

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДО

\_\_\_\_\_ С.И. Качин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2008г.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ЧАСТЬ 3

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

Семестр	6	7
Лекции, часов	4	8
Лабораторные занятия, часов		6
Практические занятия, часов		2
Контрольная работа		1
Самостоятельная работа, часов		106
Форма контроля		Зачет

УДК 621.3.011.1.

Теоретические основы электротехники. Часть 3: Раб. программа, метод. указ. и контр. задания для студентов специальностей 140203, 140205, 140211 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 “Теоретической и общей электротехники” 23 апреля 2008г.

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

# 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1. Цель преподавания дисциплины

Курс “Теоретические основы электротехники”, часть 3 является одной из базовых дисциплин, обеспечивающих общетеоретическую и профессиональную подготовку студентов специальностей 140203, 140205, 140211 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” (алгеб-

раические и дифференциальные уравнения с частными производными, матрицы, векторная алгебра), “Физика” (электромагнетизм) и “Информатика”.

#### **1.4. Программа самостоятельной работы студентов**

1. Изучение теоретического материала по темам 1- 4 (41 час).
2. Выполнение контрольной работы №5 (50 часов).
3. Теоретическая подготовка и оформление отчетов по лабораторным работам (15 часов).

## **2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **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 ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **3.1. Тематика практических занятий**

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

#### **3.2. Перечень лабораторных работ**

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

### **4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №5**

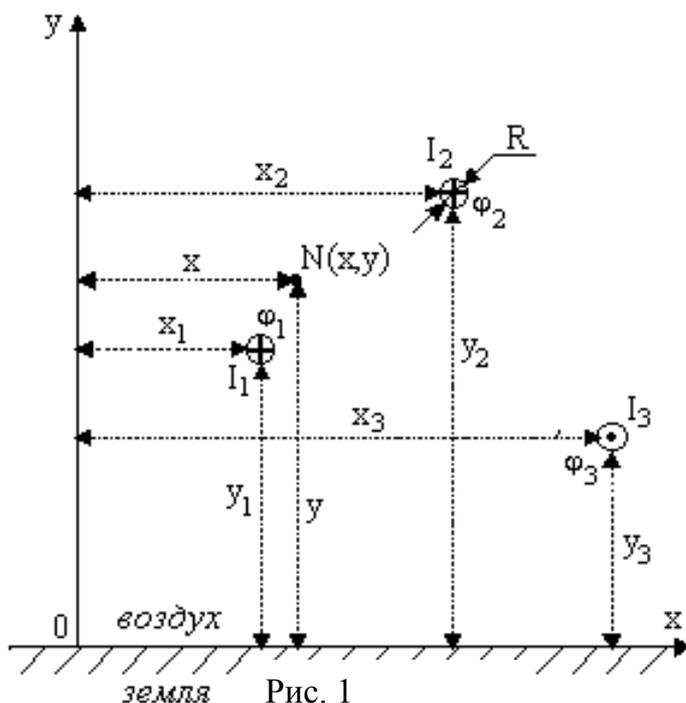
#### **4.1. Общие методические указания**

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  $\vec{I}$  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).

#### 4.2. 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  $\varphi$  и вектор напряженности  $\vec{E}$ .

2. Полагая удельную проводимость воздуха равной  $\gamma = 10^{-6}$  ( $1/Ом \cdot м$ ), определить токи утечки  $I_{y1,2,3}$  ( $А/м$ ) с проводов линии и найти мощность активных потерь от этих токов ( $Вт/м$ ).

3. Определить для магнитного поля энергию ( $Дж/м$ ) и силу ( $Н/м$ ), действующую на провод с током  $I_3$ , а также для точки  $N$  рассчитать скалярный магнитный потенциал  $\varphi_m$  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  $\vec{\Pi} = \vec{E} * \vec{H}$  ( $Вт/м^2$ ) электромагнитного поля.

Таблица 1

Варианты контрольной работы

№ вар	Потенциалы проводов			Токи в проводах			Координаты проводов						Координаты точки $N$	
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$x$	$y$
	$\kappa B$	$\kappa B$	$\kappa B$	$A$	$A$	$A$	$m$	$m$	$m$	$m$	$m$	$m$	$m$	$m$
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

### 4.3. 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.

#### 4.3.1. 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 вза-

имные потенциальные коэффициенты ( $\text{м}/\Phi$ ) соответственно, причем  $k \neq m$ ;

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

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

$x_k, y_k$  и  $x_m, y_m$  - координаты проводов;  $R$  - радиус проводов ( $\text{м}$ );

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

$\tau_1, \tau_2, \tau_3$  - линейные плотности зарядов проводов ( $\text{Кл}/\text{м}$ ).

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

#### 4.3.2. 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

$\beta_{km} = (-1)^{(k+m)} \frac{\Delta_{km}}{\Delta}$  - собственные ( $k=m$ ) и взаимные ( $k \neq m$ ) емкостные коэффициенты ( $\text{Ф}/\text{м}$ );

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

-определитель системы уравнений (1);

$\Delta_{km}$  - минор, образованный вычеркиванием  $k$  строки и  $m$  столбца определителя  $\Delta$ , 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  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ .

#### 4.3.3. 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

$$C_{11} = \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13},$$

$$C_{22} = \beta_{22} + \beta_{21} + \beta_{23},$$

$$C_{33} = \beta_{33} + \beta_{31} + \beta_{32}$$

- собственные частичные емкости ( $\Phi/m$ );

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

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  $\varphi_k$ , которые сравниваются с заданными значениями.

Энергию электростатического поля на единицу длины линии ( $\text{Дж}/m$ ) можно рассчитать по формуле:

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

Для точки  $N$  с заданными координатами  $x, y$  потенциал  $\varphi$  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 ( $B/m$ ), создаваемый зарядом  $k$  провода;

дом  $k$  провода;

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

Потенциал  $\varphi$  равен алгебраической сумме составляющих потенциала  $\varphi_k$ , причем числовые значения  $\tau_k$  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.

#### 4.4. 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 ( $1/O_M \cdot M$ );  $C_{km}$  - 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  $\tau_k$  - 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

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

#### 4.5. 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

$$I_k \text{ (A/м)};$$

$r_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$  - 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);

$\beta_k$  - 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  $\varphi_m$  равен алгебраической сумме составляющих потенциала  $\varphi_{mk}$ , 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 правого 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 ( $\mu_0 = 12.56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ).

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 ( $\text{Гн/м}$ ):

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

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

2. Взаимные индуктивности двухпроводных линий ( $\frac{\Gamma_H}{M}$ )

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

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 ( $\frac{\text{Дж}}{M}$ ), составит

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

#### 4.6. 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  $\vec{\Pi}$ , как мощность потока энергии на единицу площади ( $\frac{\text{Вт}}{M^2}$ ), 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  $\vec{\Pi}$  связано с вращением  $\vec{E}$  правилом правого ходового 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  $\vec{\Pi}$ , причем его модуль рассчитывается так

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

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

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

### **5.1. Литература обязательная**

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле.- М.: Высшая школа, 1978.- 231с.
2. Теоретические основы электротехники. Т.2. Нелинейные цепи и основы электромагнитного поля/ Под ред. П. А. Ионкин.– М.: Высшая школа, 1976.- 383с.
3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 2.- Л.: Энергия, 1975.– 408с.

### **5.2. Учебно-методические пособия**

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. ТПУ, 2001.– 56с.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ЧАСТЬ 3**

Рабочая программа, методические указания и контрольные задания

Составитель: Геннадий Васильевич Носов

Рецензент: В. Д. Эськов, к.т.н., доцент каф. ТОЭ ЭЛТИ

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага ксероксная

Плоская печать. Усл. печ. л. 0,93. Уч. - изд. л. 0,84.

Тираж        экз. Заказ №        . Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.94.

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