

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИДО
_____ С.И. Качин
«___» _____ 2008 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 3

Рабочая программа, методические указания и контрольные задания
для студентов специальностей 140211, 140205, 140203
Института дистанционного образования

| | |
|-------------------------------|-------|
| Семестр | 7 |
| Лекции, часов | 8 |
| Лабораторные занятия, часов | 6 |
| Практические занятия, часов | 2 |
| Самостоятельная работа, часов | 115 |
| Форма контроля | зачет |

УДК 621.3.011.1.

Теоретические основы электротехники (часть 3) : Рабочая программа, методические указания и контрольные задания для студентов ИДО /Сост. Г. В. Носов, – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 16 с.

Рабочая программа, методические указания и контрольные задания по 3 части теоретических основ электротехники рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры «Теоретические основы электротехники» 23 апреля 2008 г.

Зав.каф.ТОЭ, доцент, к.т.н. _____ Г.В.Носов

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Цель преподавания дисциплины

Курс «Теоретические основы электротехники», часть 3 является одной из базовых дисциплин, обеспечивающих общетеоретическую и профессиональную подготовку студентов специальностей 140211, 140205, 140203 электроэнергетического направления. Кроме того, задачей дисциплины является развитие творческих способностей и умения применять полученные знания для успешного решения инженерных проблем электроэнергетики.

В разделах дисциплины изучаются основные уравнения и методы расчета электромагнитных полей устройств электроэнергетики.

1.2. Цели и задачи дисциплины

Целями изучения дисциплины является обеспечение следующих требований ГОСа РФ для студента, который должен:

а) иметь представление о:

- электромагнитном экранировании, эффекте близости и поверхностном эффекте;
- задачах расчета электромагнитных полей устройств электроэнергетики;

б) знать:

- параметры электромагнитных полей;
- основные уравнения и граничные условия в электромагнитном поле;
- уравнения и методы расчета электростатических полей;
- уравнения и методы расчета электрических полей постоянного тока в проводящей среде;
- уравнения и методы расчета магнитных полей постоянного тока;

в) уметь:

- рассчитывать и анализировать электромагнитное поле;
- строить и анализировать картины электромагнитных полей.

Задачами изучения дисциплины является обеспечение указанных целей следующими средствами:

- а) самостоятельная работа с учебно-методической литературой;
- б) лекционные, практические и лабораторные занятия;
- в) выполнение контрольной работы.

1.3. База для изучения дисциплины

Теоретической базой для изучения 3 части курса «Теоретические основы электротехники» являются дисциплины «Высшая математика» (алгебраические и дифференциальные уравнения с частными производными, матрицы, векторная алгебра), «Физика» (электромагнетизм) и «Информатика».

2. Содержание теоретического раздела

Тема 1. Электростатическое поле.

Электростатическое поле как частный вид электромагнитного поля. Закон Кулона. Напряженность и потенциал. Энергия и емкость. Теорема Гаусса в дифференциальной и интегральной форме, уравнения Лапласа и Пуассона. Граничные условия. Электростатическое поле заряженных осей. Графическое изображение картины электростатического поля. Задачи расчета электростатического поля в электроэнергетике. Методы расчета электростатических полей: наложения, зеркальных изображений, применение теоремы Гаусса, интегрирование уравнений Лапласа и Пуассона. Группы формул Максвелла, потенциальные и емкостные коэффициенты (коэффициенты электростатической индукции), частичные емкости. Емкости двухпроводной и трехпроводной линий с учетом влияния поверхности земли.

Контрольные вопросы

1. Какое поле называется электростатическим?
2. Какие уравнения описывают электростатическое поле?
3. Каковы граничные условия в электростатическом поле?
4. Почему электростатическое поле называется потенциальным?
5. Когда целесообразно применять теорему Гаусса?
6. Когда целесообразно использовать уравнения Лапласа и Пуассона?
7. В чем сущность и когда применяется метод наложения?
8. В чем сущность и когда применяется метод зеркальных изображений?
9. Когда применяются потенциальные и емкостные коэффициенты, а также частичные емкости? Какие коэффициенты всегда отрицательны?
10. Как определяется электрическая емкость между двумя телами? Как влияет на емкость поверхность земли?
11. Как графически изображается картина электростатического поля?

Тема 2. Электрическое поле постоянного тока в проводящей среде.

Уравнения электрического поля постоянного тока в проводящей среде. Параметры электрического поля - плотность тока, напряженность, потенциал. Граничные условия. Аналогия между электрическим полем в проводящей среде и электростатическим полем. Электрическое поле токов утечки через несовершенную изоляцию. Электрическое поле токов

растекания в земле. Графическое изображение картины электрического поля постоянного тока в проводящей среде.

Контрольные вопросы

1. Какие уравнения описывают электрическое поле постоянного тока в проводящей среде?
2. Каковы граничные условия в электрическом поле постоянного тока?
3. В чем заключается аналогия между электрическим полем постоянного тока в проводящей среде и электростатическим полем?
4. Как определяются токи утечки?
5. В чем особенность применения метода зеркальных изображений при расчете заземления?
6. Как графически изображается картина электрического поля постоянного тока в проводящей среде?

Тема 3. Магнитное поле постоянного тока.

Магнитное поле как частный вид электромагнитного поля. Параметры и уравнения магнитного поля постоянного тока. Вихревое и потенциальное магнитное поле. Граничные условия. Скалярный и векторный потенциалы магнитного поля. Энергия магнитного поля.

Графическое изображение картины магнитного поля. Методы расчета магнитных полей: применение закона полного тока в интегральной и дифференциальной формах, методы наложения и зеркальных изображений, интегрирование уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала, интегрирование уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала. Расчеты магнитных потоков, индуктивностей и сил в магнитном поле. Магнитное поле и индуктивности двух- и трехпроводной линий. Магнитное поле и индуктивность коаксиального кабеля.

Контрольные вопросы

1. Какое поле называется магнитным?
2. Какие уравнения описывают магнитное поле постоянного тока?
3. Каковы граничные условия в магнитном поле постоянного тока?
4. Когда магнитное поле называется вихревым и потенциальным?
5. Когда целесообразно применять закон полного тока в интегральной форме?
6. В чем сущность и когда применяется метод наложения?
7. В чем сущность и когда применяется метод зеркальных изображений?
8. Когда используется скалярный магнитный потенциал?
9. Когда используется векторный магнитный потенциал?
10. Как определяются магнитный поток, индуктивность и энергия?
11. Как находятся силы, действующие на проводники с токами?
12. Как графически изображается картина магнитного поля?

Тема 4. Электромагнитное поле.

Параметры и уравнения электромагнитного поля. Волновой характер электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга. Электромагнитное экранирование, эффект близости и поверхностный эффект. Граничные условия в электромагнитном поле.

Контрольные вопросы

1. Какие уравнения описывают переменное электромагнитное поле?
2. Каковы граничные условия в переменном электромагнитном поле?
3. В чем проявляется волновой характер электромагнитного поля?
4. Что характеризует вектор Пойнтинга?
5. В чем заключается поверхностный эффект и эффект близости?
6. На чем основано и для чего применяется электромагнитное экранирование?
7. Для каких целей рассчитываются и анализируются электромагнитные поля в электроэнергетике?

3. Содержание практического раздела

3.1. Тематика практических занятий (2 часа)

1. Основные уравнения и методы расчета электростатических полей (1 час).
2. Основные уравнения и методы расчета электрического поля постоянного тока (0,5 часа).
3. Основные уравнения и методы расчета магнитных полей постоянного тока (1 час).

3.2. Перечень лабораторных работ(6 часов)

1. Исследование электростатического поля многопроводной линии (2 часа).
2. Определение частичных емкостей, потенциальных и емкостных коэффициентов (2 часа).
3. Исследование магнитного поля постоянного тока трехпроводной линии (2 часа).

4. Программа самостоятельной работы студентов (115 часа)

1. Изучение теоретического материала по темам 1-4 (50 часа).
2. Выполнение контрольной работы №5 (50 часов).
3. Теоретическая подготовка и оформление отчетов по лабораторным работам (15 часов).

5. Контрольная работа №5

5.1. Общие методические указания

Контрольная работа по расчету электромагнитного поля трехпроводной линии включает одну задачу, состоящую из 4-х пунктов. Контрольная работа выполняется в отдельной тетради с полями для замечаний преподавателя. Указывается номер варианта, условие и исходные данные. Решение должно сопровождаться подробными пояснениями. Рисунки с проводами линии и векторами \vec{E} , \vec{H} и \vec{P} выполняются аккуратно на отдельных страницах тетради в удобочитаемом масштабе. Расчет величин следует выполнять сначала в общем виде, а затем в полученные формулы необходимо подставить числовые значения и привести окончательные результаты с указанием единиц измерения.

Выбор варианта контрольной работы осуществляется следующим образом (шифр К - последние цифры номера зачетки студента):

а) трехзначный шифр К делится на 40 и берется ближайшее целое число;

б) двухзначный шифр К соответствует номеру варианта, но если $K > 25$, то берется вариант (К-25).

5.2. Условие и варианты контрольной работы

Трехпроводная линия (радиус проводов $R=0,02$ м), расположена в воздухе ($\epsilon_a = \epsilon_0$, $\mu_a = \mu_0$) параллельно проводящей плоскости (земли), как показано на рис.1. Координаты проводов, их потенциалы и токи заданы в табл.1.

1. Определить потенциальные и емкостные коэффициенты, частичные емкости, линейные плотности зарядов проводов, энергию электростатического поля на единицу длины,

а также для точки N (координаты x , y) рассчитать потенциал φ и вектор

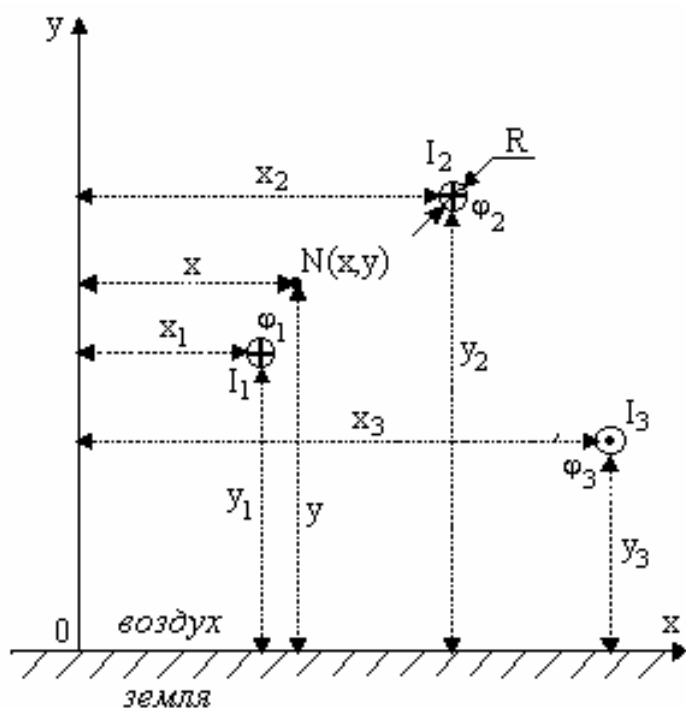


Рис.1

напряженности \vec{E} .

2. Полагая удельную проводимость воздуха равной $\gamma = 10^{-6}$ ($1/ \text{Ом} \cdot \text{м}$), определить токи утечки $I_{y_{1,2,3}}$ ($\text{А}/\text{м}$) с проводов линии и найти мощность активных потерь от этих токов ($\text{Вт}/\text{м}$).
3. Определить для магнитного поля энергию ($\text{Дж}/\text{м}$) и силу ($\text{Н}/\text{м}$), действующую на провод с током I_3 , а также для точки N рассчитать скалярный магнитный потенциал φ_M и вектор напряженности \vec{H} (токи I_1, I_2 текут «от нас», а ток I_3 - «к нам»).
4. Для точки N , используя найденные вектора \vec{E} и \vec{H} , определить вектор Пойнтинга $\vec{P} = \vec{E} * \vec{H}$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$) электромагнитного поля.

Таблица 1

| № вар | Потенциалы проводов | | | Токи в проводах | | | Координаты проводов | | | | | | Координаты точки N | |
|----------|------------------------|-------------|-------------|-----------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|
| | φ_1 | φ_2 | φ_3 | I_1 | I_2 | I_3 | x_1 | x_2 | x_3 | y_1 | y_2 | y_3 | x | y |
| | кВ | кВ | кВ | А | А | А | м | м | м | м | м | м | м | м |
| 1 | 1 | 3 | -4 | 100 | 300 | 400 | 1 | 2 | 8 | 5 | 1 | 8 | 4 | 7 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | -4 | 250 | 150 | 400 | 3 | 1 | 8 | 4 | 6 | 5 | 7 | 7 |
| 3 | 2.5 | 1.5 | -4 | 250 | 150 | 400 | 1 | 1 | 5 | 4 | 9 | 7 | 7 | 7 |
| 4 | 1 | 3 | -4 | 100 | 300 | 400 | 1 | 1 | 5 | 4 | 9 | 7 | 3 | 7 |
| 5 | 2 | 3 | -5 | 200 | 300 | 500 | 1 | 1 | 4 | 3 | 9 | 9 | 6 | 5 |
| 6 | 0.7 | 1.3 | -2 | 70 | 130 | 200 | 1 | 2 | 8 | 4 | 9 | 4 | 6 | 7 |
| 7 | 0.7 | 2.3 | -3 | 70 | 230 | 300 | 3 | 5 | 9 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 |
| 8 | 2.5 | 0.5 | -3 | 250 | 50 | 300 | 4 | 6 | 8 | 6 | 6 | 6 | 2 | 6 |
| 9 | 0.6 | 1.2 | -1.8 | 60 | 120 | 180 | 2 | 5 | 6 | 3 | 3 | 8 | 7 | 2 |
| 10 | 1.2 | 1 | -2.2 | 120 | 100 | 220 | 2 | 4 | 9 | 6 | 6 | 9 | 6 | 2 |
| 11 | 1 | 1 | -2 | 100 | 100 | 200 | 3 | 7 | 6 | 5 | 1 | 6 | 3 | 7 |
| 12 | 1 | 1 | -2 | 100 | 100 | 200 | 3 | 7 | 8 | 8 | 1 | 6 | 7 | 4 |
| 13 | 1.3 | 0.7 | 2 | 130 | 70 | 200 | 4 | 6 | 8 | 8 | 4 | 6 | 5 | 4 |
| 14 | 1.5 | 2 | -3.5 | 150 | 200 | 350 | 1 | 4 | 8 | 9 | 1 | 6 | 4 | 7 |
| 15 | 3 | 1 | -4 | 300 | 100 | 400 | 5 | 4 | 8 | 9 | 2 | 6 | 5 | 5 |
| 16 | 3 | 1 | -4 | 300 | 100 | 400 | 5 | 4 | 8 | 8 | 2 | 8 | 4 | 5 |
| 17 | 1 | 3 | 4 | 100 | 300 | 400 | 3 | 4 | 8 | 8 | 2 | 8 | 5 | 6 |
| 18 | 1.5 | 2.5 | -4 | 150 | 250 | 400 | 3 | 1 | 8 | 7 | 4 | 7 | 5 | 4 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19 | 1.5 | 2.5 | 4 | 150 | 250 | 400 | 4 | 3 | 8 | 8 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| 20 | 1 | 3 | 4 | 100 | 300 | 400 | 3 | 4 | 8 | 5 | 3 | 3 | 6 | 3 |
| 21 | 3 | 1 | 4 | 300 | 100 | 400 | 4 | 1 | 9 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| 22 | 2 | 2 | -4 | 200 | 200 | 400 | 2 | 2 | 8 | 2 | 9 | 5 | 3 | 5 |
| 23 | 1.3 | 2.7 | 0.6 | 130 | 270 | 400 | 6 | 6 | 1 | 9 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| 24 | 2.7 | 1.3 | -4 | 270 | 130 | 400 | 6 | 2 | 6 | 1 | 9 | 7 | 4 | 4 |
| 25 | 4 | 2 | -6 | 400 | 200 | 600 | 6 | 1 | 6 | 2 | 4 | 8 | 5 | 5 |

5.3. Методические указания к пункту 1 контрольной работы

Теоретический материал по расчету и анализу электростатического поля подробно изложен в [1]:19.1-19.49; [2]:26.1-27.12; [3]: 6.1-6.15, 7.1-7.7; [4]: с.14-26.

Для выполнения данного пункта краткие пояснения даны ниже.

Для трехпроводной линии, расположенной в воздухе параллельно поверхности земли справедливы группы формул Максвелла.

5.3.1. Первая группа формул:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 + \alpha_{13}\tau_3 \\ \varphi_2 &= \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2 + \alpha_{23}\tau_3, \\ \varphi_3 &= \alpha_{31}\tau_1 + \alpha_{32}\tau_2 + \alpha_{33}\tau_3 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_k}{R}\right)$, $\alpha_{km} = \alpha_{mk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{km}}{d_{km}}\right)$ - собственные и

взаимные потенциальные коэффициенты (м/Ф) соответственно, причем $k \neq m$;

$d_{km} = \sqrt{(x_k - x_m)^2 + (y_k - y_m)^2}$ - расстояние между k и m проводами (м);

$D_{km} = \sqrt{(x_k - x_m)^2 + (y_k + y_m)^2}$ - расстояния между k проводом и зеркальным изображением m провода (м);

x_k, y_k и x_m, y_m - координаты проводов; R - радиус проводов (м);

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - потенциалы проводов (В); $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;

τ_1, τ_2, τ_3 - линейные плотности зарядов проводов (Кл/м).

По заданным координатам проводов и известном $R=0.02$ м рассчитываются собственные α_{kk} и взаимные α_{km} потенциальные коэффициенты проводов линии.

5.3.2. Вторая группа формул:

$$\begin{cases} \tau_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3 \\ \tau_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3 \\ \tau_3 = \beta_{31}\varphi_1 + \beta_{32}\varphi_2 + \beta_{33}\varphi_3 \end{cases}, \quad (2)$$

где

$$\beta_{km} = (-1)^{(k+m)} \frac{\Delta_{km}}{\Delta} - \text{собственные } (k=m) \text{ и взаимные } (k \neq m)$$

емкостные коэффициенты (Φ/M);

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = \alpha_{11}\Delta_{11} - \alpha_{12}\Delta_{12} + \alpha_{13}\Delta_{13}$$

-определитель системы уравнений (1);

Δ_{km} - минор, образованный вычеркиванием k строки и m столбца определителя Δ , например:

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = \alpha_{21}\alpha_{33} - \alpha_{31}\alpha_{23}.$$

По предварительно полученным потенциальным коэффициентам рассчитываются собственные и взаимные емкостные коэффициенты.

Затем по формулам (2) находятся линейные плотности зарядов проводов τ_1, τ_2, τ_3 .

5.3.3. Третья группа формул:

$$\begin{cases} \tau_1 = C_{11}\varphi_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{13}(\varphi_1 - \varphi_3) \\ \tau_2 = C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}\varphi_2 + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) \\ \tau_3 = C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + C_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + C_{33}\varphi_3 \end{cases}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} C_{11} &= \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13}, \\ C_{22} &= \beta_{22} + \beta_{21} + \beta_{23}, \\ C_{33} &= \beta_{33} + \beta_{31} + \beta_{32} \end{aligned}$$

- собственные частичные емкости (Φ/M);

$C_{km} = -\beta_{km}$ - взаимные частичные емкости при $k \neq m$ (Φ/M).

По предварительно найденным емкостным коэффициентам определяются частичные емкости. Далее необходимо сделать проверку правильности расчета линейных плотностей зарядов проводов и их коэффициентов. Для этого в систему (1) подставляются найденные величины

$(\tau_k, \alpha_{kk}, \alpha_{km})$ и определяются потенциалы проводов φ_k , которые сравниваются с заданными значениями.

Энергию электростатического поля на единицу длины линии ($\frac{\text{Джс}}{\text{м}}$) можно рассчитать по формуле:

$$W_э = \frac{1}{2}(\tau_1\varphi_1 + \tau_2\varphi_2 + \tau_3\varphi_3).$$

Для точки N с заданными координатами x, y потенциал φ и вектор напряженности \vec{E} определяются методом наложения с учетом зеркальных изображений проводов линии:

$$\varphi = \sum_{k=1}^3 \varphi_k; \quad \vec{E} = \sum_{k=1}^3 \vec{E}_k + \sum_{k=1}^3 \vec{E}'_k,$$

где

$$\varphi_k = \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2^{(k)}}{r_1^{(k)}} - \text{составляющая потенциала, создаваемая зарядом } k$$

провода и его зеркальным изображением (B);

$r_1^{(k)} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ - расстояние от точки N до k провода (m);

$r_2^{(k)} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y + y_k)^2}$ - расстояние от точки N до зеркального изображения k провода (m);

$|\vec{E}_k| = \frac{|\tau_k|}{2\pi\epsilon_0 r_1^{(k)}}$ - модуль вектора напряженности ($\frac{B}{m}$), создаваемый зарядом k провода;

$|\vec{E}'_k| = \frac{|-\tau_k|}{2\pi\epsilon_0 r_2^{(k)}}$ - модуль вектора напряженности ($\frac{B}{m}$), создаваемый

зеркальным изображением заряда k провода.

Потенциал φ равен алгебраической сумме составляющих потенциала φ_k , причем числовые значения τ_k подставляются со своими знаками. Вектор напряженности \vec{E} необходимо определить графическим сложением векторов \vec{E}_k и \vec{E}'_k от всех зарядов и их зеркальных изображений, которые направлены вдоль радиусов $r_1^{(k)}$ и $r_2^{(k)}$ соответственно, причем при $\tau_k > 0$ вектор \vec{E}_k направлен от k провода и вектор \vec{E}'_k направлен к зеркальному изображению провода, а при $\tau_k < 0$ направления векторов \vec{E}_k и \vec{E}'_k меняются на противоположные.

5.4. Методические указания к пункту 2 контрольной работы

Теоретический материал по расчету и анализу электрического поля постоянного тока в проводящей среде подробно изложен в: [1]:20.1-20.11; [2]:28.1-28.6; [3]:8.1-8.7; [4]: с. 26-39.

Для выполнения данного пункта краткие пояснения даны ниже.

Используя аналогию между электростатическим полем и электрическим постоянным тока, для токов утечки с проводов линии $I_{y1,2,3}$ через несовершенную изоляцию (воздух) можно записать следующую группу уравнений:

$$\begin{cases} I_{y1} = G_{11}\varphi_1 + G_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + G_{13}(\varphi_1 - \varphi_3) \\ I_{y2} = G_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + G_{22}\varphi_2 + G_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) \\ I_{y3} = G_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + G_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + G_{33}\varphi_3 \end{cases}, \quad (4)$$

где $G_{km} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0} C_{km}$ - собственные ($k=m$) и взаимные ($k \neq m$) проводимости изоляции проводов ($1/\text{Ом} \cdot \text{м}$); C_{km} - частичные емкости из п.1 контрольной работы.

После определения собственных и взаимных проводимостей G_{km} по уравнениям (4) рассчитываются токи утечки $I_{y1,2,3}$. Для проверки токи утечки определяются как $I_{yk} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0} \tau_k$, где τ_k - линейные плотности зарядов проводов из п.1.

Мощность активных потерь от токов утечки (Вт/м) находится следующим образом:

$$P_y = G_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + G_{13}(\varphi_1 - \varphi_3)^2 + G_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)^2 + G_{11}\varphi_1^2 + G_{22}\varphi_2^2 + G_{33}\varphi_3^2,$$

где $\varphi_{1,2,3}$ - заданные потенциалы проводов линии.

Для проверки мощность активных потерь рассчитывается как

$$P_y = I_{y1}\varphi_1 + I_{y2}\varphi_2 + I_{y3}\varphi_3.$$

5.5. Методические указания к пункту 3 контрольной работы

Теоретический материал по расчету и анализу магнитного поля постоянного тока подробно изложен в: [1]: 21.1-21.28; [2]: 28.1-29.18; [3]: 9.1-10.9; [4]: с. 39-49.

Для выполнения данного пункта краткие пояснения даны ниже.

Для расчета магнитного поля используем метод наложения и закон полного тока. При этом вектор напряженности магнитного поля и скалярный магнитный потенциал в точке N будут равны

$$\vec{H} = \sum_{k=1}^3 \vec{H}_k; \quad \varphi_M = \sum_{k=1}^3 \varphi_{Mk},$$

где $H_k = \frac{I_k}{2\pi r_k}$ - модуль вектора напряженности от k провода с током

$$I_k \text{ (A/m)};$$

$r_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ - расстояние от точки N до k провода (м);

$\varphi_{Mk} = -\frac{I_k \alpha_k}{2\pi}$ - составляющая скалярного магнитного потенциала от тока

$$I_k \text{ (A)};$$

$\alpha_k = \pi - \beta_k$ - угол между осью x и радиусом r_k (радиан);

β_k - аргументы радиусов в комплексной форме (радиан):

$$\underline{r}_1 = (x - x_1) + (y - y_1)j = r_1 e^{j\beta_1},$$

$$\underline{r}_2 = (x - x_2) + (y - y_2)j = r_2 e^{j\beta_2},$$

$$\underline{r}_3 = (x_3 - x) + (y - y_3)j = r_3 e^{j\beta_3};$$

$j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица.

Скалярный магнитный потенциал φ_M равен алгебраической сумме составляющих потенциала φ_{Mk} , а вектор напряженности \vec{H} необходимо определить графическим сложением векторов \vec{H}_k , которые перпендикулярны радиусам r_k и связаны своим направлением с токами I_k правилом правоходового винта.

Для определения силы F (H/m), действующей на провод с током I_3 , необходимо определить напряженность на оси этого провода

$$\vec{H}_{33} = \vec{H}_{13} + \vec{H}_{23},$$

где $H_{13} = \frac{I_1}{2\pi d_{13}}$; $H_{23} = \frac{I_2}{2\pi d_{23}}$ - модули напряженностей от токов 1 и

2 проводов; d_{13}, d_{23} - аналогично п.1 контрольной работы; а затем нужно использовать закон Ампера:

$$F = \mu_0 I_3 H_{33},$$

причем вектор силы \vec{F} будет перпендикулярен вектору \vec{H}_{33} и направлен согласно правилу левой руки ($\mu_0 = 12.56 \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Так как для рассматриваемой трехпроводной линии заданные постоянные токи проводов I_1 и I_2 протекают «от нас», а ток $I_3 = I_1 + I_2$ течет «к нам», то такую линию можно рассматривать как две двухпроводные линии с токами I_1 и I_2 , у которых два провода совпадают друг с другом и в них течет суммарный ток I_3 .

Для определения энергии магнитного поля находим собственные и взаимные индуктивности.

1. Собственные индуктивности двухпроводных линий на единицу длины ($\Gamma_{H/M}$):

$$L_{11} = \Phi_{11}/I_1 = \frac{1}{I_1} \int_R^{d_{13}} 2\mu_0 H_1 dr = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d_{13}}{R},$$

$$L_{22} = \Phi_{22}/I_2 = \frac{1}{I_2} \int_R^{d_{23}} 2\mu_0 H_2 dr = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d_{23}}{R}.$$

2. Взаимные индуктивности двухпроводных линий ($\Gamma_{H/M}$)

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\Phi_{12}}{I_2} = \frac{1}{I_2} \left[\int_R^{d_{13}} \mu_0 H_2 dr + \int_{d_{12}}^{d_{23}} \mu_0 H_2 dr \right] = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_{13} d_{23}}{R d_{12}},$$

где $H_1 = \frac{I_1}{2\pi r}$, $H_2 = \frac{I_2}{2\pi r}$ - расчетные составляющие напряженностей;

d_{12}, d_{13}, d_{23} - аналогично п.1 контрольной работы.

В результате энергия, запасаемая в магнитном поле на единицу длины ($\frac{Дж}{м}$), составит

$$W_m = \frac{L_{11} I_1^2}{2} + \frac{L_{22} I_2^2}{2} + M_{12} I_1 I_2.$$

5.6. Методические указания к пункту 4 контрольной работы

Теоретический материал по определению вектора Пойнтинга электромагнитного поля изложен в [1]: 22.6, 22.7; [2]: 25.8, 31.2.

Для выполнения данного пункта краткие пояснения даны ниже.

Вектор Пойнтинга \vec{P} , как мощность потока энергии на единицу площади ($\frac{Вт}{м^2}$), перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы \vec{E}, \vec{H} и образует с ними правовинтовую систему: \vec{E} вращается к \vec{H} по кратчайшему пути и направление вектора \vec{P} связано с вращением \vec{E} правилом правоходового винта («буравчика»).

Вектора \vec{E}, \vec{H} в точке N по величине и направлению найдены в п. 1 и 3, поэтому эти вектора нужно построить каждый в своем масштабе. Затем перпендикулярно их плоскости согласно правилу «буравчика» направляется вектор Пойнтинга \vec{P} , причем его модуль рассчитывается так

$$P = E \cdot H \cdot \sin \alpha,$$

где α - наименьший угол между \vec{E} и \vec{H} ;
 E, H – модули векторов.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М. : Высшая школа, 1978. - 231 с.
2. Теоретические основы электротехники. Т.2. Нелинейные цепи и основы электромагнитного поля / Под ред. П. А. Ионкин. – М.: Высшая школа, 1976. - 383 с.
3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. – Л.: Энергия, 1975. – 408 с.
4. Носов Г. В., Канев Ф. Ю., Макенова Н. А. Лабораторный практикум по исследованию длинных линий и электромагнитного поля на ЭВМ (компьютерные лабораторные работы). – Томск: изд. ГПУ, 2001. – 56 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
часть 3

Рабочая программа, методические указания
и контрольные задания

Составитель: Геннадий Васильевич Носов

Рецензент: Владислав Дмитриевич Эськов, к.т.н., доцент каф. ТОЭ ЭЛТИ

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага ксероксная

Плоская печать. Усл. печ. л. . Уч. - изд. л. .

Тираж 300 экз. Заказ № . Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.94.

Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.