



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ**

Кафедра теоретической
электротехники

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Методические указания и задания к выполнению расчетно-графических работ
№ 1-3 для специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Алматы 2017

Составители: Л.П. Болдырева, Г.К. Смагулова. Анализ электрических цепей и электрического поля. Методические указания и задания к выполнению расчетно-графических работ №1-3 для специальности 5В071800 – Электроэнергетика. – Алматы: АУЭС, 2017.- 27 с.

Представлены методические указания и задания к расчетно-графическим работам по курсу «Анализ электрических цепей и электрического поля» по разделам: «Трехфазные линейные электрические цепи с динамической нагрузкой», «Нелинейные электрические и магнитные цепи», «Теория электромагнитного поля».

Расчетно-графические работы предназначены для студентов третьего курса, обучающихся в бакалавриате по специальности 5В071800 - Электроэнергетика.

Ил. 32, табл.16 , библиогр. 8 назв.

Рецензент: доцент **К.О. Гали**

Печатается по плану издания НАО «Алматинский университет энергетики и связи» на 2017 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2017 г.

Содержание

1 Методические указания к выполнению и оформлению расчетно-графических работ	4
2 Задание №1. Расчёт несимметричных режимов трехфазных цепей методом симметричных составляющих	5
3 Задание №2. Нелинейные электрические и магнитные цепи	8
4 Задание №3. Теория электромагнитного поля.....	15
Список литературы.....	26

1 Методические указания к выполнению и оформлению расчетно-графических работ

Расчётно-графические работы (РГР) являются важнейшим компонентом при изучении курса «Анализ электрических цепей и электрического поля» (АЭЦЭП). Выполнение РГР позволяет студенту применить теоретические положения при проведении практических расчётов, получить навыки самостоятельного анализа электрических цепей, что, в конечном итоге, способствует успешному освоению курса АЭЦЭП.

Предлагаемая методическая разработка содержит задания и методические указания к трем РГР по основным разделам АЭЦЭП, изучаемым в пятом семестре.

РГР №1 посвящена расчёту несимметричных режимов трехфазных линейных электрических цепей с динамической нагрузкой методом симметричных составляющих.

РГР №2 посвящена расчёту нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного тока.

РГР №3 посвящена расчёту электрических и магнитных полей.

При выполнении расчетно-графических работ необходимо руководствоваться следующими требованиями:

- выбрать свой вариант в соответствии с номером зачетной книжки и первой буквой фамилии, текст задания переписать полностью без сокращений в пояснительную записку расчетно-графической работы;

- каждый этап расчетно-графической работы должен быть озаглавлен. Работа выполняется только на одной стороне листа;

- в пояснительной записке приводить не только расчетные формулы и конечные результаты, но также пояснения и необходимые промежуточные вычисления, позволяющие понимать выполняемые действия и проверять их

- номер варианта, группа, фамилия и инициалы студента должны быть написаны на титульном листе;

- у параметров, имеющих определенные размерности, писать соответствующие единицы измерения, над комплексами ставить точки;

- не допускать изменений наименований узлов, параметров резисторов, индуктивностей, емкостей, условных положительных направлений токов и напряжений;

- кривые мгновенных величин, векторные, топографические и круговые диаграммы должны выполняться на вклеенных листах миллиметровой бумаги;

- на графике обязательно указывать названия изображаемых величин. Подбирать масштабы так, чтобы было удобно пользоваться графиком или диаграммой. Схемы в пояснительной записке должны быть выполнены карандашом с применением линейки, циркуля;

- оформление расчетно-графических работ необходимо осуществлять в соответствии с фирменным стандартом «Работы учебные. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию».

2 Задание № 1. Расчёт несимметричных режимов трехфазных цепей методом симметричных составляющих

Симметричная динамическая нагрузка подключена к симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС E_ϕ (рисунки 2.1 и 2.2). Параметры генератора, линии и нагрузки приведены в таблицах 2.1, 2.2, 2.3. В трёхфазной цепи (рисунок 2.1) происходит короткое замыкание одной из фаз на землю на зажимах нагрузки, а в трехфазной цепи (рисунок 2.2) происходит обрыв одного из линейных проводов. В соответствии с вариантом задания (таблица 2.1), используя метод симметричных составляющих, рассчитать токи и напряжения на всех участках цепи, определить активную, реактивную и полную мощности генератора.

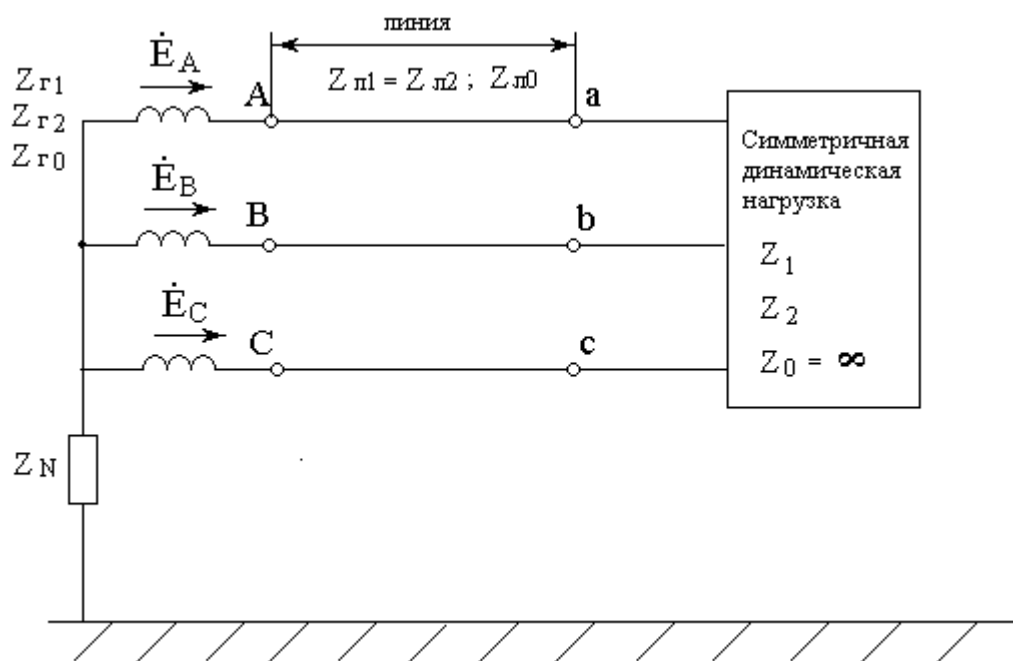


Рисунок 2.1

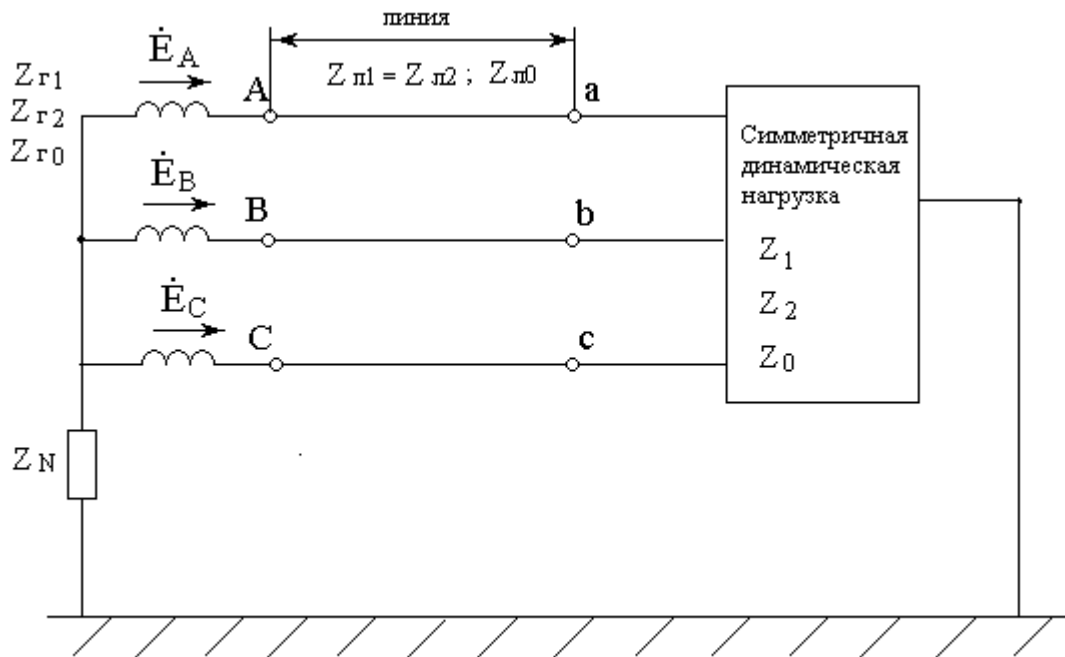


Рисунок 2.2

Таблица 2.1

Год поступления	Первая буква фамилии									
	АН	БО	ВПЯ	ГР	ДСИ	ЕТ	УЖ	ЗФ	ЧХЛ	КЦЭ
нечётный	М	Ю		Ш		Щ				
чётный	ЧХЛ	КЦЭ	АН	БО	ВПЯ	ЗФ	ГР	ЕТ	ДСИ	УЖ
№ схемы	2.1	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2
короткое замыкание фазы на землю	В	-	А	-	С	-	В	-	С	-
обрыв линии	-	А	-	С	-	В	-	С	-	В
E_{ϕ} , В	300	500	250	127	220	200	450	350	400	380
Z_0 , Ом	∞	$j0,5$	∞	$j0,7$	∞	$j0,4$	∞	$j0,8$	∞	$j0,9$

Таблица 2.2

Год поступления	Последняя цифра зачётной книжки									
	9	0	8	1	7	3	5	4	6	2
нечётный	9	0	8	1	7	3	5	4	6	2
чётный	7	8	3	2	4	9	6	1	5	0
$Z_1, \text{ Ом}$	$5 + j5$	$5 + j4$	$4 + j6$	$4 + j3$	$4 + j5$	$3 + j5$	$6 + j5$	$5 + j6$	$3 + j4$	$6 + j3$
$Z_2, \text{ Ом}$	$0,3 + j0,4$	$0,4 + j0,6$	$0,6 + j0,7$	$0,5 + j0,7$	$0,6 + j0,9$	$0,3 + j1$	$0,4 + j0,8$	$0,25 + j0,7$	$0,45 + j0,8$	$0,35 + j1$
$Z_{Л1} = Z_{Л2}, \text{ Ом}$	$j3,5$	$j4$	$j2,5$	$j5$	$j4,5$	$j3,8$	$j4,3$	$j4,7$	$j3,2$	$j3$
$Z_{Л0}, \text{ Ом}$	$j14$	$j12$	$j9$	$j10$	$j11$	$j13$	$j16$	$j15$	$j8$	$j9$

Таблица 2.3

Год поступления	Предпоследняя цифра зачётной книжки									
	7	1	6	2	5	3	4	8	9	0
нечётный	7	1	6	2	5	3	4	8	9	0
чётный	9	1	0	7	8	6	4	2	5	3
$Z_{Г1}, \text{ Ом}$	$0,25 + j2$	$0,2 + j1,5$	$0,3 + j2,5$	$0,33 + j2,8$	$0,4 + j2,3$	$0,22 + j1,8$	$0,38 + j2,2$	$0,23 + j1,4$	$0,45 + j3$	$0,28 + j1,7$
$Z_{Г2}, \text{ Ом}$	$j0,2$	$j0,18$	$j0,15$	$j0,25$	$j0,16$	$j0,14$	$j0,19$	$j0,23$	$j0,24$	$j0,17$
$Z_{Г0}, \text{ Ом}$	$j0,05$	$j0,08$	$j0,06$	$j0,09$	$j0,07$	$j0,1$	$j0,11$	$j0,12$	$j0,13$	$j0,14$
$Z_N, \text{ Ом}$	$j0,6$	$j0,2$	$j0,5$	$j0,3$	$j0,35$	$j0,25$	$j0,4$	$j0,15$	$j0,45$	$j0,55$

Методические указания.

Для расчёта несимметричных режимов трёхфазных электрических цепей с динамической нагрузкой используют теорему компенсации и метод симметричных составляющих. Несимметричный участок цепи (например, короткое замыкание одной из фаз нагрузки на землю или обрыв одного из линейных проводов) заменяют эквивалентным трехфазным несимметричным источником с электродвижущими силами $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Этот источник представляют как сумму трех симметричных трехфазных источников прямой, обратной и нулевой последовательностей, соответственно. Расчет токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей проводят по отдельности, т.е. применяют принцип наложения. Отличительной особенностью этого метода является симметричный режим в трехфазной цепи для каждой последовательности.

Порядок расчета:

1) Заменить несимметричный участок цепи эквивалентным трехфазным несимметричным источником с электродвижущими силами $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Представить его в виде трех, последовательно соединенных, симметричных трехфазных источников прямой $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$, обратной $\dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$ и нулевой $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$ последовательностей, соответственно.

2) Составить три первых уравнения, описывающих характер повреждения (короткое замыкание или обрыв линии).

3) Составить эквивалентную схему замещения и соответствующее ей уравнение для токов, напряжений и электродвижущих сил прямой последовательности. Благодаря тому, что в этой схеме режим симметричный, становится возможным создать однофазную расчетную схему цепи. Как правило, за основу берут фазу «А».

4) Аналогично составить однофазные схемы замещения и соответствующие им уравнения для токов, напряжений и электродвижущих сил обратной и нулевой последовательностей фазы «А».

5) В результате получим систему шести уравнений относительно неизвестных величин: $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$. Обычно сначала находят токи, а затем - напряжения.

6) Далее находят симметричные составляющие токов и напряжений на всех участках трехфазной цепи, используя соответствующие однофазные схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей.

7) Реальные токи и напряжения на всех участках исходной трехфазной цепи находят как сумму соответствующих симметричных составляющих. Например: $\dot{I}_{a\text{кз}} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0, \dot{I}_{b\text{кз}} = a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_1 + \dot{I}_0, \dot{I}_{c\text{кз}} = a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_1 + \dot{I}_0,$
 $\dot{U}_{an} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0, \dot{U}_{bn} = a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 + \dot{U}_0, \dot{U}_{cn} = a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 + \dot{U}_0,$
где: $a = e^{j120^\circ}, a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}, 1 + a + a^2 = 0$.

8) Наконец можно рассчитать активную, реактивную и полную мощности нагрузки, линии и генератора и построить векторную диаграмму напряжений и токов.

3 Задание № 2. Нелинейные электрические и магнитные цепи

Схемы магнитных цепей представлены на рисунках 3.1 – 3.10.

Значение намагничивающего тока I , числа витков катушки w , длины средней магнитной линии каждого участка магнитной цепи ℓ , сечения участков магнитопровода S заданы в таблицах 3.1 – 3.3.

Магнитные свойства стали, из которой изготовлены магнитопроводы, определяются основной кривой намагничивания, которая дана в таблице 3.4.

Для магнитной цепи необходимо выполнить следующее:

- изобразить эквивалентную схему заданной магнитной цепи;
- составить систему уравнений по законам Кирхгофа;
- рассчитать магнитную цепь графическим методом двух узлов и определить магнитные потоки Φ_1, Φ_2, Φ_3 ;

Таблица 3.1

Год поступления	Последняя цифра зачётной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Нечетный	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
№ схемы	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
I_1, A	0.5	-	0.6	-	1.25	0.4	1.3	0.95	1.45	-
w_1	60	-	30	-	40	70	25	15	50	-
I_2, A	-	0.5	-	0.9	0.4	0.8	-	-	-	0.35
w_2	-	60	-	20	40	55	-	-	-	50
I_3, A	0.7	0.5	0.6	0.8	-	-	0.85	0.75	0.55	1.1
w_3	25	30	15	65	-	-	60	45	35	40
Четный	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
№ схемы	3.8	3.5	3.6	3.1	3.3	3.2	3.9	3.10	3.7	3.4
I_1, A	0.6	0.55	0.7	0.8	0.9	-	0.85	-	1.5	-
w_1	25	40	30	15	50	-	40	-	60	-
I_2, A	-	0.3	0.6	-	-	0.45	-	0.35	-	0.8
w_2	-	25	50	-	-	15	-	20	-	35
I_3, A	1.8	-	-	1.25	0.9	0.8	0.75	0.7	0.6	1.3
w_3	40	-	-	25	30	15	25	20	35	50

Таблица 3.2

Год поступления	Предпоследняя цифра зачётной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Нечетный	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Четный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l_1, см$	5	9	20	11	7	10	13	20	23	13
$l_2, см$	10	14	15	6	12	5	8	15	17	7
$l_3, см$	15	19	25	17	18	15	18	10	11	20

Таблица 3.3

Год поступления	Первая буква фамилии									
	АЛ М	БМЦ	ВН Ч	ГО Щ	ДП Ш	ЕР Э	ЖС Ю	ЗТ Я	ИУХ	КФ
Нечетный	АЛ М	БМЦ	ВН Ч	ГО Щ	ДП Ш	ЕР Э	ЖС Ю	ЗТ Я	ИУХ	КФ
Четный	ЕР Э	АЛХ	ЖСЮ	БМ Ц	ЗТ Я	ВН Ч	ИУ	ГО Щ	КФ	ДПШ
$S_1, см^2$	12.6	4.3	18.5	6.3	8.6	5.7	10.7	7.4	20.5	15.3
$S_2, см^2$	8.2	5.8	10.2	5.2	6.3	6.3	8.4	5.6	10.3	10.2
$S_3, см^2$	12.6	4.3	18.5	6.3	8.6	5.7	10.7	7.4	20.5	15.3

Таблица 3.4

Н, А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200
В, Тл	0.22	0.75	0.93	1.02	1.14	1.28	1.47	1.53	1.57	1.6

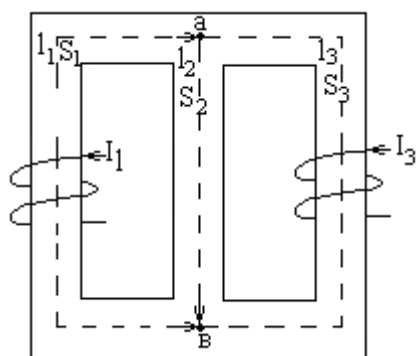


Рисунок 3.1

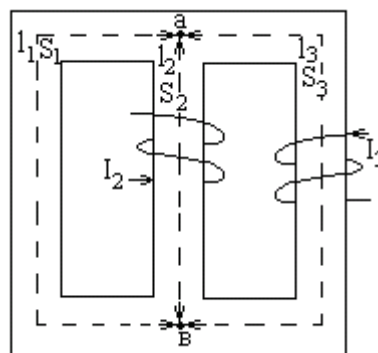


Рисунок 3.2

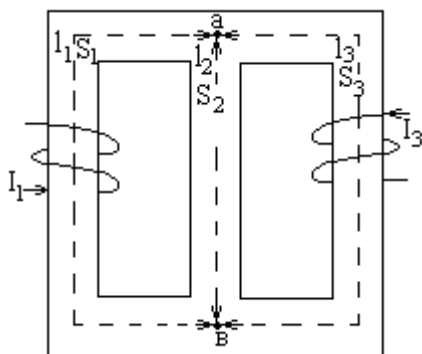


Рисунок 3.3

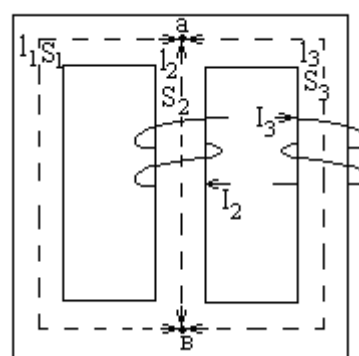


Рисунок 3.4

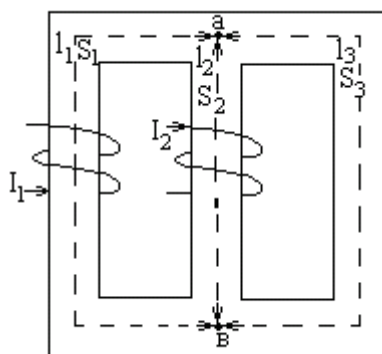


Рисунок 3.5

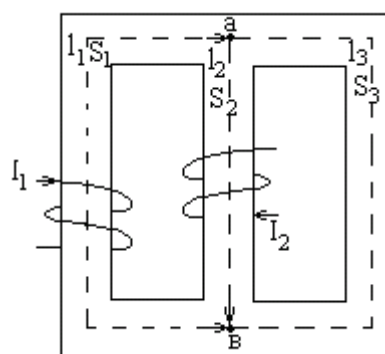


Рисунок 3.6

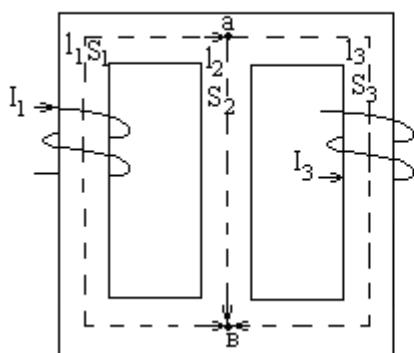


Рисунок 3.7

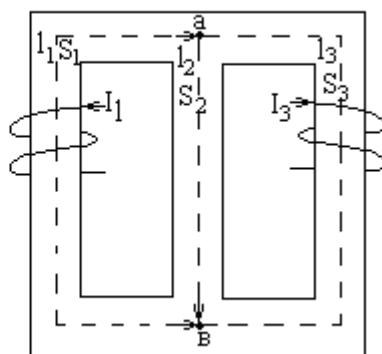


Рисунок 3.8

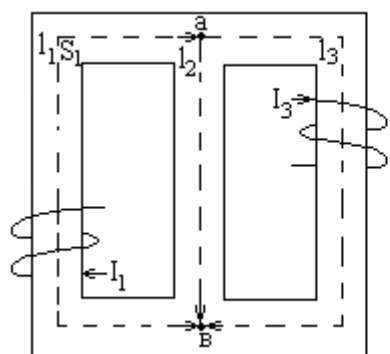


Рисунок 3.9

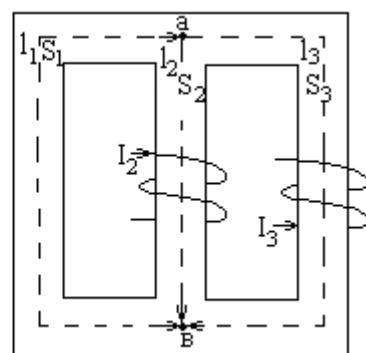


Рисунок 3.10

Методические указания.

Магнитное поле невозможно увидеть, почувствовать, понюхать или услышать, поэтому трудно представить. Майкл Фарадей предложил представить магнитное поле графически, изображая поле состоящим из линий магнитного потока, что позволяет осуществить оценку распределения и плотности поля.

Основные определения.

Магнитный поток является количественной оценкой магнитного поля (или число силовых линий) произведенного магнитным источником. Символом, обозначающим магнитный поток, является Φ (греческая буква «фи»). Единицей измерения магнитного потока является Вебер, *Вб*.

Плотность магнитного потока – это количественная оценка потока, проходящего сквозь определенную площадь сечения, расположенного перпендикулярно направлению потока:

$$\text{Плотность магнитного потока} = \frac{\text{магнитный поток}}{\text{площадь}}.$$

Символом, обозначающим *плотность магнитного потока*, является *B*. Единицей измерения плотности магнитного потока является Тесла, *T*. $1T = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}$.

Следовательно

$$B = \frac{\Phi}{S}, \text{ Тл (Тесла)},$$

где S (м^2) – площадь поперечного сечения.

Магнитодвижущая сила (МДС) F_m является причиной существования (источником) магнитного потока в магнитной цепи,

$$MMF, F_m = w \cdot I, \text{ А (Ампер)},$$

где w – число проводников (или витков) и I – ток в Амперах.

Единицей измерения МДС является «Ампер-витки». Однако, так как «витки» не имеют размерности, единицей измерения F_m в системе СИ является Ампер.

Напряженность магнитного поля (или намагничивающая сила),

$$H = \frac{w \cdot I}{l}, \frac{\text{А}}{\text{м}} \left(\frac{\text{Ампер}}{\text{метр}} \right),$$

где l – усредненная длина траектории магнитного потока в метрах.

Таким образом, магнитное напряжение $U_m = H \cdot l$, Ампер.

Для воздуха, или для любой не магнитной среды, отношение плотности магнитного потока B к намагничивающей силе H является постоянной величиной, т.е. $B/H = \mu_0$ – постоянная.

Этой постоянной является μ_0 – магнитная проницаемость вакуума (или магнитная постоянная), равная $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, т.е. для воздуха, или для любой не магнитной среды, отношение $B/H = \mu_0$, несмотря на то что все не магнитные материалы, включая воздух, проявляют незначительные магнитные свойства, которыми, на самом деле, можно пренебречь. Для всех сред, отличных от вакуума, отношение

$$B/H = \mu_0 \cdot \mu_r,$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость, определяется как

$$\mu_r = \frac{\text{Индукция магнитного поля в материале}}{\text{Индукция магнитного поля в вакууме}}.$$

Величина μ_r зависит от типа магнитного материала и, таким образом, является отношением плотностей магнитного потока, она не имеет единицы измерения. По определению, μ_r для вакуума равняется 1.

Произведение $\mu_0 \cdot \mu_r = \mu$ называется *абсолютной магнитной проницаемостью*.

Откладывая измеренные значения плотности магнитного потока B в зависимости от напряженности магнитного поля H , получают кривую намагничивания (или B - H кривую). Для немагнитных материалов эта зависимость представляет собой прямую линию. Типичная зависимость для электротехнической стали (магнитный материал) представлена в таблице 2.4 и на рисунке внизу.

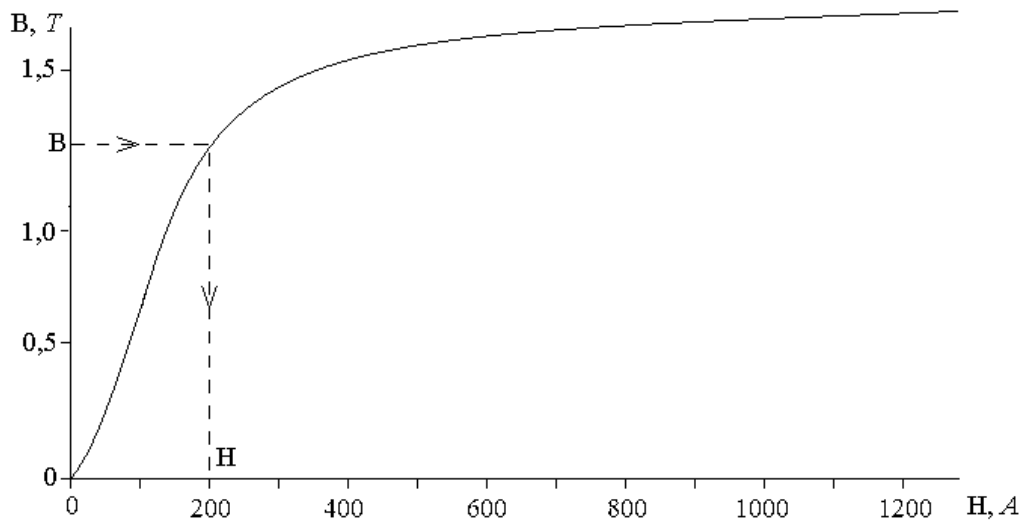


Рисунок 3.11 – Кривая намагничивания электротехнической стали

Для немагнитных материалов $\mu_r = 1$, следовательно, плотность магнитного потока $B = \mu_0 \cdot H$. Для магнитных материалов плотность потока $B = \mu_0 \mu_r H$.

Магнитный поток $\Phi = B \cdot S$, где S (м²) – площадь поперечного сечения.

Обозначение R_M означает «магнитное сопротивление» магнитной цепи возникающему в ней магнитному потоку.

$$R_M = \frac{F_M}{\Phi} = \frac{w \cdot I}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{B \cdot S} = \frac{l}{(B/H) \cdot S} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$$

Единицей измерения магнитного сопротивления 1/Гн (Гн⁻¹) или А/Вб.

Ферромагнитные материалы имеют низкое магнитное сопротивление и могут быть использованы как магнитные экраны, предотвращающие воздействие магнитных полей на материалы внутри экрана.

Сопоставление между электрическими и магнитными величинами приведено в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Электрическая цепь	Магнитная цепь
ЭДС E (В)	МДС F_M (А)
Электрический ток I (А)	Магнитный поток Φ (Вб)
Электрическое сопротивление R (Ом)	Магнитное сопротивление R_M (Гн ⁻¹ = А/Вб)
$I = \frac{E}{R}$	$\Phi = \frac{F_M}{R_M} = \frac{U_M}{R_M}$
$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$	$R_M = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$

Порядок расчета магнитной цепи графоаналитическим методом двух узлов.

Дана магнитная цепь и эквивалентная электрическая цепь

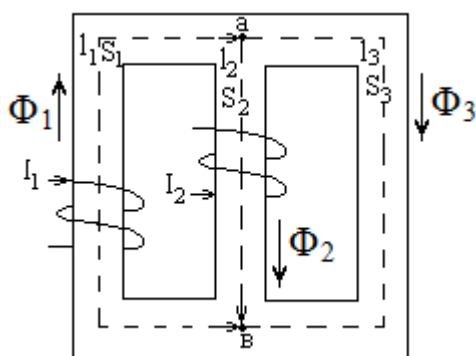


Рисунок 3.12 – Магнитная цепь

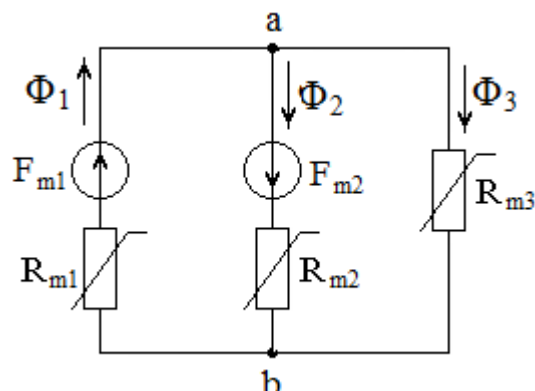


Рисунок 3.13 – Эквивалентная цепь

Система уравнений для заданной магнитной цепи:

$$\begin{cases} \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 \\ U_{abm}(\Phi_1) = F_{1m} - H_1(B) \cdot l_1 \\ U_{abm}(\Phi_2) = -F_{2m} + H_2(B) \cdot l_2 \\ U_{abm}(\Phi_3) = H_3(B) \cdot l_3 \end{cases}$$

Необходимо рассчитать и построить Вебер-Амперные характеристики $U_{abm}(\Phi_1)$, $U_{abm}(\Phi_2)$ и $U_{abm}(\Phi_3)$. Расчет Вебер-Амперных характеристик рекомендуется проводить в таблице, подобной таблице 3.6.

Таблица 3.6

№ п/п	Φ , Вб	$B = \frac{\Phi}{S}$, Тл	$H(B)$, А/м по кривой В-Н	$U_{abm}(\Phi_1)$, А	$U_{abm}(\Phi_2)$, А	$U_{abm}(\Phi_3)$, А
1						
...						
15						

Затем, задаваясь несколькими значениями U_{abm} и суммируя соответствующие им магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 , построить эквивалентную характеристику $U_{abm}(\Phi_2 + \Phi_3)$. Точка пересечения полученной кривой $U_{abm}(\Phi_2 + \Phi_3)$ с кривой $U_{abm}(\Phi_1)$ является решением задачи, то есть определяет значения магнитного напряжения цепи U_{abm} и магнитного потока Φ_1 . Магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 определяются по кривым $U_{abm}(\Phi_2)$ и $U_{abm}(\Phi_3)$ в соответствии с найденным значением U_{abm} .

4 Задание № 3. Теория электромагнитного поля

Задание содержит две задачи на темы:

- расчет электрических полей;
- расчет магнитных полей постоянного тока.

Номера задач, которые должны быть решены студентом и данные для расчета, указаны в таблицах 4.1, 4.2, 4.3.

Задача 4.1. Параллельно плоской границе раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 протянуты два параллельных длинных провода одинакового сечения с радиусом R на расстоянии d друг от друга и на расстоянии h_1 и h_2 от граничной плоскости. Проводам сообщены заряды τ_1 и τ_2 . Взаимное расположение проводов и плоскости раздела двух сред показано на рисунке 4.1.

Требуется:

- для варианта *а*: определить напряжение между проводами;
- для варианта *б*: определить плотность связанного заряда в точке $K(X_K, Y_K = 0)$ на граничной плоскости.

Задача 4.2. Два тонких параллельных бесконечно длинных провода одинакового сечения радиусом R расположены в воздухе параллельно поверхности земли на высоте h_1 и h_2 . Расстояние между проводами d . К проводам приложено напряжение U от незаземленного источника питания (рисунок 4.2).

Требуется:

- рассчитать потенциальные и емкостные коэффициенты;
- определить линейные плотности зарядов каждого провода;
- рассчитать рабочую емкость двухпроводной линии.

Задача 4.3. Полусферический заземлитель зарыт в грунт с удельной проводимостью γ_1 вровень с поверхностью. Радиус заземлителя R_3 . К заземлителю подводится постоянный ток I (рисунок 4.3).

Требуется:

- определить шаговое напряжение $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$, точки A и B расположены соответственно на расстоянии R_A и $R_B = R_A + 0,8$ м от центра заземлителя;
- определить сопротивление растекания;
- определить напряженность электрического поля в точке C , расположенной в грунте на расстоянии R_C от центра заземлителя.

Задача 4.4. Сферический заземлитель радиуса R_3 находится глубоко в грунте с удельной проводимостью γ_1 , на расстоянии d от границы раздела

двух сред с удельными проводимостями γ_1 и γ_2 . К заземлителю подводится ток I (рисунок 4.4). Влиянием поверхности грунта можно пренебречь.

Требуется:

- определить напряжение растекания U_p ;
- определить вектор напряженности электрического поля в точках A и

D .

Задача 4.5. По уединенному бесконечно длинному прямому проводу круглого сечения радиусом R протекает постоянный ток I . Магнитная проницаемость провода - μ , окружающая среда – воздух. Плотность тока по сечению провода равномерная (рисунок 4.5).

Требуется:

- для варианта а: рассчитать напряженность магнитного поля \vec{H} и магнитную индукцию \vec{B} внутри и вне провода. Построить графики $H(r)$ и $B(r)$ (где r – расстояние от оси провода);

- для варианта б: рассчитать внутреннюю индуктивность участка провода длиной $\ell = 1\text{ м}$;

- для варианта в: определить векторный потенциал \vec{A} внутри и вне провода, на расстоянии от оси провода: $r_{\text{ВНУТ}} = 0,5R$ и $r_{\text{ВНЕШ}} = 2R$.

Задача 4.6. Двухпроводная линия состоит из длинных цилиндрических проводов круглого сечения. Радиусы проводов одинаковы и равны R . Провода расположены параллельно друг другу на расстоянии d . Ток в линии – I , окружающая среда-воздух (рисунок 4.6).

Требуется:

- для варианта а: определить вектор напряженности магнитного поля \vec{H} в точке $N(X_N, Y_N)$;

- для варианта б: определить векторный потенциал \vec{A} для точки $N(X_N, Y_N)$;

3) для варианта в: определить внешнюю индуктивность на единицу длины линии.

Задача 4.7. На расстоянии d от прямого длинного тонкого провода с постоянным током I расположена прямоугольная рамка со сторонами a и b , с числом витков w из тонкого изолированного провода. По рамке протекает ток I_1 . Две стороны рамки параллельны оси провода (рисунок 4.7).

Требуется:

- рассчитать магнитный поток, пронизывающий рамку;
- рассчитать взаимную индуктивность между проводом и рамкой;

- определить силу \vec{F} , действующую на рамку.

Таблица 4.1

Год поступления	Начальная буква фамилии									
	Нечетный	АБВ	ЕТД	ИЗЖ	ЦХ	ЩШЧ	ЯЮЭ	ЛК	ОНМ	СРП
Четный	ЮТ	ЭИУ	СЗ	ПРЖ	ОЦЕ	НЩД	МЧГ	ЛЦВ	КХБ	АЯФ
№ задач	4.1а 4.6а	4.2 4.5в	4.3 4.6а	4.1б 4.7	4.4 4.5б	4.1а 4.5а	4.2 4.6б	4.3 4.5а	4.1б 4.5б	4.4 4.6в
ε_1	9	-	-	6	-	6	-	-	3	-
ε_2	7	-	-	4	-	8	-	-	5	-
$\tau_1, Кл/м$	$5 \cdot 10^{-9}$	-	-	$2 \cdot 10^{-9}$	-	$-5 \cdot 10^{-9}$	-	-	$-6 \cdot 10^{-9}$	-
$\tau_2, Кл/м$	$-3 \cdot 10^{-9}$	-	-	$-4 \cdot 10^{-9}$	-	$5 \cdot 10^{-9}$	-	-	$8 \cdot 10^{-9}$	-
$X_K, м$	0,5	-	-	0,2	-	0,4	-	-	0,3	-

Таблица 4.2

Год поступления	Последняя цифра зачётной книжки									
	Нечетный	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Четный	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$d, м$	0,8	0,88	0,66	0,64	0,74	0,90	0,78	0,86	0,68	0,76
$R, м$	0,006	0,005	0,008	0,009	0,004	0,007	0,008	0,004	0,006	0,007
$h_1, м$	0,34	0,56	0,38	0,46	0,44	0,58	0,60	0,44	0,48	0,30
$\gamma_1, См \cdot м^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
$I_1, А$	28	18	35	20	25	10	16	25	15	30
$R_D, м$	0,86	0,95	0,96	0,88	0,80	1,15	0,89	1,00	1,20	0,90
$\gamma_2, См \cdot м^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
μ	150	180	280	350	250	90	300	80	260	200
$X_N, м$	0,30	0,50	0,40	0,25	0,45	0,2	0,48	0,60	0,50	0,35
$v, м$	0,85	0,68	0,58	0,80	0,76	0,64	0,70	0,55	0,60	0,55

Год поступления	Предпоследняя цифра зачётной книжки									
	0	9	1	8	7	2	6	3	4	5
Четный	0	9	1	8	7	2	6	3	4	5
Нечетный	5	4	3	6	2	7	8	1	9	0
$h_2, м$	0,88	0,76	0,68	0,96	0,98	0,70	0,85	0,74	0,98	0,86
$U, В$	500	750	600	300	400	900	220	380	800	700
$R_3, м$	0,20	0,14	0,25	0,18	0,10	0,15	0,16	0,26	0,24	0,12
$R_A, м$	0,36	0,40	0,45	0,25	0,20	0,30	0,36	0,28	0,40	0,22
$R_c, м$	0,45	0,35	0,40	0,50	0,38	0,36	0,50	0,60	0,55	0,30
$I, А$	50	85	60	40	65	90	75	95	70	80
$Y_N, м$	0,90	0,66	0,77	0,60	0,80	0,86	0,78	0,96	0,64	0,70
W	550	350	450	700	500	250	300	200	600	650
$a, м$	0,24	0,30	0,38	0,40	0,36	0,20	0,40	0,28	0,42	0,34

Таблица 4.3

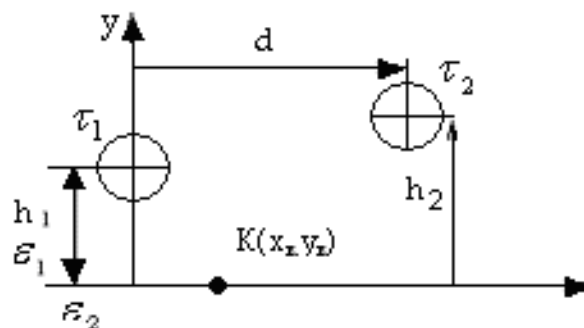


Рисунок 4.1

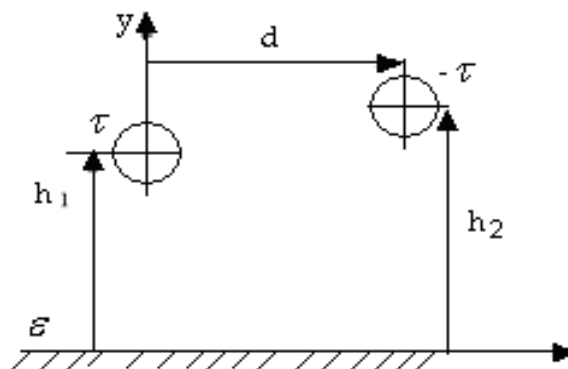


Рисунок 4.2

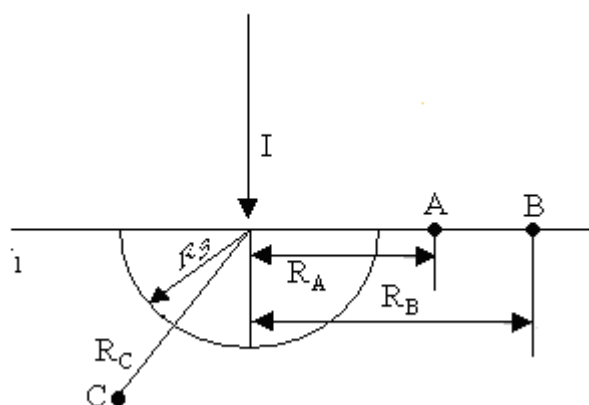


Рисунок 4.3

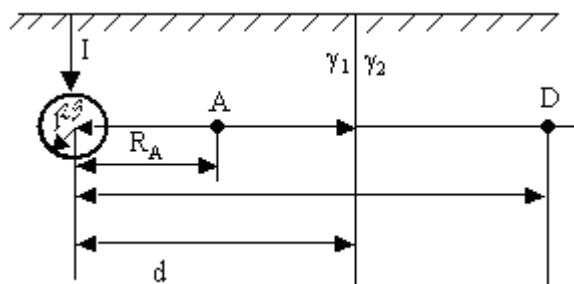


Рисунок 4.4

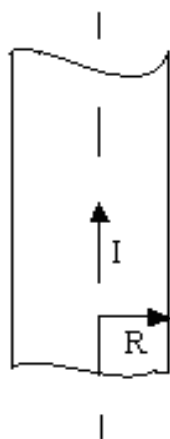


Рисунок 4.5

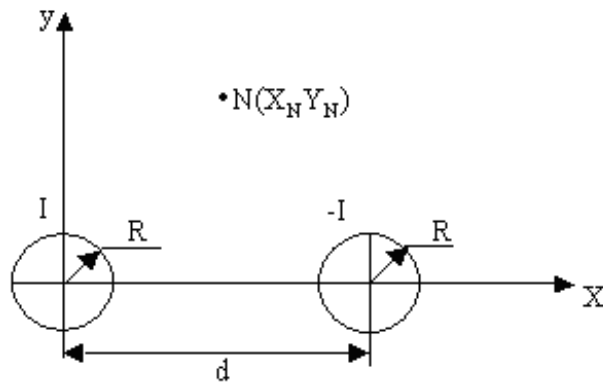


Рисунок 4.6

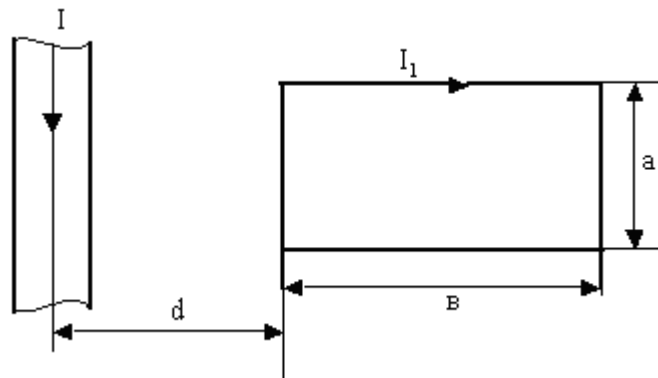


Рисунок 4.7

Методические указания.

Расчет электростатического поля, электрического поля постоянного тока в проводящей среде и магнитостатического поля постоянного тока.

Электростатическое поле.

Основные определения:

\vec{E} , В/м (Вольт на метр) – вектор напряженности электрического поля;

\vec{D} , Кл/м² (Кулон на метр квадратный) – вектор электрического смещения (электрической индукции):

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \vec{E} ;$$

\vec{P} , Кл/м² – вектор электрической поляризации:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad \text{и} \quad \vec{P} = \vec{D} - \varepsilon_0 \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot \vec{E} ,$$

где χ_e – диэлектрическая восприимчивость среды;

$\varepsilon = 1 + \chi_e$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума или диэлектрическая постоянная;

q , Кл (Кулон) – заряд;

τ , Кл/м (Кулон на метр) – линейная плотность заряда электрической оси;

$\sigma_{\text{своб.}}$, Кл/м² (Кулон на метр квадратный) – поверхностная плотность свободных зарядов.

Граничные условия на границе раздела двух диэлектриков с ε_1 и ε_2 .

$$\sigma_{\text{своб.}} = D_{1n} - D_{2n} \quad \text{и} \quad E_{1t} = E_{2t} ,$$

где D_{1n} и D_{2n} – нормальные составляющие векторов электрического смещения;

E_{1t} и E_{2t} – тангенциальные составляющие векторов напряженности электрического поля на границе раздела между средами 1 и 2, соответственно.

Поверхностная плотность связанных зарядов $\sigma_{\text{связ.}}$, Кл/м² (Кулон на метр квадратный):

$$\sigma_{\text{связ.}} = -(P_{1n} - P_{2n}) = -(D_{1n} - D_{2n}) + \varepsilon_0 \cdot (E_{1n} - E_{2n}) = \varepsilon_0 \cdot (E_{1n} - E_{2n}),$$

где E_{1n} и E_{2n} – нормальные составляющие векторов напряженности электрического поля на границе раздела между средами 1 и 2, соответственно.

На плоскости раздела двух диэлектриков нет свободных зарядов, поэтому

$$\sigma_{\text{своб.}} = D_{1n} - D_{2n} = 0.$$

Граничные условия на границе раздела между диэлектриком и проводником:

$$\sigma_{\text{своб.}} = D_n \quad \text{and} \quad E_t = 0 .$$

Теорема Гаусса

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{S} = \frac{\Sigma q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} .$$

Разность потенциалов

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \int_a^b \bar{E} \cdot d\bar{l} .$$

Вектор напряженности электрического поля как градиент потенциала

$$\bar{E} = -grad\varphi .$$

Метод зеркальных изображений.

Расчетные эквивалентные схемы задачи 4.1, применяемые для сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 , приведены на рисунках 4.8 и 4.9.

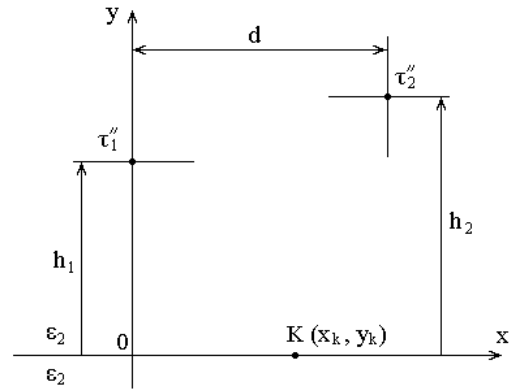
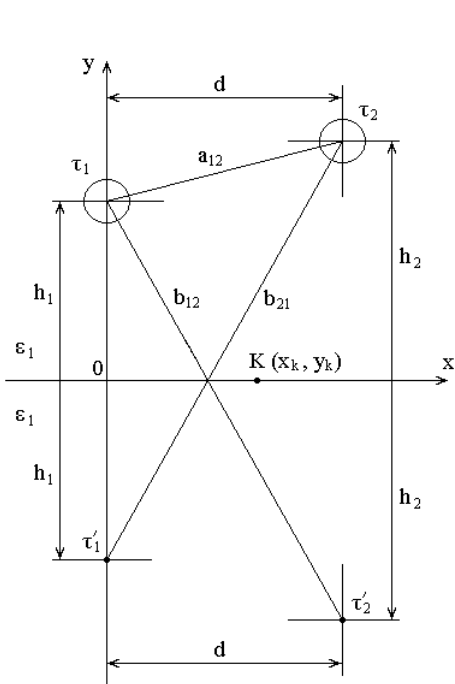


Рисунок 4.8 – Схема для среды с ϵ_1 Рисунок 4.9 – Схема для среды с ϵ_2

Линейные плотности фиктивных электрических зарядов:

$$\tau' = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \cdot \tau \quad \text{и} \quad \tau'' = \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \cdot \tau.$$

Расчетная эквивалентная схема задачи 4.2, применяемая для среды с диэлектрической проницаемостью ϵ , приведена на рисунке 4.10.

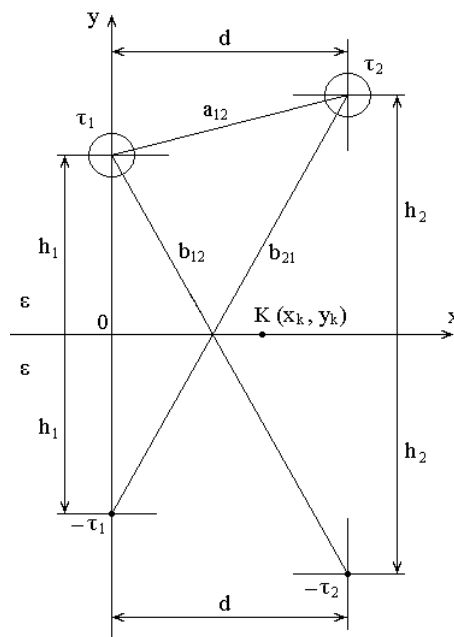


Рисунок 4.10 – Эквивалентная расчетная схема для среды с ε
 Электрическое поле постоянного тока в проводящей среде.

Основные определения:

$$\bar{\delta} = \gamma \cdot \bar{E} ,$$

\bar{E} , В/м (Вольт на метр) – вектор напряженности электрического поля;
 $\bar{\delta}$, А/м² (Ампер на метр в квадрате) – вектор плотности электрического
 тока,

γ – удельная проводимость проводящей среды.

Граничные условия на поверхности раздела двух сред с удельными
 проводимостями γ_1 и γ_2 :

$$\delta_{1n} = \delta_{2n} \quad \text{и} \quad E_{1t} = E_{2t} .$$

Разность потенциалов:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \int_a^b \bar{E} \cdot d\bar{l} .$$

Вектор напряженности электрического поля как градиент потенциала:

$$\bar{E} = -grad\varphi .$$

Применение метода зеркальных изображений для проводящей среды.

Расчетная эквивалентная схема для задачи 4.3.

Эквивалентная расчетная схема, применяемая для среды с удельной
 проводимостью γ :

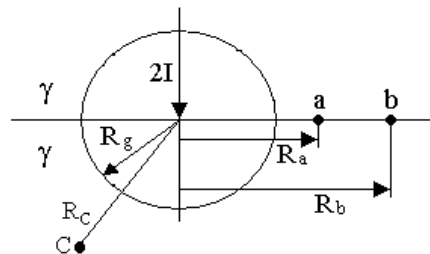


Рисунок 4.11 – Эквивалентная расчетная схема для среды с γ

Расчетные эквивалентные схемы для задачи 4.4.

Эквивалентные расчетные схемы, применяемые для сред с удельными
 проводимостями γ_1 и γ_2 , соответственно:

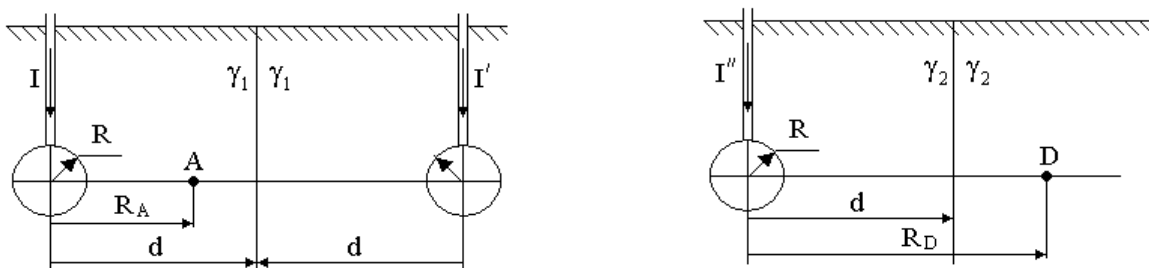


Рисунок 4.12 – Схема для среды с γ_1
 γ_2

Рисунок 4.13 – Схема для среды с

Фиктивные токи:

$$I' = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot I \quad \text{и} \quad I'' = \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \cdot I.$$

Магнитное поле постоянного тока.

Основные определения:

\vec{H} , А/м (Ампер на метр) – вектор напряженности магнитного поля;

\vec{B} , Т (Тесла) – вектор магнитной индукции (плотность магнитного потока):

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H},$$

μ – относительная магнитная проницаемость среды;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м (Генри на метр) – магнитная проницаемость вакуума или магнитная постоянная.

Теорема Гаусса для магнитного поля, которая является одним из четырех уравнений Максвелла, утверждает, что суммарный магнитный поток сквозь замкнутую поверхность равен нулю:

$$\Phi = \oint \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0.$$

Закон Ампера для замкнутого контура:

$$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \int \vec{j} \cdot \vec{dS} = \sum I = w \cdot I,$$

где \vec{j} , А/м² – вектор плотности электрического тока;

w , – число витков обмотки;

I , А – ток в обмотке;

\vec{dl} , м – единичный вектор длины контура интегрирования.

Граничные условия на границе раздела двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 :

$$B_{1n} = B_{2n} \quad \text{и} \quad H_{1t} = H_{2t},$$

где B_{1n} и B_{2n} – нормальные составляющие векторов магнитной индукции;

H_{1t} и H_{2t} – тангенциальные составляющие векторов напряженности магнитного поля на поверхности раздела между двумя средами 1 и 2, соответственно.

Разность магнитных потенциалов:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \int_a^b \vec{H} \cdot \vec{dl}.$$

Связь между векторным потенциалом \vec{A} и вектором магнитной индукции \vec{B} :

$$\operatorname{rot}\vec{A} = \vec{B}.$$

Векторный потенциал \vec{A} внутри провода имеет направление вдоль провода и величину:

$$A_{\text{вн}} = \frac{\mu_0 \mu_w \cdot I}{4\pi} \ln \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right).$$

Векторный потенциал \vec{A} вне провода имеет направление вдоль провода и величину:

$$A_{\text{внш}} = \frac{\mu_0 \mu \cdot I}{2\pi} \ln \frac{R}{r}.$$

Список литературы

- 1 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М., 2013.
- 2 Бессонов А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для бакалавров / А. Бессонов; доп. МО РФ.- 11-е изд.- М.: Юрайт, 2012.- 320 с.
- 3 Гальперин М.В.. Электротехника и электроника [Текст]: Учебник доп. МОиН РФ.- М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2010.- 480 с.
- 4 Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Издательство: Питер. Теоретические основы электротехники Том 1. 2009 г.
- 5 Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Издательство: Питер. Теоретические основы электротехники. Том 2, 5-е издание. 2009 г.
- 6 В.И.Денисенко, С.Ю.Креслина. Теоретические основы электротехники 2. Конспект лекции для студентов всех форм обучения специальности 050718-Электроэнергетика. - Алматы: АИЭС. 2007.- 62 с.
- 7 Денисенко В.И., Светашев Г.М. ТОЭЗ.: Конспект лекций. - Алматы: АИЭС, 2007. – 90 с.
- 8 Денисенко В.И., Аршидинов М.М., Болдырева Л.П. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие.- Алматы: АУЭС, 2016.-98 с.

Болдырева Любовь Павловна
Смагулова Гульдана Кашкинбаева

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Методические указания и задания к выполнению расчетно-графических работ
№ 1-3 для специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Редактор Л.Т. Сластихина
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать _____
Тираж 150 экз.
Объем 1,6 уч. - изд. л.

Формат 60x84
Бумага типографская №1
Заказ _____. Цена 825 тг.

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинского университета энергетики и связи»
050013 Алматы, Байтурсынова 126