Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

И. Е. Кажекин

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по выполнению контрольной работы для студентов магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

УДК 621.31

Рецензент
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
М. С. Харитонов

Кажекин, И. Е.

Теория электромагнитного поля: учеб.-методич. пособие по выполнению контр. работы для студ. магистратуры по направ. подгот. 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / **И. Е. Кажекин.** – Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 27 с.

Рассмотрены теоретические вопросы, а также предложены задания для самостоятельного выполнения по дисциплине «Теория электромагнитного поля». Приведены методические рекомендации по расчетам электромагнитного поля и использованию основных законов в приложении к практическим задачам.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль «Электроснабжение».

Рис. 20, табл. 15, список лит. – 4 наименования

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 30.06.2022 г., протокол № 06

УДК 621.31

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2022 г.
© Кажекин И. Е., 2022 г.

Содержание

Введение 4
Описание теоретической части 5
Задания для контрольной работы 6
Задача 1. Построение силовых линий векторного поля. 6
Задача 2. Исследование характера поля. 8
Задача 3. Электрическое поле пластин 10
Задача 4. Электрическое поле кабеля 12
Задача 5. Электрическое поле линии электропередачи 14
Задача 6. Исследование электрического поля трехжильного кабеля 19
Задача 7. Исследование растекания тока в грунте. 21
Критерии и нормы оценки контрольной работы 23
Список рекомендованных источников 24
Приложение А. Требования к оформлению титульного листа 25
Приложение Б. Требования к оформлению работы 26

Введение

Целью освоения дисциплины «Теория электромагнитного поля» является ознакомление обучающихся с фундаментальными основами процессов, протекающих в электрическом оборудовании.

Задачи изучения дисциплины:

- ознакомление обучающихся с основными методами расчета электромагнитных полей;
- планирование, проведение и оформление результатов исследований для решения практических и научных задач, связанных с распределением электромагнитных полей.

Контрольная работа включает сеть заданий по расчету электромагнитных полей, которые часто встречаются на практике и охватывают значительную часть вопросов, изучаемых в дисциплине. Их выполнение позволит в большей степени усвоить лекционный материал и подготовиться к зачету по «Теории электромагнитного поля».

Цель контрольной работы – освоение основных законов, используемых в теории электромагнитного поля.

Задачи контрольной работы:

- формирование математического аппарата, используемого при исследовании электромагнитных полей;
- изучение основных законов теории электромагнитного поля в применении их к решению практических задач.

После выполнения контрольной работы студент должен овладеть следующими результатами освоения дисциплины.

Знать: основные понятия теории электромагнитного поля и законы электрических и магнитных цепей.

Уметь:

- проводить расчеты электромагнитных величин;
- использовать основные понятия электромагнетизма и теории электрических цепей;
- составлять схемы для электромагнитных цепей;
- объяснять основные принципы физики для электроэнергетики.

Владеть:

- навыками анализа электромагнитных полей;
- навыками исследования электротехнических устройств с использованием понятий электромагнитного поля.

Контрольная работа подразумевает решение семи задач, позволяющее достичь указанные выше результаты.

Описание теоретической части

Электромагнитное поле – это особый вид материи. Всякая электрически заряженная частица окружена электромагнитным полем, составляющим с ней единое целое. Однако электромагнитное поле может существовать и в свободном, отделенном от заряженных частиц, состоянии в виде фотонов или электромагнитных волн, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Электромагнитному полю свойственно непрерывное распределение в пространстве, но вместе с тем оно обнаруживает и дискретную структуру в виде квантов излучения (фотонов).

Электромагнитное поле характеризуется наличием магнитного и электрического полей, связанных непрерывным взаимным превращением. Эти поля представляют собой две стороны единого электромагнитного поля, различные его проявления. Деление объективно существующего (независимо от наших наблюдений) электромагнитного поля на две его составляющие: поле электрическое и поле магнитное – относительно, т.е. зависит от условий, при которых осуществляется наблюдение электромагнитного поля с помощью тех или иных устройств.

Для решения поставленных в расчетно-графической работе задач студенту потребуется изучение следующих основных моментов в теории электромагнитного поля:

- Теорема Гаусса (постулат Максвелла).
- Принцип непрерывности линий магнитной индукции
- Закон полного тока
- Закон электромагнитной индукции
- Теорема Умова–Пойнтинга
- Уравнения Максвелла для электростатического поля.
- Принцип наложения
- Уравнения Пуассона и Лапласа
- Граничные условия в электростатическом поле
- Группы формул Максвелла
- Аналогии с электростатическим полем.

Подробно изучить эти и другие вопросы, связанные с анализом электромагнитных полей в различных условиях, можно при помощи литературы, приведенной в списке рекомендованных источников.

Задания для контрольной работы

Задача 1. Построение силовых линий векторного поля.

Постановка задачи: Найти силовые линии векторного поля, описываемого заданной функцией (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Варианты заданий для задачи 1.

Номер варианта	Функция
1	$\overline{F} = x\overline{i} + y\overline{j} - 3z^2\overline{k}$
2	$\overline{F} = xy\overline{i} + y\overline{j} - 3z^2\overline{k}$
3	$\overline{F} = xz\overline{i} + y\overline{j} - 3z^2\overline{k}$
4	$\overline{F} = x\overline{i} + xy\overline{j} - 3z^2\overline{k}$
5	$\overline{F} = x\overline{i} + zy\overline{j} - 3z^2\overline{k}$
6	$\overline{F} = x\overline{i} + y\overline{j} - 3xz^2\overline{k}$
7	$\overline{F} = x\overline{i} + y\overline{j} - 3yz^2\overline{k}$
8	$\overline{F} = x\overline{i} + y\overline{j} - z^2\overline{k}$
9	$\overline{F} = x\overline{i} + y^2\overline{j} - z^2\overline{k}$
10	$\overline{F} = x^2\overline{i} + y^2\overline{j} - z^2\overline{k}$
11	$\overline{F} = x^3\overline{i} + y^3\overline{j} - z^3\overline{k}$
12	$\overline{F} = x^3\overline{i} + y^2\overline{j} - z^2\overline{k}$
13	$\overline{F} = x^2\overline{i} + 3\overline{j} - z^2\overline{k}$
14	$\overline{F} = x^2\overline{i} + y^3\overline{j} - z^2\overline{k}$
15	$\overline{F} = x^2\overline{i} + y^2\overline{j} - z^3\overline{k}$
16	$\overline{F} = x^4\overline{i} + y^2\overline{j} - z^2\overline{k}$
17	$\overline{F} = x^2\overline{i} + y^{-1}\overline{j} - z^2\overline{k}$
18	$\overline{F} = x^2\overline{i} + y^{-2}\overline{j} - z^2\overline{k}$
19	$\overline{F} = x^{-2}\overline{i} + y^2\overline{j} - z^2\overline{k}$
20	$\overline{F} = x^2\overline{i} + y^2\overline{j} - z^{-2}\overline{k}$

Алгоритм решения задачи для функции $\overline{F} = x\overline{l} - 3z^2\overline{k}$

Решение: в данной задаче $Q = 0$, поэтому решаем систему:

$$\begin{matrix} dy = 0 \\ \dfrac{dx}{P} = \dfrac{dz}{R} \end{matrix} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} dy = 0 \\ \dfrac{dx}{x} = \dfrac{dz}{-3z^2} \end{cases} \tag{1.1}$$

$$\int dy = \int 0 \tag{1.2}$$

$y = C_1$ $(C_1 = const)$

$-$ семейство плоскостей, параллельных координатной плоскости XOZ

$$\frac{dx}{x} = \frac{dz}{-3z^2} \quad \rightarrow \quad \int \frac{dx}{x} = -\frac{1}{3} \cdot \int \frac{dz}{z^2} \tag{1.3}$$

$$\int \frac{dz}{z^2} = -3 \cdot \int \frac{dx}{x} \quad \rightarrow \quad \frac{-1}{z} = -\frac{1}{3} \cdot (ln|x| + ln|C_2|) \tag{1.4}$$

$$z = \frac{3}{\ln(xC_2)} \tag{1.5}$$

Ответ: искомое множество векторных линий:

$$\begin{cases} y = C_1 \\ z = \dfrac{3}{\ln(xC_2)} \end{cases}, \text{где } C_1, C_2 - const \tag{1.6}$$

Задача 2. Исследование характера поля.

Постановка задачи: Определить, является ли заданное поле потенциальным, если да, то найти его потенциалы. Варианты заданий приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты заданий для задачи 2.

Номер варианта	Функция
1	$\overline{F} = x\overline{\imath} + (xyz)\overline{\jmath} - 3zy^2\overline{k}$
2	$\overline{F} = xy\overline{\imath} + y\overline{\jmath} - 3z^2\overline{k}$
3	$\overline{F} = xz\overline{\imath} + xyz\overline{\jmath} - 3z^2\overline{k}$
4	$\overline{F} = (x + xz)\overline{\imath} + xy\overline{\jmath} + zy^2\overline{k}$
5	$\overline{F} = (x - xz)\overline{\imath} + zy\overline{\jmath} - 3z^2\overline{k}$
6	$\overline{F} = x\overline{\imath} + y\overline{\jmath} - 3xz^2\overline{k}$
7	$\overline{F} = x\overline{\imath} + y\overline{\jmath} - 3yz^2\overline{k}$
8	$\overline{F} = (y + xz)\overline{\imath} + y\overline{\jmath} + z^2\overline{k}$
9	$\overline{F} = x\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} - z^2\overline{k}$
10	$\overline{F} = x^2\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} + z^2\overline{k}$
11	$\overline{F} = x^3\overline{\imath} - y^3\overline{\jmath} - z^3\overline{k}$
12	$\overline{F} = x^3\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} + zxy^2\overline{k}$
13	$\overline{F} = (x + z)^2\overline{\imath} + 3xy\overline{\jmath} + z^2\overline{k}$
14	$\overline{F} = x^2\overline{\imath} + xy^3\overline{\jmath} - z^2\overline{k}$
15	$\overline{F} = x^2\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} - z^3\overline{k}$
16	$\overline{F} = x^4\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} - y^2z^2\overline{k}$
17	$\overline{F} = x(x + xz)^2\overline{\imath} + y^{-1}\overline{\jmath} - z^2\overline{k}$
18	$\overline{F} = x^2\overline{\imath} + xzy^{-2}\overline{\jmath} - z^2\overline{k}$
19	$\overline{F} = x^{-2}\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} - z^2\overline{k}$
20	$\overline{F} = x^2\overline{\imath} + y^2\overline{\jmath} - z^{-2}\overline{k}$

Алгоритм решения задачи для функции $\overline{F} = x\overline{\imath} + (x + xz)\overline{\jmath} - 3zy^2\overline{k}$

Векторное поле $\overline{F}(x; y; z) = P(x; y; z)\overline{\imath} + Q(x; y; z)\overline{\jmath} + R(x; y; z)\overline{k}$ является потенциальным, если оно представляет собой поле градиентов некоторого скалярного поля $u = u(x; y; z)$. Функцию $u = u(x; y; z)$ называют потенциальной функцией или просто потенциалом. В любой точке потенциального поля $\overline{F}$ его ротор равен нулю: $rot\overline{F} = 0$, а точнее, нулевому вектору. Потенциальное поле также называют безвихревым полем.

Найдём роторную функцию или, как чаще говорят – ротор данного поля:

$$rot\bar{F} = (\frac{dR}{dy} - \frac{dQ}{dz})\bar{\imath} + \left(\frac{dP}{dz} - \frac{dR}{dx}\right)\bar{\jmath} + \left(\frac{dQ}{dx} - \frac{dP}{dy}\right)\bar{k} \quad (2.1)$$

Для удобства выпишем компоненты поля:

$$P = x; Q = x + xz; R = -3zy^2 \quad (2.2)$$

Начнём находить их частные производные – их удобно «перебирать» в «роторном» порядке, слева направо:

$$\frac{dR}{dy} = -3z \cdot 2y \qquad \frac{dQ}{dz} = x$$
$$\frac{dP}{dz} = 0 \qquad \frac{dR}{dx} = 0 \quad (2.3)$$
$$\frac{dQ}{dx} = 1 + z \qquad \frac{dP}{dy} = 0$$

Таким образом: $rot\bar{F} \neq 0$, следовательно, поле $\bar{F}$ не потенциально.

Задача 3. Электрическое поле пластин

Постановка задачи: Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\boldsymbol{\sigma_1}$ **и** $\boldsymbol{\sigma_2}$ (Рисунок 3.1). Определить напряженность E поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам. Варианты заданий приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты заданий для задачи 3.

Номер варианта	σ_1, нКл/м^2	σ_2, нКл/м^2
1	1	3
2	1	4
3	2	5
4	2	6
5	2	3
6	3	4
7	3	5
8	3	6
9	3	7
10	4	4.5
11	4	5
12	4	6
13	4	7
14	4	8
15	5	5.5
16	5	6
17	5	7
18	5	8
19	5	9
20	5	10

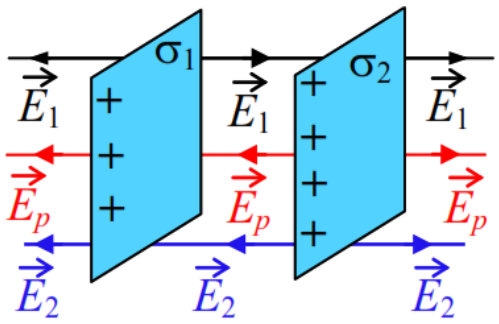

Рисунок 3.1 – Электрическое поле, созданное двумя параллельными пластинами

Алгоритм выполнения расчетов

Напряжённость электростатического поля из теоремы Остроградского-Гаусса:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \tag{3.1}$$

где σ – поверхностная плотность заряда; ε_0 = 8,856·10^{-12} Ф/м – электрическая постоянная.

1) Напряжённость поля слева от пластин:

$$E_I = \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} \tag{3.2}$$

2) Напряжённость поля справа от пластин:

$$E_{II} = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} \tag{3.3}$$

3) Напряжённость поля между пластинами:

$$E_{III} = \left(\frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0}\right) \tag{3.4}$$

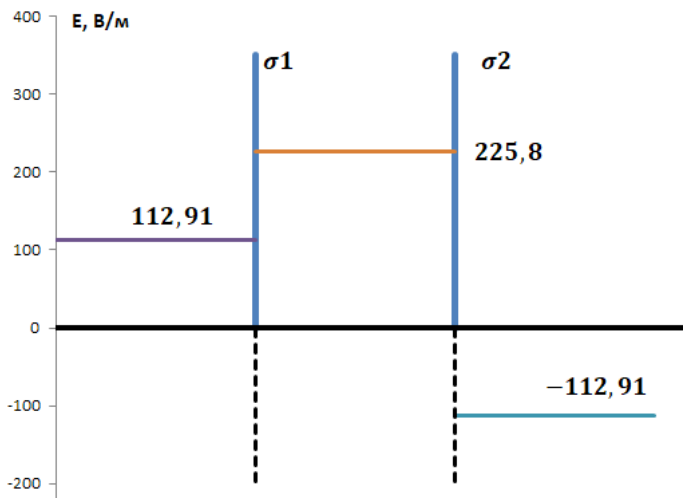

Рисунок 3.2. – Пример графика изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам

Задача 4. Электрическое поле кабеля

Постановка задачи: Два коаксиальных длинных цилиндра радиусами R_1 и R_2 заряжены разноименно с одинаковой поверхностной плотностью σ. Построить график зависимости напряженности электрического поля от расстояния до оси цилиндров.

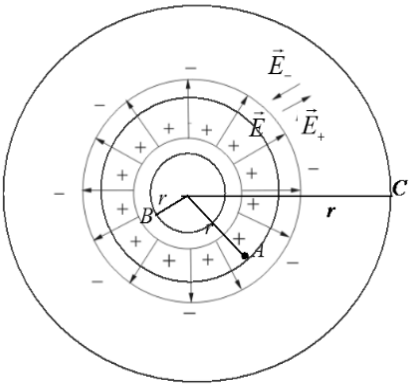

Рисунок 4.1 – Два цилиндра заряжены с одинаковой поверхностной плотностью

Варианты заданий приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Варианты для выполнения задания 4

№ варианта	σ, нКл/м2	R1, мм	R2, мм
1	1	3	8
2	2	5	6
3	3	5	7
4	5	1	2
5	6	2	3
6	8	3	5
7	9	5	6
8	7	5	8
9	8	6	9
10	10	9	10
11	2	3	8
12	3	5	6
13	5	5	7
14	6	1	2
15	8	2	3
16	3	3	5
17	5	5	6
18	6	5	8
19	8	3	9
20	9	5	10

Алгоритм выполнения расчетов

1) Напряжённость поля внутри цилиндров

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{4.1}$$

2) Напряжённость поля в точке А:

$$E = \frac{\sigma \cdot R_1}{R_2 \cdot \varepsilon_0} \tag{4.2}$$

3) Напряжённость поля в точке В:

$$E = \frac{\sigma(R_1 - R_2)}{R_2 \cdot \varepsilon_0} \tag{4.3}$$

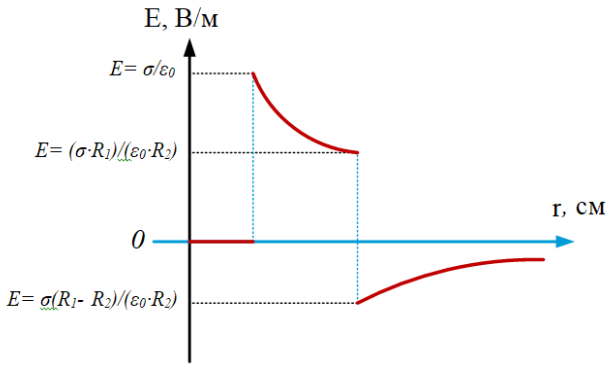

Рисунок 4.2 – Пример графика зависимости напряженности электрического поля от расстояния до оси цилиндров

Задача 5. Электрическое поле линии электропередачи

Постановка задачи: Двухпроводная линия находится в однородном поле грозовой тучи с напряженностью E_0, направленной вертикально, радиус проводов – r_0 (Рисунок 5.1).

1) Рассчитать и построить распределение потенциала вдоль оси y при $x = 0$.
2) Рассчитать и построить распределение плотности заряда σ на поверхности земли.
3) Определить частичные ёмкости проводов.

Варианты заданий приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Варианты задания для задачи 5.

Вариант задания	Напряжение U, кВ	Напряженность грозового облака E0, кВ/м	Высота линии h, м	Расстояние между линиями d, м	Радиус провода r0, мм
1	10	2	0,5	0,2	6
2	6	3	0,6	0,3	7,5
3	10	4	0,7	0,4	1,59
4	15	5	0,8	0,5	2,55
5	20	6	0,9	0,6	3,98
6	35	7	1,0	0,7	5,57
7	6	8	2,0	0,8	7,96
8	10	9	2,1	0,9	11,15
9	15	10	2,2	1,0	15,13
10	20	1	2,3	0,9	1,59
11	35	2	2,4	0,8	2,55
12	6	3	2,5	0,7	3,98
13	10	4	2,6	0,6	5,57
14	15	5	2,7	0,5	7,96
15	20	6	2,8	0,4	11,15
16	35	7	2,9	0,3	15,13
17	6	8	3,0	0,2	1,59
18	10	9	2,9	0,1	2,55
19	15	10	2,8	0,2	3,98
20	35	11	2,7	0,3	5,57

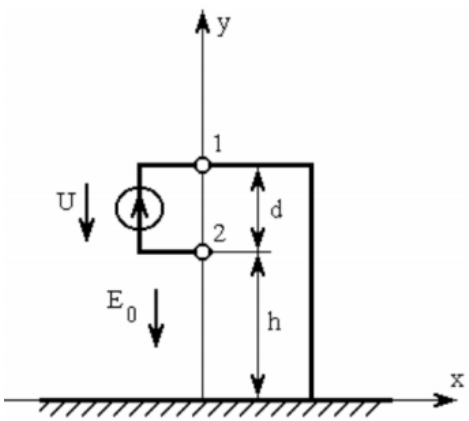

Рисунок 5.1 – Двухпроводная линия передачи
с заземлённым верхним проводом

Алгоритм выполнения расчетов

Два длинных тонких провода радиусом R протянуты параллельно поверхности Земли, расстояние между проводами d , высота подвеса h_1 и h_2 (Рисунок 5.2)

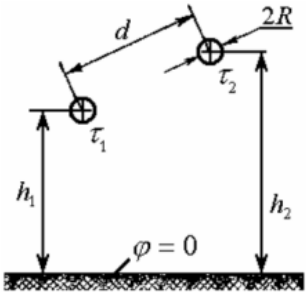

Рисунок 5.2 – Взаимное расположение линейных заряженных проводов относительно плоской проводящей поверхности (земли)

Потенциал первого провода определяется следующим образом:

$$\phi_1 = \frac{\tau_1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{2h_1}{R} + \frac{\tau_2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{D}{d} = a_{11}\,\tau_1 + a_{12}\tau_2 \tag{5.1}$$

$$= a_{11}\tau_1 + a_{12}\tau_2 + E_0(h+d)$$

Потенциал второго провода определяется следующим образом:

$$\phi_2 = \frac{\tau_1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{D}{d} + \frac{\tau_2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{2h_2}{R} = a_{21}\,\tau_1 + a_{22}\tau_2 \tag{5.2}$$

$$= a_{21}\tau_1 + a_{22}\tau_2 + E_0 h$$

где τ_1 и τ_2 – Потенциальные коэффициенты

Собственные потенциальные коэффициенты определяются следующим образом:

$$a_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{2h_1}{R};\ a_{22} = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{2h_2}{R} \tag{5.3}$$

Взаимные потенциальные коэффициенты определяются следующим образом:

$$a_{12} = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{D}{d} = a_{21} \tag{5.4}$$

Собственные потенциальные коэффициенты равны:

$$a_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{2(h+d)}{r_0} \tag{5.5}$$

$$a_{22} = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{2h}{r_0} \tag{5.6}$$

Взаимные потенциальные коэффициенты равны:

$$a_{12} = a_{21} = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{(2h+d)}{d} \tag{5.7}$$

Потенциальные коэффициенты определяются через систему:

$$\begin{cases} \phi_1 = a_{11}\tau_1 + a_{12}\tau_2 + E_0(h+d) \\ \phi_2 = a_{12}\tau_1 + a_{22}\tau_2 + E_0 h \end{cases} \tag{5.8}$$

Используя найденные линейные заряды проводов, сформируем окончательно потенциальную функцию в системе координат x–y:

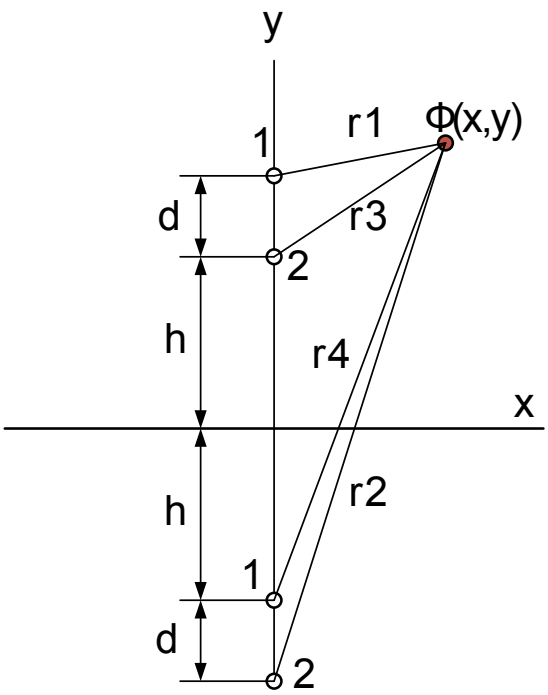

Рисунок 5.3 – Взаимное расположение линейных заряженных проводов на координатной плоскости

$$r_1{}^2 = x^2 + (y - (h + d))^2 \tag{5.9}$$
$$r_2{}^2 = x^2 + (y + (h + d))^2 \tag{5.10}$$
$$r_3{}^2 = x^2 + (y - h)^2 \tag{5.11}$$
$$r_4{}^2 = x^2 + (y + h)^2 \tag{5.12}$$
$$\phi(x, y) = \frac{\tau_1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{\tau_2}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_4}{r_3} + E_0 y =$$
$$\frac{\tau_1}{4\pi\varepsilon_0}\ln\frac{x^2 + (y + (h + d))^2}{x^2 + (y - (h + d))^2} + \frac{\tau_2}{4\pi\varepsilon_0}\ln\frac{x^2 + (y + h)^2}{x^2 + (y - h)^2} + E_0 y \tag{5.13}$$

Подставляя числовые значения, при условии x=0 получим распределение потенциала вдоль оси ***y*** (рисунок 5.4).

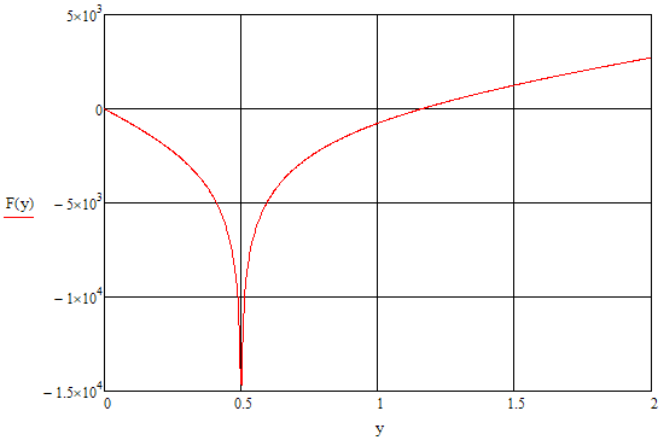

Рисунок 5.4 – Распределение потенциала вдоль оси *y* при *x* = 0

Распределение плотности заряда σ на поверхности земли определяется следующим образом:

$$\sigma = \mathrm{D}_n = \varepsilon_0 E_y(x, 0) = -\varepsilon_0 \frac{\partial\phi}{\partial y}(x, 0) \tag{5.14}$$

Сделав преобразования для выражения выше в системе MathCad и подставив значения, получим конечный результат (рисунок 5.5).

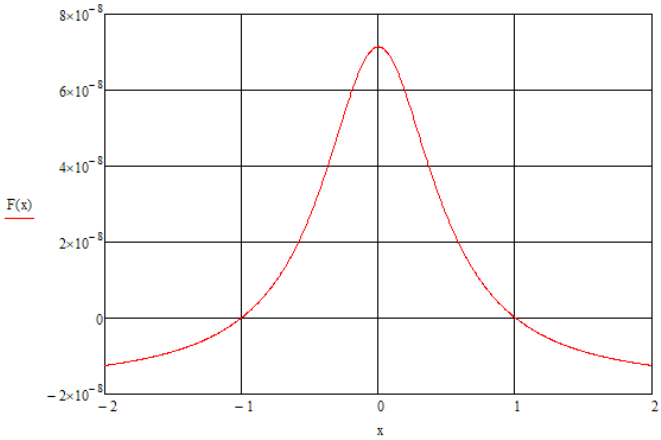

Рисунок 5.5 – Распределение плотности заряда σ на поверхности земли

Емкость относительно земли определяется следующим образом:

$$C_0 = \frac{\tau}{U} + \frac{\tau}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln(\frac{s+a}{R})} \quad (5.15)$$

Собственные емкостные коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$\beta_{11} = \frac{a_{22}}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}{}^2}; \ \beta_{22} = \frac{a_{11}}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}{}^2} \quad (5.16)$$

Взаимные емкостные коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$\beta_{12} = \frac{-a_{12}}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}{}^2}; \ \beta_{21} = \frac{-a_{21}}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}{}^2} \quad (5.17)$$

Емкость между первым проводом и землёй равна:

$$C_{11} = \beta_{11} + \beta_{12} \quad (5.18)$$

Емкость между вторым проводом и землёй равна:

$$C_{22} = \beta_{22} + \beta_{21} \quad (5.19)$$

Емкость между проводами:

$$C_{12} = C_{21} = -\beta_{21} = -\beta_{12} \quad (5.20)$$

Задача 6. Исследование электрического поля трехжильного кабеля

Постановка задачи: Известны частичные емкости трехжильного кабеля (Рисунок 6.1). $C_{11} = C_{22} = C_{33}$ и $C_{12} = C_{13} = C_{23}$. При испытании кабеля в лаборатории на жилы кабеля подавались потенциалы относительно земли $\varphi_1 = 0$ В, $\varphi_2 = 5000$ В и $\varphi_3 = -5000$ В. Оболочка кабеля не заземлена.

Найти потенциал оболочки ($\varphi_{об}$) и заряды на емкостях. Варианты заданий приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Варианты задания для задачи 6.

Вариант задания	C_{11}, мкФ/км	C_{12}, мкФ/км	φ_1, В	φ_2, В	φ_3, В
1	0,064	0,076	0	2000	-3000
2	0,263	0,365	0	5000	-5000
3	0,38	0,456	5000	0	0
4	0,543	0,563	1000	100	100
5	0,681	0,759	2000	6000	0
6	0,294	0,355	3000	-10000	0
7	0,531	0,648	100	100	0
8	0,387	0,41	200	0	0
9	0,208	0,561	380	0	-200
10	0,306	0,395	660	0	0
11	0,456	0,892	4000	3000	-3000
12	0,064	0,076	0	2000	-3000
13	0,263	0,365	0	5000	-5000
14	0,38	0,456	5000	0	0
15	0,543	0,563	1000	100	100
16	0,681	0,759	-3000	5000	0
17	0,294	0,355	-5000	1000	0
18	0,531	0,648	0	2000	0
19	0,387	0,41	100	3000	0
20	0,208	0,561	380	0	-200

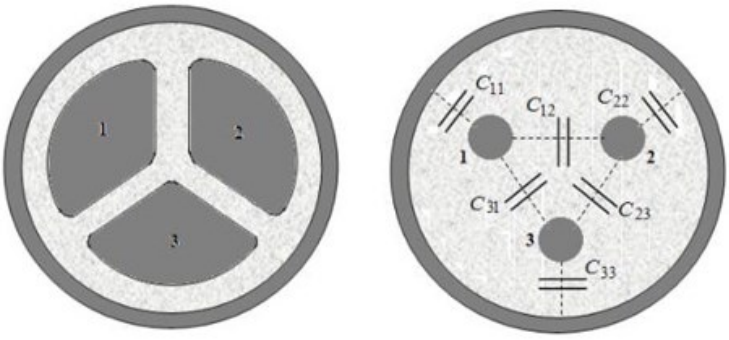

Рисунок 6.1 – Трёхжильный кабель

Алгоритм выполнения расчетов

По третьей группе формул Максвелла может быть записана система уравнений, в которой заряд каждого тела выражается не через потенциалы тел, а через разность потенциалов данного тела и других тел, в том числе и Земли:

$$\tau_1 = (\varphi_1 - \varphi_{\text{оболочки}}) \cdot C_{11} + (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot C_{12} + (\varphi_1 - \varphi_3) \cdot C_{13} \quad (6.1)$$

$$\tau_2 = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot C_{21} + (\varphi_2 - \varphi_{\text{оболочки}}) \cdot C_{22} + (\varphi_2 - \varphi_3) \cdot C_{23} \quad (6.2)$$

$$\tau_3 = (\varphi_3 - \varphi_1) \cdot C_{31} + (\varphi_3 - \varphi_2) \cdot C_{32} + (\varphi_3 - \varphi_{\text{оболочки}}) \cdot C_{33} \quad (6.3)$$

Коэффициенты называются частичными емкостями. Различают собственные C_{ii} и взаимные C_{ik} частичные ёмкости.

Зададимся четвертым уравнением:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0 \quad (6.4)$$

Решение системы из четырех уравнений позволяет найти все неизвестные величины.

Задача 7. Исследование растекания тока в грунте.

Постановка задачи: Полусферический заземлитель радиусом R_0 зарыт в землю (Рисунок 7.1). Постоянный ток, стекающий через заземлитель в грунт, равен I_0 . Грунт слева от плоскости AB имеет удельную проводимость y_1 , а справа – y_2, удельная проводимость воздуха $\gamma_0 = 0$. Расстояние от центра полусферы до плоскости AB равно h. Определить шаговое напряжение между точками a и b U_{ab}, находящимися на расстоянии $l_ш = 0.8$ м, если точка a удалена от плоскости AB на расстояние l_a при следующих условиях:

Варианты исходных данных для расчета приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Варианты для выполнения задания 7

№ варианта	R_0, м	I_0, А	γ_1, См/м	γ_2, См/м	h, м	l_a, м
1	0,1	1	0,001	0,3	2	0,5
2	0,2	2	0,002	0,4	3	0,7
3	0,3	3	0,003	0,5	4	0,9
4	0,4	4	0,004	0,6	5	1,1
5	0,5	5	0,005	0,7	6	1,3
6	0,6	6	0,006	0,8	7	1,5
7	0,7	7	0,007	0,9	8	1,7
8	0,6	8	0,005	0,9	9	1,8
9	0,5	7	0,005	0,5	10	1,7
10	0,4	6	0,008	0,6	11	1,6
11	0,15	1	0,001	0,3	2	0,5
12	0,25	2	0,002	0,4	3	0,7
13	0,35	3	0,003	0,5	3	0,9
14	0,45	4	0,004	0,6	4	1,1
15	0,55	5	0,002	0,7	5	1,3
16	0,65	3	0,003	0,8	6	1,5
17	0,75	4	0,004	0,9	7	1,7
18	0,65	5	0,005	0,9	8	1,8
19	0,55	6	0,006	0,5	10	1,7
20	0,45	7	0,007	0,6	11	1,6

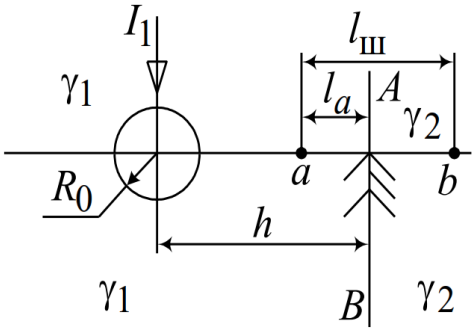

Рисунок 7.1 – Схема, поясняющая влияние электрода, расположенного в земле

Алгоритм выполнения расчетов

Фиктивный ток I_1, втекающий через заземлитель в землю, равен сумме токов I_{01} и I_{02} и записывается следующим образом:

$$I_1 = I_{01} + I_{02} = 2I_0 \tag{7.1}$$

Перейдя от задачи Сирла к более упрощенному виду (пренебрегая радиусом сферы влияния заземлителя) с однородной средой (Рисунок 7.2), получим следующее:

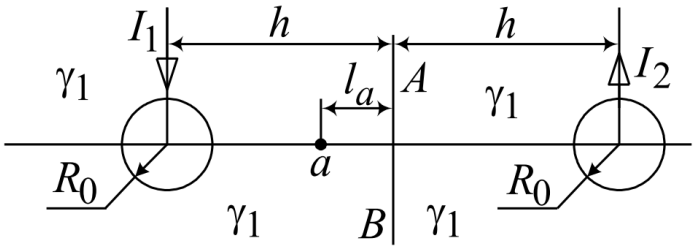

Рисунок 7.2 – Упрощённое изображение схемы растекания тока в земле

Найдём фиктивные токи I_2 и I_3, посредством удельных проводимостей двух сред, следующим образом:

$$I_2 = -\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot I_1 \tag{7.3}$$

$$I_3 = \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot I_1 \tag{7.4}$$

Шаговое напряжение между точками *а* и *б* (Рисунок 7.2) будет равно:

$$U_{\text{Ш}} = U_{ab} = \frac{I_1}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_1 \cdot (h - l_a)} + \frac{I_2}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_1 \cdot (h + l_a)} - \frac{I_3}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_2 \cdot (h + l_{\text{ш}} - l_a)} \tag{7.5}$$

Критерии и нормы оценки контрольной работы

Критерии оценивания различаются для расчетной части и устных ответов при защите работы. По результатам выполнения расчетной части и последующей защиты проекта выставляется оценка: «зачтено» или «не зачтено».

Оценка «зачтено» за выполнение расчетных заданий выставляется при следующих условиях:

- Методика и порядок расчета верные.
- Ошибки отсутствуют, либо имеются несущественные вычислительные ошибки.
- Имеются вычислительные ошибки, обусловленные невнимательностью при расчетах, которые не привели к существенному искажению результата.
- Имеются незначительные ошибки в методологии, ошибки в промежуточных расчетах или выборе коэффициентов, обусловленные неполным пониманием принципа расчета, при этом конечный результат имеет приемлемые отклонения.

Оценка «не зачтено» выставляется если при расчетах применена неверная методология, нарушен порядок расчета, имеется серьезная системная ошибка, обусловленные непониманием принципа расчета и приведшие к ошибочному результату.

Целью устной защиты является демонстрация понимания решаемых задач и самостоятельности при выполнении работы. Вопросы к устной защите контрольной работы ограничиваются описанием хода решения, а также интерпретацией полученных результатов и не выходят за рамки заданий. Оценка «зачтено» за устные ответы по работе выставляется при соблюдении следующих условий:

- Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект.
- В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации.
- В состоянии найти необходимую информацию для решения поставленной задачи.

Список рекомендованных источников

1. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учеб. / Л. А. Бессонов. - 11-е изд., перераб. и доп. - Москва: Юрайт, 2016. - 217 с.

2. Теоретические основы электротехники: т. 2.: учеб. / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. для самост. изуч. курса. - 575 с.

3. Теоретические основы электротехники: т. 3: учеб. / К. С. Демирчян [и др.]. - 4-е изд., доп. для самост. изуч. курса. - Санкт-Петербург: Питер, 2003.

4. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике : учеб. / А. Ф. Дьяков [и др.]: под ред. А. Ф. Дьякова. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: МЭИ, 2011. - 544 с.

Приложение А. Требования к оформлению титульного листа

Образец титульного листа

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства
Кафедра энергетики

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

по дисциплине «Теория электромагнитного поля»

направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Работу выполнил:
студенты гр. XX-ЭЭм
Иванов И.И.

Калининград
202X

Приложение Б. Требования к оформлению работы

Работа должна отражать основные результаты, полученные в ходе аналитического исследования, а также выводы о характере и причинах полученных зависимостей. Работа оформляется с использованием электронных вычислительных средств в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(рисунок 1)», «приведены в таблице 2». Подписи таблиц и рисунков выполняются по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание по середине без отступа). При подготовке рисунков и схем рекомендуется использовать редактор MS Visio. Построение диаграмм (графиков) рекомендуется выполнять посредством MS Excel, Mathcad или аналогичных программ.

Общие требования к оформлению документа:

- Шрифт Times New Roman, размер 12.
- Выравнивание текста по ширине
- Межстрочный интервал – 1,15
- Отступ первой строки абзаца – 1,25 см
- Выравнивание рисунков – по центру без отступа
- Выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа

Внедрение формул через редактор формул

Локальный электронный методический материал

Кажекин Илья Евгеньевич

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Редактор И. Голубева

Локальное электронное издание

Уч.-изд. л. 2,0. Печ. л. 1,7.

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»,
236022, Калининград, Советский проспект, 1