = 1;  
h = Solenoid_Length/N_Coil;
```

Для исследования обучающийся меняет параметры соленоида:

```
N_Coil = 50; 100; 200;  
Solenoid_Length = 3; 6; 10;  
Radius = 0.5; 1.0.
```

В отчете необходимо показать, как меняется магнитное поле внутри соленоида, у его торцов и вне соленоида. Также следует указать, чем отличается поле одиночного витка от поля протяженной обмотки.

### **Требования к результатам**

В отчете должны быть представлены параметры витка и соленоида, число элементов дискретизации, расчетная сетка, векторное поле витка, карта линий уровня модуля поля или векторного потенциала, результаты моделирования соленоида, сравнение поля внутри и вне соленоида, вывод о влиянии радиуса, длины, числа витков и шага намотки на распределение магнитного поля.

### **Лабораторная работа №3. Численное решение уравнений Лапласа и Пуассона для электростатического поля**

**Цель работы:** освоить конечно-разностное решение уравнений Лапласа и Пуассона методом релаксации, построить распределение потенциала и карту эквипотенциальных линий.

#### **Исходные условия работы**

Рассматривается квадратная расчетная область  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$ . Для уравнения Лапласа задаются граничные условия по потенциалу. В базовом варианте используется сетка  $N = 15$ , параметр релаксации  $\Omega = 1$  и число итераций  $N_{\text{iter}} = 200$ . Для уравнения Пуассона в правой части задается функция плотности источника.

#### **Задание на лабораторную работу**

1. Задать квадратную расчетную область.
2. Сформировать сетку  $N \times N$ .
3. Задать граничные условия для потенциала.
4. Реализовать итерационное решение уравнения Лапласа.

5. Построить карту эквипотенциалей на выбранном шаге итерации.
6. Изменить правую часть уравнения и решить уравнение Пуассона.
7. Сравнить решения Лапласа и Пуассона.
8. Изменить число узлов сетки и параметр релаксации.
9. Оценить влияние сетки и релаксации на гладкость и скорость сходимости решения.

#### **Методика выполнения работы**

Сначала задаются сетка, начальное приближение и граничные условия:

```
N = 15;
```

```
i = 1:N+1;
```

```
j = 1:N+1;
```

```
mu(i,1) = 10;
```

```
mu(i,N+1) = 10;
```

```
mu(1,j) = -10;
```

```
mu(N+1,j) = 10;
```

```
kx = 2:N;
```

```
ky = 2:N;
```

```
mu(kx,ky) = 12;
```

```
Omega = 1;
```

```
Niter = 200;
```

Далее создается функция итерационного решения. При  $f(x,y) = 0$  решается уравнение Лапласа. Если функция  $f(x,y)$  не равна нулю, решается уравнение Пуассона:

```
function z = IterationL(N, Omega, Number_of_Iteration, phi)
```

```
h = 1/N;
```

```
for k = 1: Number_of_Iteration
```

```
    for j = 2:N
```

```
        for i = 2:N
```

```
            phi(i,j) = (1-Omega)*phi(i,j) + ...
```

```
                Omega/4*(phi(i+1,j) + phi(i-1,j) + ...
```

```
                phi(i,j+1) + phi(i,j-1) - h^2*f(i,j));
```

```
        end
```

```
    end
```

```
    if k == 1
```

```
        q = phi;
```

```
    else
```

```
        q = cat(2,q,phi);
```

```
    end
```

```
end
```

```
z = q;
```

```
function z = f(x,y)
```

```
z = 0;
```

```
end
```

```
end
```

Для решения уравнения Пуассона студент заменяет функцию правой части. Например, можно задать ненулевую область источника в центре расчетной области:

```
function z = f(x,y)
```

```
if x > 6 && x < 10 && y > 6 && y < 10
```

```
    z = 1;
```

```
else
```

```
    z = 0;
```

```
end
```

```
end
```

После решения строится карта эквипотенциальных линий:

```
z = IterationL(N, Omega, Niter, mu);
```

```
x(i) = (i-1)/N;
```

```
y(j) = (j-1)/N;
```

```
[x1,y1] = meshgrid(x,y);
```

```
K = 100;
```

```
N1 = (N+1)*K + 1;
```

```
N2 = (N+1)*(K+1);
```

```
A = z(1:N+1, N1:N2);
```

```
contour(x1,y1,A,17);
```

В Python аналогичная схема может быть реализована следующим образом:

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
N = 15
```

```
Omega = 1.0
```

```
Niter = 200
```

```
phi = np.zeros((N+1, N+1))
```

```
phi[:,0] = 10
```

```
phi[:,-1] = 10
```

```
phi[0,:] = -10
```

```
phi[-1,:] = 10
```

```
phi[1:N,1:N] = 12
```

```
for k in range(Niter):
```

```
    for i in range(1,N):
```

```
        for j in range(1,N):
```

```
            source = 0
```

```
            phi[i,j] = (1-Omega)*phi[i,j] + Omega/4*(
```

```
                phi[i+1,j] + phi[i-1,j] + phi[i,j+1] + phi[i,j-1] - source
```

```
            )
```

```
x = np.linspace(0,1,N+1)
```

```
y = np.linspace(0,1,N+1)
```

```
X,Y = np.meshgrid(x,y)
```

```
plt.contour(X,Y,phi,17)
```

```
plt.show()
```

После этого расчет повторяется для разных сеток и параметров релаксации:

```
N = 15; 31; 61;
```

```
Omega = 0.8; 1.0; 1.5.
```

Обучающийся сравнивает гладкость эквипотенциальных линий и скорость установления решения. Преподаватель поясняет, что увеличение числа узлов повышает пространственное разрешение, а параметр релаксации влияет на скорость сходимости итерационного процесса.

#### **Требования к результатам**

В отчете должны быть представлены граничные условия, расчетная сетка, параметр релаксации, число итераций, карта эквипотенциалей для уравнения Лапласа, карта эквипотенциалей для уравнения Пуассона, сравнение решений при разных  $N$  и  $\Omega$ , вывод о сходимости и влиянии правой части уравнения.

#### **Лабораторная работа №4. Моделирование движения электрического заряда в постоянном магнитном поле**

**Цель работы:** освоить численное моделирование движения заряженной частицы в постоянном магнитном поле, построить траекторию движения, ее проекции, определить радиус окружности, период обращения и шаг винтовой линии.

#### **Исходные условия работы**

Для движения заряда в постоянном магнитном поле используется система из шести дифференциальных уравнений первого порядка. Магнитное поле задается как  $H = [0 \ 0 \ 1]$ . Начальные условия:  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $z_0 = 0$ ,  $v_{x0} = 0.1$ ,  $v_{y0} = 0$ ,  $v_{z0} = 0.01$ . Решение выполняется с помощью `ode45` в MATLAB или `solve_ivp` в Python.

#### **Задание на лабораторную работу**

1. Задать постоянное магнитное поле.
2. Задать начальные координаты и скорости заряда.
3. Создать функцию правых частей системы дифференциальных уравнений.
4. Выполнить численное интегрирование.
5. Построить трехмерную траекторию.
6. Построить проекции траектории на координатные плоскости.
7. Показать, что проекция на плоскость, перпендикулярную магнитному полю, является окружностью.
8. Определить радиус и период обращения.
9. Исследовать зависимость шага спирали от продольной скорости.
10. Построить зависимости компонент скорости от времени.
11. Исследовать влияние шага интегрирования на устойчивость решения.

#### **Методика выполнения работы**

Сначала создается функция правых частей системы уравнений движения:

```
function f = LorenzForce(t,z)
```

```
global H
```

```
f = zeros(6,1);
```

```
f(1) = z(2);
```

```
f(2) = 2*pi*(H(3)*z(4) - H(2)*z(6));
```

```
f(3) = z(4);
```

```
f(4) = -2*pi*(H(3)*z(2) - H(1)*z(6));
```

```
f(5) = z(6);
```

```
f(6) = 2*pi*(z(2)*H(2) - z(4)*H(1));
```

```
end
```

Затем задаются исходные данные:

```
global H;
```

```
H = [0 0 1];
```



```
x0 = 0;  
y0 = 0;  
z0 = 0;
```

```
vx0 = 0.1;  
vy0 = 0;  
vz0 = 0.01;
```

Численное решение в MATLAB выполняется командой:

```
[t,R] = ode45('LorenzForce',[0:10/1024:10],[x0 vx0 y0 vy0 z0 vz0]);
```

Построение пространственной траектории:

```
plot3(R(:,1),R(:,3),R(:,5),x0,y0,z0,'o','MarkerSize',6);
```

```
axis square;
```

```
grid on;
```

Построение проекций траектории:

```
figure;
```

```
plot(R(:,1),R(:,3));
```

```
axis square; grid on;
```

```
title('Проекция траектории на плоскость XOY');
```

```
figure;
```

```
plot(R(:,1),R(:,5));
```

```
grid on;
```

```
title('Проекция траектории на плоскость XOZ');
```

```
figure;
```

```
plot(R(:,3),R(:,5));
```

```
grid on;
```

```
title('Проекция траектории на плоскость YOZ');
```

Обучающийся повторяет расчет при разных значениях продольной скорости:

```
vz0 = 0;
```

```
vz0 = 0.01;
```

```
vz0 = 0.05;
```

При  $vz0 = 0$  траектория в плоскости XOY должна иметь вид окружности. При  $vz0$  не равном нулю движение становится винтовым. Для проверки влияния шага интегрирования расчет повторяется для разных временных сеток:

```
[t,R] = ode45('LorenzForce',[0:10/256:10],[x0 vx0 y0 vy0 z0 vz0]);
```

```
[t,R] = ode45('LorenzForce',[0:10/1024:10],[x0 vx0 y0 vy0 z0 vz0]);
```

```
[t,R] = ode45('LorenzForce',[0:10/4096:10],[x0 vx0 y0 vy0 z0 vz0]);
```

В Python аналогичный расчет может быть выполнен с помощью `solve_ivp`. При реализации важно сохранить тот же порядок переменных:  $x, vx, y, vy, z, vz$ .

### **Требования к результатам**

В отчете должны быть представлены начальные условия, вектор магнитного поля, функция правых частей, команда численного интегрирования, трехмерная траектория, три проекции траектории, сравнение траекторий при разных  $vz0$ , графики компонент скорости, вывод о влиянии шага интегрирования.

### **Лабораторная работа №5. Моделирование движения электрического заряда в постоянных электрических и магнитных полях**

**Цель работы:** освоить моделирование движения заряженной частицы при совместном действии постоянных электрического и магнитного полей, построить траектории для скрещенных и параллельных полей, исследовать влияние соотношения начальной скорости и параметров поля.

### **Исходные условия работы**

К магнитной части силы Лоренца добавляется электрическая составляющая. Уравнение движения имеет вид  $m \, dv/dt = q(E + v \times B)$ . Для скрещенных полей задается  $E = (0, E_y, 0)$ ,  $B = (0, 0, B_z)$ . Для параллельных полей задается  $E = (0, 0, E_z)$ ,  $B = (0, 0, B_z)$ .

#### Задание на лабораторную работу

1. Задать начальные координаты и скорости заряда.
2. Задать постоянное электрическое поле.
3. Задать постоянное магнитное поле.
4. Составить функцию правых частей системы дифференциальных уравнений.
5. Выполнить численное интегрирование.
6. Построить траекторию движения заряда.
7. Построить проекции траектории.
8. Рассмотреть случай скрещенных полей.
9. Рассмотреть случай параллельных полей.
10. Сравнить характер движения в двух случаях.
11. Исследовать влияние величины электрического поля на траекторию.
12. Проверить, как изменяется скорость частицы во времени.

#### Методика выполнения работы

Создается функция правых частей системы уравнений движения с учетом электрического и магнитного полей:

```
function f = LorenzForceEB(t,z)
```

```
global E B
```

```
f = zeros(6,1);
```

```
f(1) = z(2);
```

```
f(3) = z(4);
```

```
f(5) = z(6);
```

```
vx = z(2);
```

```
vy = z(4);
```

```
vz = z(6);
```

```
f(2) = E(1) + vy*B(3) - vz*B(2);
```

```
f(4) = E(2) + vz*B(1) - vx*B(3);
```

```
f(6) = E(3) + vx*B(2) - vy*B(1);
```

```
end
```

Для скрещенных полей задаются следующие параметры:

```
global E B
```

```
E = [0 0.05 0];
```

```
B = [0 0 1];
```

```
x0 = 0;
```

```
y0 = 0;
```

```
z0 = 0;
```

```
vx0 = 0.1;
```

```
vy0 = 0;
```

```
vz0 = 0;
```

Выполняется расчет:

```
[t,R] = ode45('LorenzForceEB',[0:10/1024:10],[x0 vx0 y0 vy0 z0 vz0]);
```

Строится траектория:

```
plot3(R(:,1),R(:,3),R(:,5));
```

```
grid on;
```

```
axis square;
```

Строятся зависимости координат и скоростей от времени:

```
figure;
```

```
plot(t,R(:,1),t,R(:,3),t,R(:,5));
```

```
legend('x(t)','y(t)','z(t)');
```

```
grid on;
```

```
figure;
```

```
plot(t,R(:,2),t,R(:,4),t,R(:,6));
```

```
legend('vx(t)','vy(t)','vz(t)');
```

```
grid on;
```

После этого обучающийся меняет величину электрического поля и сравнивает траектории:

```
E = [0 0.02 0];
```

```
E = [0 0.05 0];
```

```
E = [0 0.10 0];
```

Затем задается случай параллельных полей:

```
E = [0 0 0.05];
```

```
B = [0 0 1];
```

Расчет повторяется. В отчете необходимо показать, что в параллельных полях электрическое поле изменяет продольную скорость частицы, а магнитное поле определяет вращательное движение в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.

В Python аналогичный расчет можно выполнить следующим образом:

```
import numpy as np
```

```
from scipy.integrate import solve_ivp
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
E = np.array([0, 0.05, 0])
```

```
B = np.array([0, 0, 1])
```

```
def rhs(t, z):
```

```
    x, vx, y, vy, zz, vz = z
```

```
    v = np.array([vx, vy, vz])
```

```
    a = E + np.cross(v, B)
```

```
    return [vx, a[0], vy, a[1], vz, a[2]]
```

```
z0 = [0, 0.1, 0, 0, 0, 0]
```

```
t_eval = np.linspace(0, 10, 1024)
```

```
sol = solve_ivp(rhs, [0, 10], z0, t_eval=t_eval)
```

```
x = sol.y[0]
```

```
y = sol.y[2]
```

```
z = sol.y[4]
```

```
ax = plt.figure().add_subplot(projection='3d')
```

```
ax.plot(x, y, z)
```

```
plt.show()
```

**Требования к результатам**

В отчете должны быть представлены начальные условия, значения электрического и магнитного полей, функция правых частей, команда численного интегрирования, траектории для скрещенных и параллельных полей, графики координат и скоростей от времени, сравнение влияния разных значений электрического поля, вывод о различии движения в магнитном поле и в совместном электрическом и магнитном поле.

Структура и форма отчета о лабораторной работе

Название учебного заведения

КАФЕДРА № \_\_

ОТЧЕТ  
ЗАЩИЩЕН С ОЦЕНКОЙ  
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень,  
звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

по курсу: Моделирование и оптимизация в электроэнергетике

РАБОТУ ВЫПОЛНИЛ  
СТУДЕНТ ГР. №

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Санкт-Петербург 20\_\_

## Содержание отчета

Цель работы: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Задачи:**

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

### Теоретические сведения

В отчете по лабораторной работе обязательно должны быть указаны теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторной работы, в том числе данные об установке, на которой выполнялась работа.

### Расчетно-графическая часть

В начале указываются исходные данные, расчеты, графические построения.

### Выводы

Отчет по лабораторной работе обязательно должен содержать выводы по лабораторной работе, в которой должны отражаться факты достижения цели.

### Список используемой литературы

Список используемой литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.100-2018 – Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

#### Требования к оформлению отчета о лабораторной работе

#### 1. Общие требования

1.1. В соответствии с ГОСТ 7.32-2017 – СИБИБД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления отчет по лабораторной работе оформляется любым печатным способом на одной стороне листа белой бумаги формата А4.

1.2. В отчете по лабораторной работе допускается интервал 1.0 и 1.5, кегль не менее 12, выравнивание по ширине, отступ красной строки 1.0.

1.3. Цвет шрифта должен быть черным.

#### 2. Нумерация страниц отчета

2.1. Страницы отчета следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту отчета. Номер страницы проставляется в низу каждого листа по центру.

2.2. Титульный лист включается в общую нумерацию страниц отчета. Номер страницы на титульном листе не проставляется.

### **3. Нумерация разделов и подразделов отчета**

3.1. Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего отчета, обозначенные арабскими цифрами.

3.2. Разделы могут быть разбиты на подразделы. Нумерация подразделов составляется из номера раздела и подраздела, обозначенного через точку, например, «1.1.». В конце названия разделов и подразделов точка не ставится.

### **4. Иллюстрации**

4.1. Иллюстрации подписываются снизу арабскими цифрами через пробел после слова «Рисунок» и имеют либо сквозную нумерацию, либо нумерацию в соответствии с разделами отчета.

4.2. Все иллюстрации (рисунки) должны иметь название, которое указывается после номера иллюстрации через тире, например, «Рисунок 1 – Структурная схема одноконтурной САР».

4.3. Подписи всех иллюстрации выравниваются по центру строки.

### **5. Графики**

5.1. Графики должны быть четкими. При оформлении графиков необходимо указывать обозначения координатных осей и самих графиков.

5.2. Если графики отражают сравнение двух экспериментов, рекомендуется их выполнение в одной системе координат.

### **6. Таблицы**

6.1. В отчете по лабораторной работе рекомендуется сквозная нумерация таблиц. Допускается нумерация таблиц в пределах раздела отчета. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

6.2. Таблицы нумеруются арабскими цифрами.

6.3. Нумерация таблиц производится со словом «Таблица» без знака «No», например, «Таблица 1».

6.5.4. Каждая таблица должна иметь название, которое следует помещать над таблицей слева без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире.

11.5 Методические указания для обучающихся по выполнению курсового проекта/ курсовой работы.

*Учебным планом не предусмотрено.*

#### 11.6 Методические указания для обучающихся по прохождению самостоятельной работы

В ходе выполнения самостоятельной работы, обучающийся выполняет работу по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

В процессе выполнения самостоятельной работы у обучающегося формируется целесообразное планирование рабочего времени, которое позволяет ему развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, помогает получить навыки повышения профессионального уровня.

Самостоятельная работа по дисциплине направлена на закрепление теоретических положений, связанных с компьютерным моделированием электрических и магнитных полей, численным решением уравнений Лапласа и Пуассона, а также моделированием движения электрических зарядов в постоянных электрических и магнитных полях. В процессе самостоятельной работы обучающийся изучает материалы лекций, повторяет основные расчетные соотношения, анализирует примеры построения вычислительных моделей, готовится к выполнению лабораторных работ и оформляет отчеты по результатам моделирования.

При самостоятельной подготовке обучающемуся рекомендуется обратить особое внимание на физический смысл моделируемых процессов, постановку расчетной задачи, выбор исходных данных, формирование расчетной сетки, задание начальных и граничных условий, построение графиков и интерпретацию полученных результатов. При выполнении заданий допускается использование MATLAB или Python с библиотеками численного расчета и визуализации.

Методическими материалами, направляющими самостоятельную работу обучающихся, являются:

- учебно-методический материал по дисциплине;
- материалы лекционных занятий;
- задания и методические указания к лабораторным работам;
- рекомендуемая учебная литература по компьютерному моделированию физических процессов;
- справочные материалы по использованию MATLAB и Python для численного моделирования;
- индивидуальные задания и консультации преподавателя.

Если методические указания по прохождению самостоятельной работы размещены в электронных ресурсах библиотеки ГУАП, системе LMS, на ресурсах кафедры или в иных электронных образовательных средах, обучающимся предоставляется соответствующая ссылка или URL-адрес. При отсутствии отдельного опубликованного издания самостоятельная работа выполняется на основании материалов дисциплины, выданных преподавателем.

#### 11.7 Методические указания для обучающихся по прохождению текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль успеваемости предусматривает контроль качества знаний обучающихся, осуществляемого в течение семестра с целью оценивания хода освоения дисциплины.

При наличии методических указаний по самостоятельной работе в изданном виде, в электронных ресурсах библиотеки ГУАП, системе LMS, на ресурсах кафедры или в иных электронных образовательных средах обучающимся предоставляется соответствующая ссылка или URL-адрес. При отсутствии отдельного опубликованного издания самостоятельная работа выполняется на основании материалов дисциплины, размещенных преподавателем в электронной образовательной среде, и заданий, выданных в ходе изучения дисциплины.

Результаты текущего контроля учитываются при проведении промежуточной аттестации. К промежуточной аттестации допускаются обучающиеся, выполнившие предусмотренные лабораторные работы, представившие и защитившие отчеты, а также выполнившие задания самостоятельной работы и текущего контроля в объеме, установленном преподавателем. При выставлении итоговой оценки учитываются результаты тестирования, качество выполнения лабораторных и расчетных работ, активность обучающегося в ходе занятий и уровень ответа на зачете / дифференцированном зачете.

11.8 Методические указания для обучающихся по прохождению промежуточной аттестации.

Промежуточная аттестация обучающихся предусматривает оценивание промежуточных и окончательных результатов обучения по дисциплине. Она включает в себя:

- дифференцированный зачет – это форма оценки знаний, полученных обучающимся при изучении дисциплины, при выполнении курсовых проектов, курсовых работ, научно-исследовательских работ и прохождении практик с аттестационной оценкой «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Промежуточная аттестация проводится в форме дифференциального зачета. Зачет проводится в устной форме по билетам в виде подготовки и изложения развёрнутого ответа. Время на подготовку ответа - 30 минут.



Лист внесения изменений в рабочую программу дисциплины

Дата внесения изменений и дополнений. Подпись внесшего изменения	Содержание изменений и дополнений	Дата и № протокола заседания кафедры	Подпись зав. кафедрой