

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики и технологии металлов

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Задания для выполнения  
контрольной работы № 4  
с методическими указаниями  
для студентов заочного обучения  
направления 650900 (специальность 100400)**

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Теоретические основы электротехники»  
(направление 650900, специальность 100400 – заочное  
обучение)

Составил: доцент, канд. техн. наук Мошкин В.И.

Составлено на основе переработанных контрольных заданий по курсу  
ТОЭ для специальностей 210700, 100400, 180700 / Сост. Р.Я. Сулей-  
манов – Екатеринбург: УРГУПС, 1999. – 28 с.

Утверждены на заседании кафедры « 5 » сентября 2003 г.

Рекомендованы редакционно-издательским советом университета  
« » 2003 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Таблица 2

В четвертой контрольной работе студенты решают три задачи

1. Расчет магнитной цепи постоянного тока.
2. Расчет нелинейной цепи переменного тока, содержащей катушки с ферромагнитным сердечником.
3. Расчет электромагнитного поля.

Контрольные задания имеют 100 вариантов. Исходные данные к первым двум задачам определяются по двум последним цифрам шифра студента. По предпоследней цифре выбирают номер схемы; по последней – номер строки в таблице данных. Например, для шифра 320728 выбирается схема 2, строка таблицы – 8. Для последней задачи схема для всех вариантов, одна, исходные числовые данные приведены в таблице.

Решению контрольной работы обязательно должно предшествовать изучение теоретического материала в соответствии с утвержденной программой курса. Основные определения и правила необходимо заучивать твердо. В ходе изучения материала следует решать вспомогательные задачи. Это поможет запомнить методы решения и расчетные формулы. Диаграммы желательно размещать на листе формата основного текста (например, А4).

### Задача 1. Расчет магнитной цепи постоянного тока

#### Содержание работы

Заданы размеры магнитной цепи (рис.1), кривая намагничивания магнитопровода представлена в табл.1. Величины токов и числа витков обмоток заданы в табл.2, а номер схемы – на рис.2.

Определить магнитные потоки в стержнях и значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

При расчете потоками рассеяния пренебречь.

Таблица 1

В, Тл	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2
H, А/м	0	200	400	950	3900	15000

Строка	$I_1$ , А	$W_1$ , ч. вит.	$I_2$ , А	$W_2$ , ч. вит.	$I_3$ , А	$W_3$ , ч. вит.	$a_1$ , мм	$a_2$ , мм	$a_3$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мм	$l$ , мм	$\delta$ , мм
1	30	160	15	150	25	200	50	40	40	80	50	180	4
2	25	250	10	300	30	150	40	50	50	60	50	160	5
3	20	200	5	100	10	300	50	50	50	70	50	170	9
4	30	250	10	180	25	150	60	40	40	90	60	190	10
5	25	200	15	250	20	250	40	40	40	70	50	185	6
6	20	250	10	100	30	200	50	50	40	65	40	180	7
7	25	180	5	220	15	300	40	40	50	60	50	160	8
8	30	160	10	350	10	250	60	60	30	80	70	190	5
9	25	220	15	300	25	200	50	50	40	60	60	180	9
0	20	200	5	200	12	220	40	40	50	60	50	140	6

Толщина набора  $d=60$  мм.

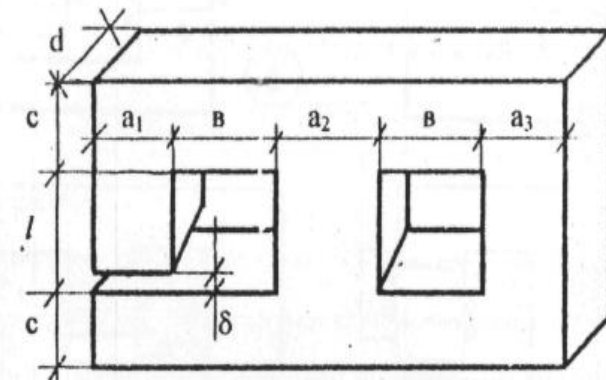


Рис. 1. Обозначение размеров магнитной цепи

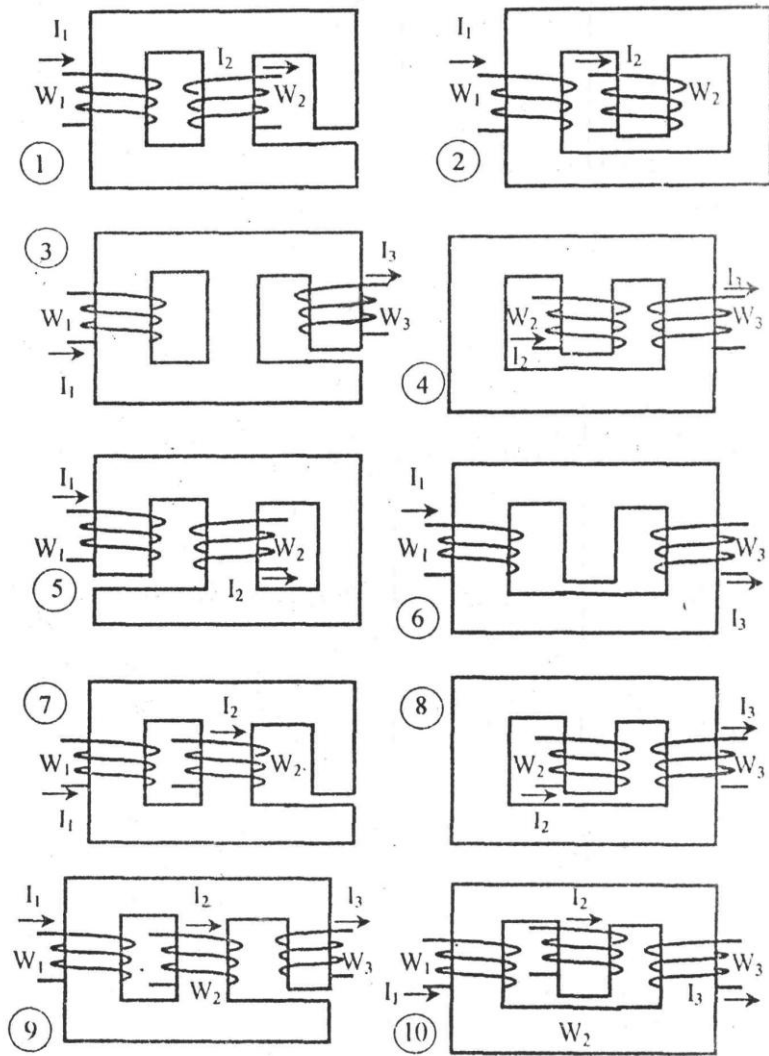


Рис. 2. Рисунки к задаче 1

Задача 2. Расчет нелинейной цепи переменного тока, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником

Содержание работы

Задана электрическая цепь (рис.3), содержащая катушку с ферромагнитным сердечником. Индукция  $B$  изменяется по синусоидальному закону. Кривая намагничивания задана в табл.3. Исходные данные приведены в табл.4. Для всех вариантов задается аппроксимирующее выражение кривой намагничивания:

$$H = aB + bB^3$$

Требуется

1. Определить коэффициенты  $a$  и  $b$  аппроксимирующего выражения, выбрав на кривой намагничивания точки:

$$H_1 = 250 \text{ А/м}, B_1 = 1 \text{ Тл}, H_2 = 1000 \text{ А/м}, B_2 = 1,4 \text{ Тл};$$

2. Построить в одних осях исходную кривую намагничивания и аппроксимирующую кривую.

3. Пренебрегая потоками рассеяния и потерями в сердечнике, определить закон изменения тока и напряжения источника. Построить гармоники тока источника и их графическую сумму в пределах одного периода основной гармоники.

4. Определить показания приборов, считая, что они имеют электродинамическую систему.

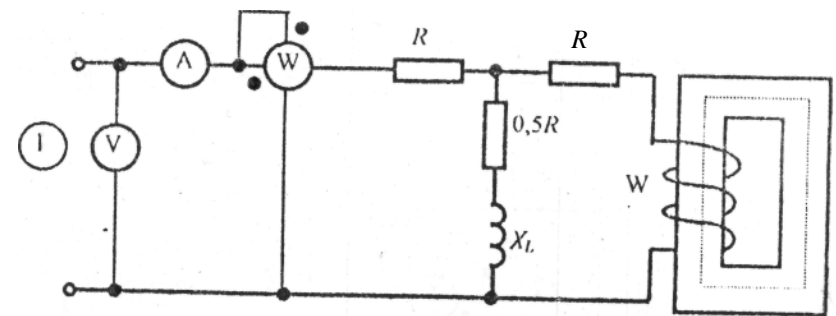
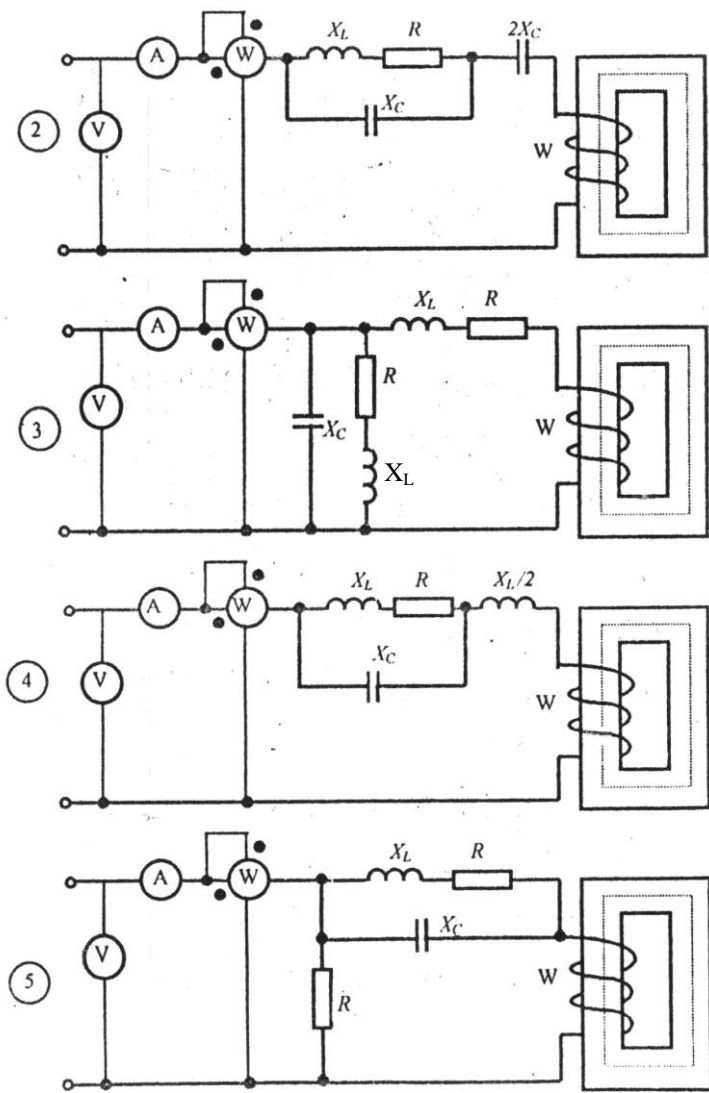
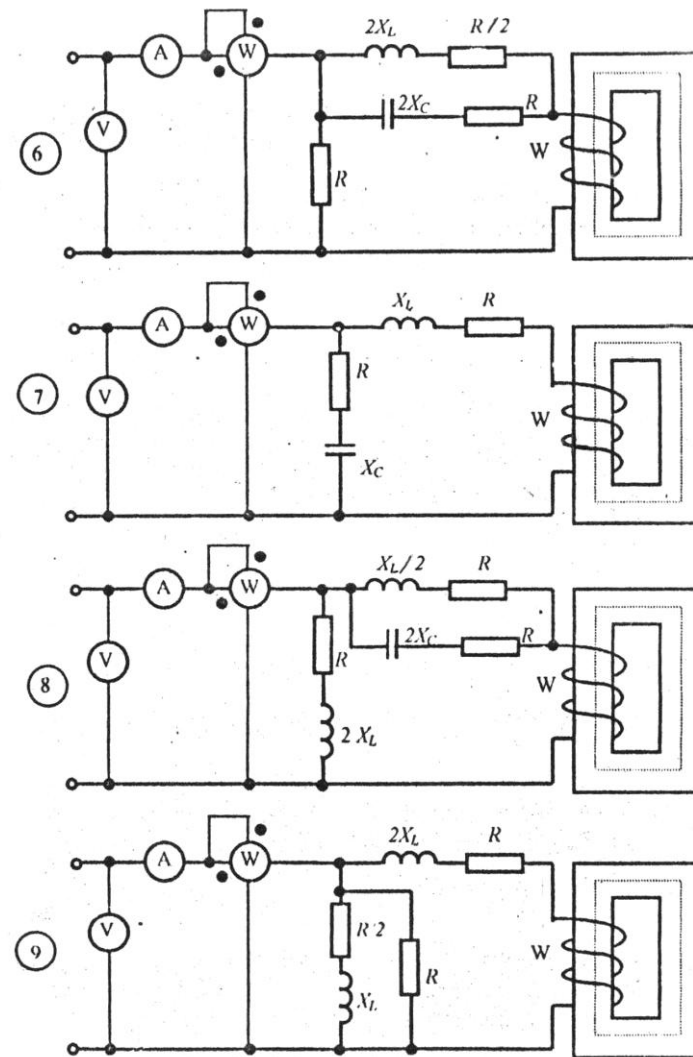


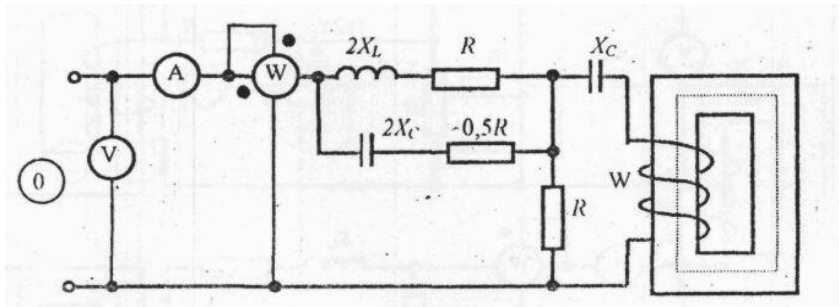
Рис. 3. Рисунки к задаче 2



Продолжение рис. 3. Рисунки к задаче 2



Продолжение рис. 3. Рисунки к задаче 2



Окончание рис. 3. Рисунки к задаче 2

Таблица 3

В, Тл	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
Н, А/м	120	160	250	500	1000	1800

Таблица 4

Номер строки	R, Ом	X <sub>L</sub> , Ом	X <sub>C</sub> , Ом	W, число витков	ℓ, см	S, см <sup>2</sup>	f, Гц	В, Тл
1	15	70	100	1400	55	6	50	1,5
2	10	80	80	1300	60	4	60	1,4
3	15	60	70	1200	65	5,5	80	1,6
4	12	50	50	1100	70	6	50	1,4
5	20	60	60	1000	75	4,5	90	1,5
6	10	50	25	900	80	5	50	1,45
7	25	25	75	800	85	3,5	60	1,5
8	30	35	30	700	90	4	150	1,6
9	40	40	80	600	95	3	100	1,55
0	35	25	70	500	100	2	50	1,45

Примечание: ℓ - длина средней линии магнитопровода.

### Задача 3. Расчет электрического поля в проводящей среде

На рис. 4 показан полушаровой электрод, радиус которого равен  $r=a$ . Электрод предназначен для заземления металлической опоры линии электропередачи постоянного тока. Ток короткого замыкания линии стекает через заземлитель в землю и растекается по толще земли. Земля исполняет роль обратного провода для линии электропередачи. Удельная проводимость земли  $\gamma=10^{-2}$  См/м.

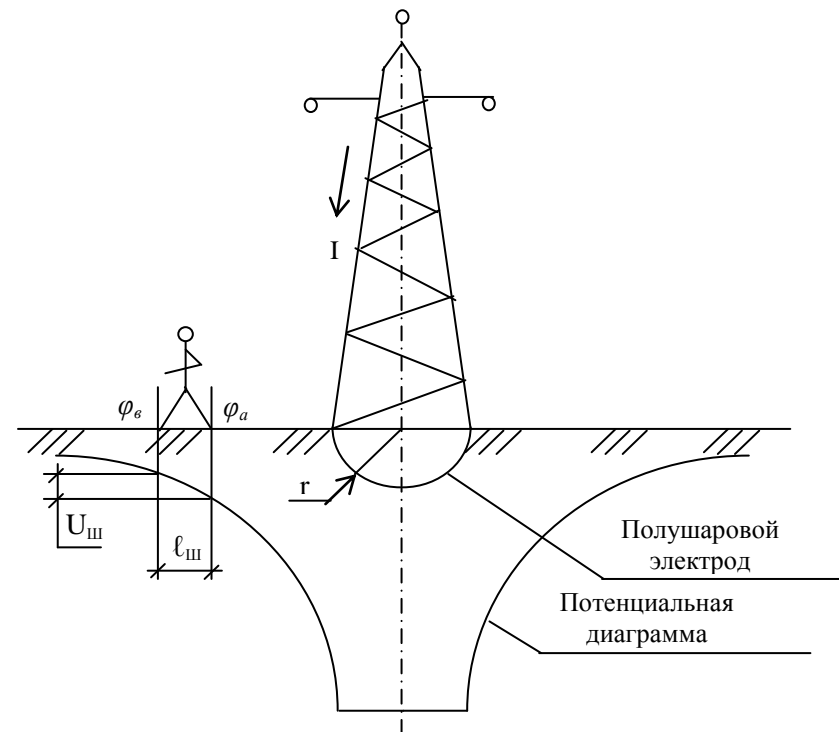


Рис. 4. Схема безопасной зоны

Определить:

1. Плотность тока на расстоянии  $a_1$  от центра полушарового электрода.
2. Напряженность поля  $E$  на поверхности полусферы радиуса  $a_1$ .
3. Сопротивление заземления полушарового электрода.

4. Значение потенциалов в точках на поверхности земли на расстояниях  $a_1, a_2, a_3, a_4$  от центра полушарового электрода.

5. Шаговое напряжение на тех же расстояниях  $a_1, a_2, a_3, a_4$  от центра полушарового электрода, принимая среднюю длину шага  $\ell = 0,8m = \ell_{ш}$

6. Опасную зону, т.е. радиус круга на поверхности земли с центром, совпадающим с центром электрода. Радиус опасной зоны определить из условия техники безопасности, принимая во внимание, что шаговое напряжение на границе этой зоны не превышает 150 В. Численные данные приведены в таблице 6. Номер варианта выбирается так: по последней цифре выбирается  $a, I$ , а по предпоследней –  $a_1, a_2, a_3, a_4$ .

Таблица 6.

Номера вариантов	Выбирается по последней цифре шифра студента		Выбирается по предпоследней цифре шифра студента			
	$a, \text{ см}$	$I, \text{ А}$	$a_1, \text{ см}$	$a_2, \text{ см}$	$a_3, \text{ см}$	$a_4, \text{ см}$
1	20	1000	25	120	500	1000
2	25	800	30	120	400	800
3	30	750	35	130	500	1000
4	25	900	30	120	400	800
5	30	1100	35	130	500	1000
6	35	1200	40	130	400	800
7	30	900	35	200	400	1100
8	25	1000	30	110	300	800
9	20	800	35	120	400	1000
0	30	1000	40	130	400	800

### Методические указания к задаче 1

Расчет ведем по методу двух узлов.

Для определения магнитных потоков магнитную цепь разбивают на однородные участки, имеющие одинаковое поперечное сечение вдоль всей длины. Определяют длины  $l_k$  и поперечные сечения  $S_k$  в квадратных метрах. После этого составляют электрическую схему замещения (рис.5).

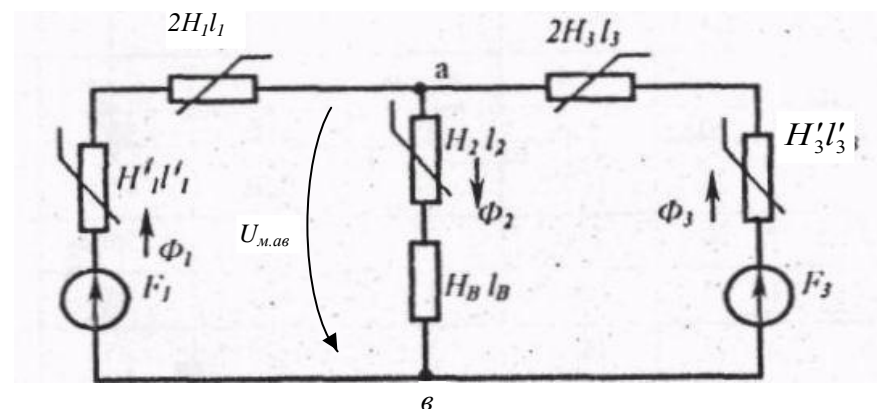


Рис.5. Схема замещения магнитной цепи

На этой схеме сразу обозначают магнитные напряжения  $U_{мк} = H_k \cdot \ell_k$  вместо нелинейных магнитных сопротивлений. При этом сопротивления нижних и верхних участков магнитопровода объединяют в одно ввиду одинаковости сечений. По закону Ома для участка цепи составляют уравнения (с левой стороны), считая потенциал второй узловой точки равной нулю.

$$\left. \begin{aligned} U_{м.ав} + 2H_1 \cdot \ell_1 + H'_1 \cdot \ell'_1 &= F_1; \\ U_{м.ав} - H_B \cdot \ell_B - H_2 \cdot \ell_2 &= 0; \\ U_{м.ав} + H'_3 \cdot \ell'_3 + 2H_3 \cdot \ell_3 &= F_3 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} U_{м.ав} &= F_1 - 2H_1 \cdot \ell_1 - H'_1 \cdot \ell'_1; \\ U_{м.ав} &= H_1 \cdot \ell_1 + H_B \cdot \ell_B; \\ U_{м.ав} &= F_3 - 2H_3 \cdot \ell_3 - H'_3 \cdot \ell'_3; \end{aligned} \right\}$$

Из этих уравнений получают зависимости магнитного напряжения  $U_{м.ав}$  от напряженностей  $H$  в каждом стержне в предположении о том, что каждый стержень работает самостоятельно (с правой стороны). Далее, задаваясь значениями магнитного потока  $\Phi$ , находят магнитные индукции  $B$  на каждом участке. По значениям индукции по кривой намагничивания находят значения напряженности магнитного поля  $H$ . Подставив их значения в уравнения, получают величину  $U_{м.ав}$ . Для воздушного зазора напряженность определяют исходя из выражения  $B = \mu_0 H$ , считая что индукция в зазоре равна индукции в стержне. Результаты вычислений заносят в таблицы (для каждого стержня своя таблица).

По данным таблиц строят зависимости  $\Phi = f(U_{м.ав})$ . На основании того, что по первому закону Кирхгофа для магнитных цепей  $\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2$ , строят вспомогательную кривую  $\Phi_1 + \Phi_3$ . Точка пересечения этой кривой с кривой  $\Phi_2$  дает рабочую точку, т.е. значения  $U_{м.ав}, \Phi_1, \Phi_3, \Phi_2$ , что и требовалось.

Результаты графического расчета проверяют по соответствующим уравнениям.

### Методические указания к задаче 2

Рассмотрим расчет цепи переменного тока, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником (рис.6). Числовые данные приведены в табл.7.

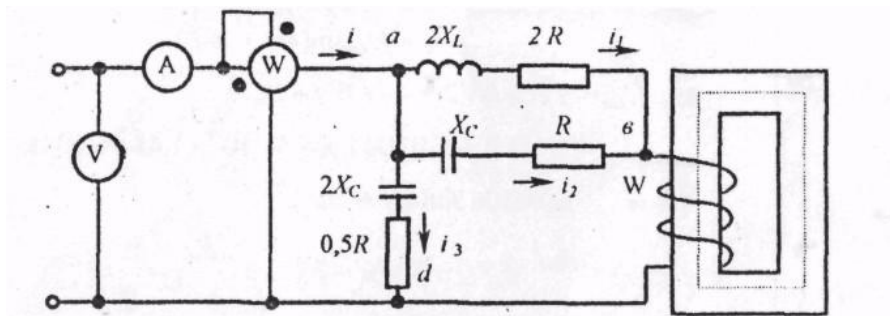


Рис. 6. Расчетная схема

Таблица 7

R, Ом	X <sub>L</sub> , Ом	X <sub>C</sub> , Ом	w, число витков	l, см	S, см <sup>2</sup>	f, Гц	B <sub>m</sub> , Тл
55	20	40	1100	70	5,0	60	1,48

1. Определим коэффициенты а и b аппроксимирующего выражения  $H=aB+bB^3$ . Выберем по кривой  $B=f(H)$  две точки:

$$H_1=250\text{А/м}, B_1=1\text{Тл};$$

$$H_2=1000\text{А/м}, B_2=1,4\text{Тл};$$

Запишем систему уравнений:

$$H_1=aB_1+bB_1^3,$$

$$H_2=aB_2+bB_2^3$$

Подставив числовые данные получим:

$$250=a+b,$$

$$1000=a1,4+b1,4^3$$

Решив полученную систему, получим:

$$a=-234 \quad \text{и} \quad b=484.$$

Искомая зависимость имеет вид:

$$H=-234B+484B^3$$

2. Определим закон изменения напряжения и тока источника

Магнитная индукция изменяется по закону

$$B=B_m \sin \omega t = 1,48 \sin \omega t.$$

Напряжение в катушке –

$$u_k = U_{km} \sin(\omega t + \pi/2),$$

$$\text{где } U_{km} = \sqrt{2} \cdot U_k = \sqrt{2} \cdot 4,44 w f S B_m = 1,41 \cdot 4,44 \cdot 1100 \cdot 60 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,48 = 306\text{В}.$$

$$\text{Тогда } u_k = 306 \sin(\omega t + \pi/2), \text{ В}$$

Мгновенное значение тока катушки определяем из закона полного тока:

$$i_k = \frac{Hl}{w} = \frac{(-234B + 484B^3)0,7}{1100} = -0,149B + 0,308B^3 =$$

$$= -0,149 \cdot 1,48 \sin \omega t + 0,308 \cdot 1,48^3 \sin^3 \omega t = -0,22 \sin \omega t +$$

$$+ 0,308 \cdot 1,48^3 \left( \frac{3 \sin \omega t - 3 \omega t}{4} \right) = 0,53 \sin \omega t - 0,25 \sin 3 \omega t, \text{ А}.$$

Комплексные сопротивления участка ab для первой  $\underline{Z}_{ab}^{(1)}$  и третьей

$\underline{Z}_{ab}^{(3)}$  гармоник –

$$\underline{Z}_{ab}^{(1)} = \frac{(2R + j2X_L)(R - jX_C)}{2R + j2X_L + R - jX_C} =$$

$$= \frac{(110 + j40)(55 - j40)}{110 + j40 + 55 - j55} = 48e^{-j15^\circ 47'} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{ab}^{(3)} = \frac{(2R + j6X_L)(R - jX_C/3)}{2R + j6X_L + R - jX_C/3} =$$

$$= \frac{(110 + j120)(55 - j13,3)}{110 + j120 + 55 - j13,3} = 47e^{j1^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексное сопротивление участка ad –

$$\underline{Z}_{ad}^{(1)} = \frac{R}{2} - j \frac{X_C}{2} = 27,5 - j20 = 34e^{-j36^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{ad}^{(3)} = \frac{R}{2} - j \frac{X_C}{6} = 27,5 - j6,67 = 28,3e^{-j13^\circ 38'} \text{ Ом}.$$

Напряжение на участке ab –

$$u_{ab} = 48 \cdot 0,53 \sin(\omega t - 15^\circ 47') - 47 \cdot 0,25 \sin(3\omega t + 1^\circ) = 25,4 \sin(\omega t - 15^\circ 47') - 11,754 \sin(3\omega t + 1^\circ) \text{ В}.$$

Напряжение источника –

$$u = u_{ad} = u_k + u_{ab} = 306 \sin(\omega t + 90^\circ) - 11,754 \sin(3\omega t + 1^\circ) + 25,4 \sin(\omega t - 15^\circ 47') \text{ В}.$$

Комплексная амплитуда первой гармоники напряжения –

$$\dot{U}_m^{(1)} = 306e^{j90^\circ} + 25,44e^{-j15^\circ 47'} = j306 + 24,5 - j6,9 = 300e^{j85^\circ 19'} \text{ В}.$$

В результате напряжение источника

$$u = 300 \sin(\omega t + 85^\circ 19') - 11,754 \sin(3\omega t + 1^\circ) \text{ В}$$

Ток на участке ad –

$$\dot{I}_{adm}^{(1)} = \frac{\dot{U}_{adm}^{(1)}}{\underline{Z}_{ad}^{(1)}} = \frac{300e^{j85^\circ 19'}}{34e^{-j36^\circ}} = 8,82e^{j121^\circ 19'} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{adm}^{(3)} = \frac{\dot{U}_{adm}^{(3)}}{\underline{Z}_{ad}^{(3)}} = \frac{11,75e^{j1^\circ}}{28,3e^{-j13^\circ 38'}} = 0,415e^{j14^\circ 38'} \text{ А}.$$

Ток источника –

$$i = i_k + i_{ad} = 0,53 \sin \omega t - 0,25 \sin(3\omega t + 8,82 \sin(\omega t + 121^\circ 19') - 0,415 \sin(3\omega t + 14^\circ 38')) \text{ А}.$$

Комплексные амплитуды тока источника –

$$\dot{I}_m^{(1)} = 0,53e^{j0^\circ} + 8,82e^{j121^\circ} = 8,56e^{j115^\circ 16'} \text{ А},$$

$$\dot{I}_m^{(3)} = 0,25e^{j0^\circ} + 0,415e^{j14^\circ 38'} = 0,658e^{j9^\circ 10'} \text{ А}.$$

Ток источника окончательно –

$$i = 8,56 \sin(\omega t + 118^\circ 16') + 0,658 \sin(3\omega t + 9^\circ 10') \text{ А}$$

3. Определение показаний вольтметра, амперметра и ваттметра.

Действующее значение напряжения источника –

$$U = \sqrt{\left(\frac{U_m^{(1)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_m^{(3)}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{\frac{300^2}{2} + \frac{11,75^2}{2}} = 212 \text{ В}.$$

Действующее значение тока источника –

$$I = \sqrt{\left(\frac{I_m^{(1)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_m^{(3)}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{\frac{8,56^2}{2} + \frac{0,658^2}{2}} = 6,08 \text{ А}$$

Активная мощность цепи –

$$\begin{aligned} P &= P^{(1)} + P^{(3)} = U^{(1)} I^{(1)} \cos \varphi^{(1)} + U^{(3)} I^{(3)} \cos \varphi^{(3)} = \\ &= \frac{300}{\sqrt{2}} \cdot \frac{8,56}{\sqrt{2}} \cos(-32^\circ 57') + \frac{11,75}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,658}{\sqrt{2}} \cos(-8^\circ 10') = \\ &= 1079 + 3,83 = 1082,83 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

### Методические указания к задаче 3

В данной задаче предлагается определить характеристики распределения потенциалов электрического поля на поверхности земли вокруг заземляющего устройства. Такая задача имеет практическое значение в схемах электроснабжения, например, в случае короткого замыкания проводов высокого напряжения с опорой.

Ток короткого замыкания, протекая по земле, как по обратному проводу, образует на поверхности земли электрическое поле. В задаче требуется определить основные характеристики этого поля.

Будем считать, что основание опоры представляет собой полушаровой электрод, радиус которого равен  $r=a$ . Поверхность соприкосновения полушарового электрода с землей равна  $S=2\pi a^2$ .

При возможном коротком замыкании ток короткого замыкания, проходящий через опору, будет отводиться в землю через заземлитель.

Плотность тока при этом будет равна отношению величины тока к поверхности электрода, через которую проходит этот ток:

$$\delta = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi a^2}$$

Применяя закон Ома в дифференциальной форме  $\delta = \gamma E$ , можно представить записанное уравнение в другом виде:



$$\gamma E = \frac{I}{2\pi a^2}$$

Из этого выражения находится напряженность электрического поля  $E$  на поверхности земли на расстоянии  $a$  от центра полушарового электрода:

$$E = \frac{I}{2\pi\gamma a^2}$$

Исходя из известного выражения, по которому находится напряженность электрического поля  $E$  на поверхности земли на расстоянии  $a=l$  от центра полушарового электрода,

$$\varphi_k = \int_{a_k}^{\infty} \bar{E} d\bar{a}$$

и принимая в качестве  $l$  расстояние  $a$ , получим после подстановки значения  $E$  и интегрирования следующее выражение для определения потенциала  $\varphi_k$  в рассматриваемых точках:

$$\varphi_k = \frac{I}{2\pi\gamma a_k}$$

Шаговое напряжение на расстоянии  $a_k$  от электрода может быть вычислено как разность потенциалов между точками, находящимися на расстоянии шага,  $l_{ш}$ ,

$$U_{шк} = \frac{I}{2\pi\gamma} \left[ \frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_k + l_{ш}} \right]$$

или

$$U_{шк} = \frac{I \cdot l_{ш}}{2\pi\gamma a_k (a_k + l_{ш})}$$

Радиус зоны опасности  $a_0$  можно найти из условия, что шаговое напряжение на границе этой зоны не превышает 150В, т.е.  $U_{шк}=U_{ш0}=150В$ .

Подставляя в это равенство значение шагового напряжения  $U_{ш0}$ , получим

$$\frac{I}{2\pi\gamma} \left[ \frac{1}{a_0} - \frac{1}{a_0 + l_{ш}} \right] \leq 150$$

Это выражение после преобразования можно представить в другом виде:

$$300\pi\gamma a_0^2 + 300\pi\gamma a_0 l_{ш} - I \cdot l_{ш} \geq 0$$

Отсюда определяется радиус опасной зоны  $a_0$ . Сопротивление заземления полушарового электрода можно найти по формуле

$$R = \frac{1}{2\pi\gamma a}$$

#### Список рекомендуемой литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд. – М.: Высш. шк., 1996. – 638 с.
2. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
3. Теоретические основы электротехники. Том II. Под ред. П.А. Ионкина – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1976. – 383 с.
4. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей. (Справочное пособие). – М.: Высш.шк., 1980. – 271 с.
5. Теоретические основы электротехники: В 3 ч. Ч.1. Атабеков Г.И. Линейные электрические цепи: Учебн. – 5-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 592 с.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2 т.: Учебн. Том 1. – 3-е изд. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
7. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей: Учебн. пособие. – М.: Высш. шк., 1980. – 271 с.
8. Сборник задач по теоретическим основам электротехники /Л.А. Бессонов и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 534 с.
9. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники /Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 567с.

Мошкин Владимир Иванович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Задания для выполнения  
контрольной работы № 4  
с методическими указаниями  
для студентов заочного обучения  
направления 650900 (специальность 100400)

Редактор Н.М. Кокина

---

Подписано к печати		Бумага тип. № 1
Формат 60x84 1/16	Усл. п.л.	Уч. изд. л.
Заказ	Тираж	Цена свободная

---

Издательство Курганского государственного университета.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25  
Курганский государственный университет, ризограф