

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный
университет путей сообщения»

Кафедра «Электротехника,
электроника, электромеханика»

Е.С. Гафиатулина

РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методическое пособие
к расчетно-графической работе по дисциплине
«Теоретические основы электротехники»

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2007

УДК 621.3.024
ББК 3 211.51 я 73
Г 245

Рецензенты:

Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроснабжение транспорта»
Дальневосточного государственного университета путей сообщения
П.С. Пинчуков

Гафиатулина, Е.С.

Г 245 Расчет разветвленной магнитной цепи постоянного тока : методическое пособие / Е. С. Гафиатулина. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. – 19 с. : ил.

Методическое пособие соответствуют ГОС ВПО направления 140200 «Электроэнергетика» специальностей 140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», 140204 «Электрические станции», 140205 «Электроэнергетические системы и сети», 140211 «Электроснабжение»; направления 190400 «Системы обеспечения движения поездов» специальностей 190401 «Электроснабжение железных дорог»; направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

В пособии содержатся варианты заданий на расчетно-графическую работу; приводятся необходимые теоретические сведения и излагается методика решения.

Данное пособие предназначается для студентов 2-го курса дневной и заочной форм обучения указанных специальностей, а также студентам специальностей, изучающих дисциплину «Основы теории цепей».

Отпечатано методом прямого репродуцирования.

**УДК 621.3.024.72 (075.8)
ББК 3 211.51 я 73**

© ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), 2007

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная цепь – это замкнутая система, электромагнитные процессы, в которой можно описать с помощью таких понятий как магнитодвижущая сила **F (МДС)**, магнитная индукция **B** и магнитный поток **Φ** . Основными элементами данной системы являются устройства, содержащие ферромагнитные тела, усиливающие внешнее магнитное поле.

Магнитные цепи в зависимости от вида намагничивающего тока классифицируются на цепи постоянного тока и переменного тока. Рассматриваемые цепи являются нелинейными цепями. Расчет таких цепей часто связан со значительными математическими трудностями. Это обусловлено тем, что, во-первых, процессы в таких цепях описываются системой нелинейных уравнений; во-вторых, характеристики магнитопровода получены опытным путем и не имеют точного аналитического выражения. В связи с этим основным методом расчета магнитных цепей постоянного тока является графоаналитический метод.

Цель настоящего методического пособия заключается в оказании помощи студентам в изучении этого сложного и важного раздела теоретических основ электротехники. Изложение ведется на примере однородной разветвленной магнитной цепи, содержащей источник постоянной **МДС**, возбуждающей различные магнитные потоки в ее ветвях. При решении данной задачи необходимо провести множество повторяющихся арифметических действий, поэтому автор данного пособия рекомендует при выполнении расчетно-графической работы использовать ЭВМ.

Задание на работу определяется студентом по трем цифрам присвоенного ему варианта. Номер схемы совпадает с третьей цифрой варианта, а численные значения параметров цепи выбираются по первой и второй цифре из приведенных таблиц. Перед началом работы советуем студенту изучить соответствующие разделы теории по конспекту лекций и рекомендуемой в конце пособия литературе.

1. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКУЮ РАБОТУ

Разветвленная магнитная цепь (рис. 1)¹ представляет собой трех-стержневой сердечник из листов электротехнической стали, кривая намагничивания которой представлена в табл. 1. Для этой цепи надо выполнить следующее:

1. Начертить эквивалентную схему магнитной цепи, указав на ней направление магнитных потоков и магнитодвижущих сил (**МДС**);
2. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для магнитной цепи;
3. Определить магнитные потоки в стержнях, магнитное напряжение и значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Размеры магнитной цепи на рис. 1 указаны в мм. В табл. 2 даны величины токов и число витков обмотки для каждого варианта.

Таблица 1

Кривая намагничивания

B , Тл	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
H , А/м	0	200	400	950	3 900	15 000

Примечание. При расчете цепи потоками рассеяния пренебречь.

Таблица 2

Числовые значения параметров цепи

Первая цифра варианта	I_1 , А	w_1 , число витков	Вторая цифра варианта	I_2 , А	w_2 , число витков
1	30	100	1	20	110
2	50	125	2	15	100
3	20	200	3	10	125
4	20	330	4	10	180
5	25	250	5	15	100
6	20	250	6	5	400
7	26	200	7	10	250
8	20	270	8	5	350
9	25	220	9	10	200
0	20	220	0	10	150

¹ Варианты схем опубликованы в [1].

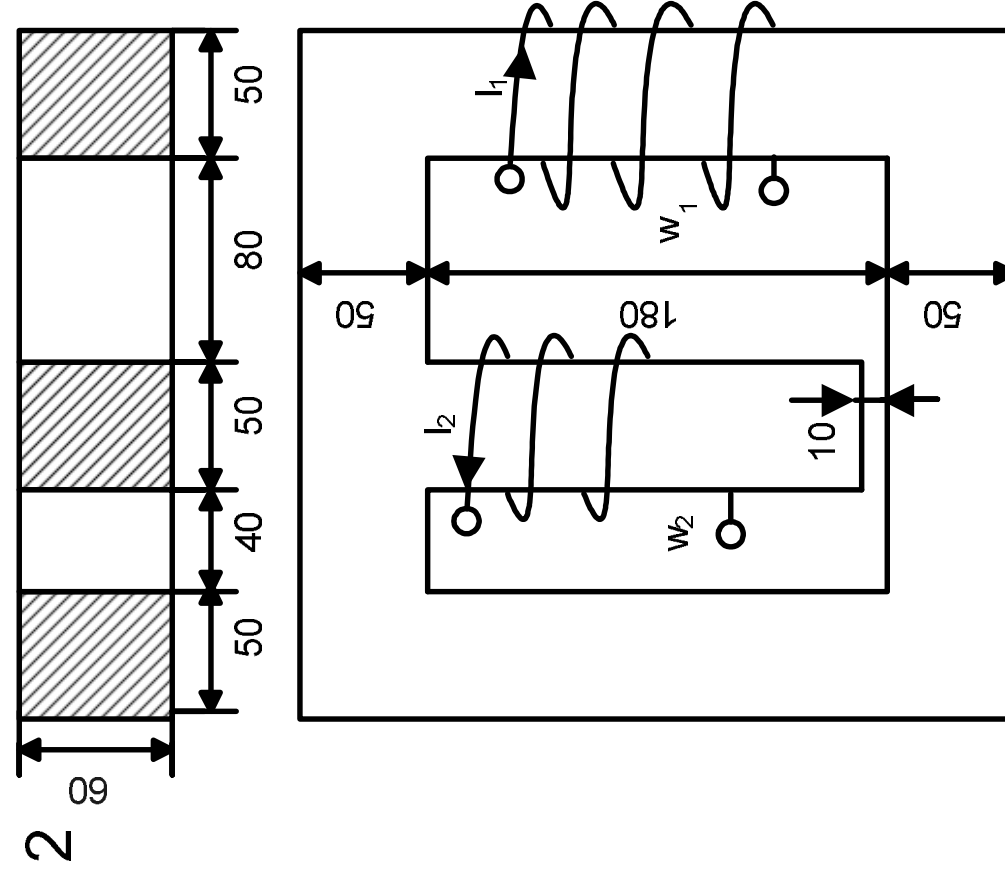
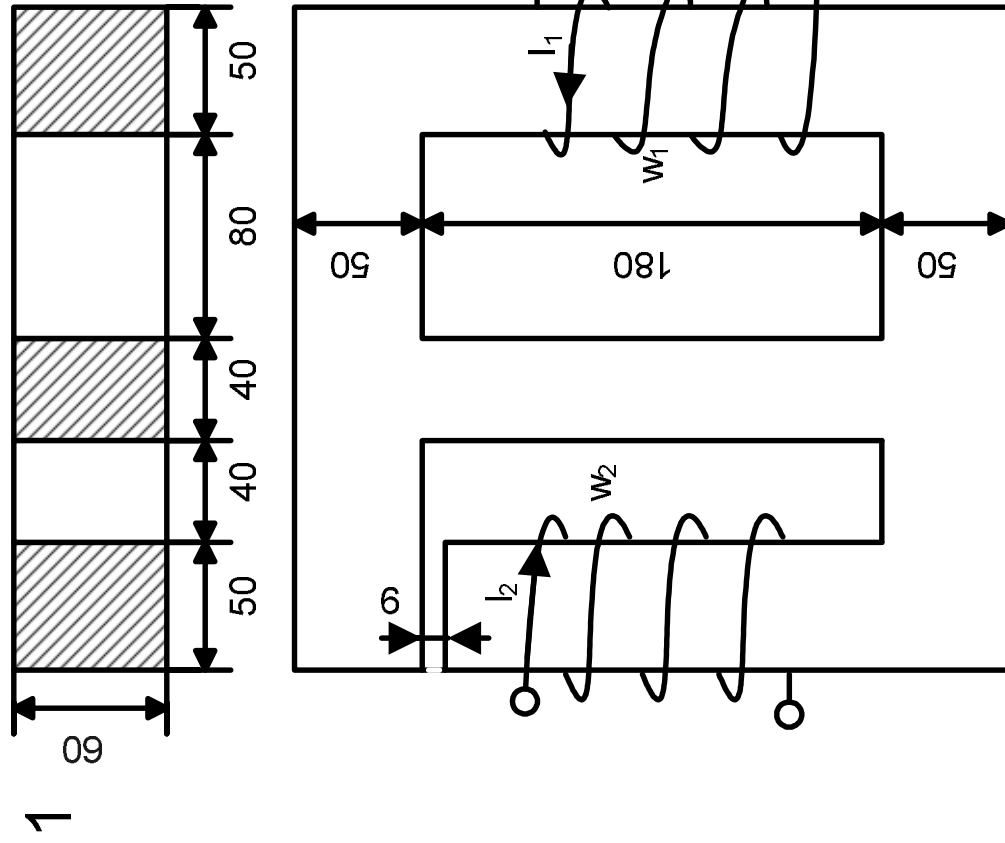


Рис.1. Варианты схем (см. также с. 6–9)

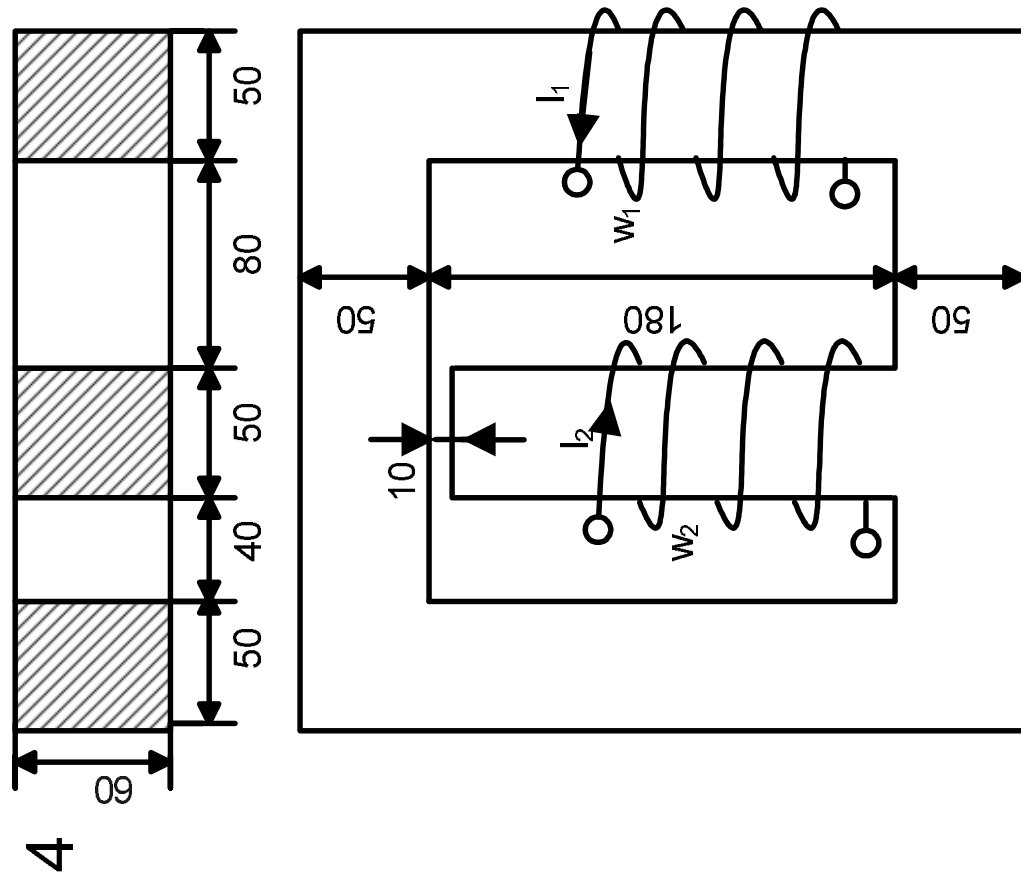
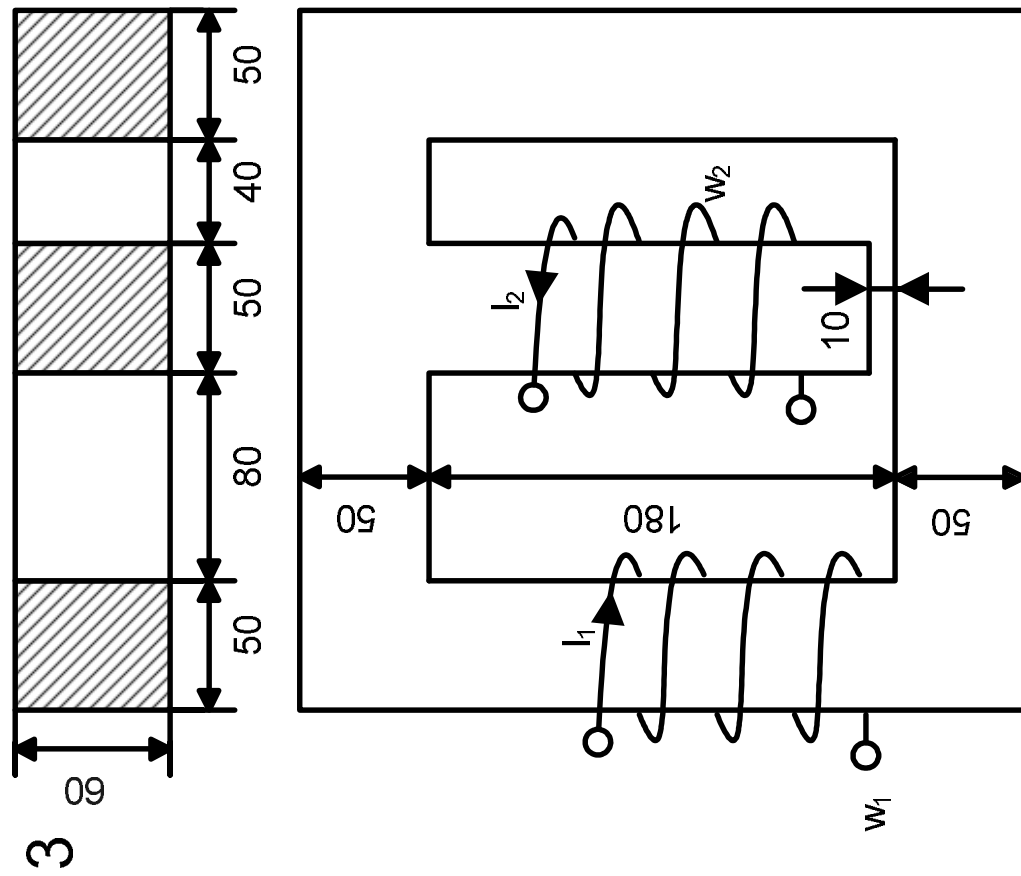


Рис.1. Продолжение

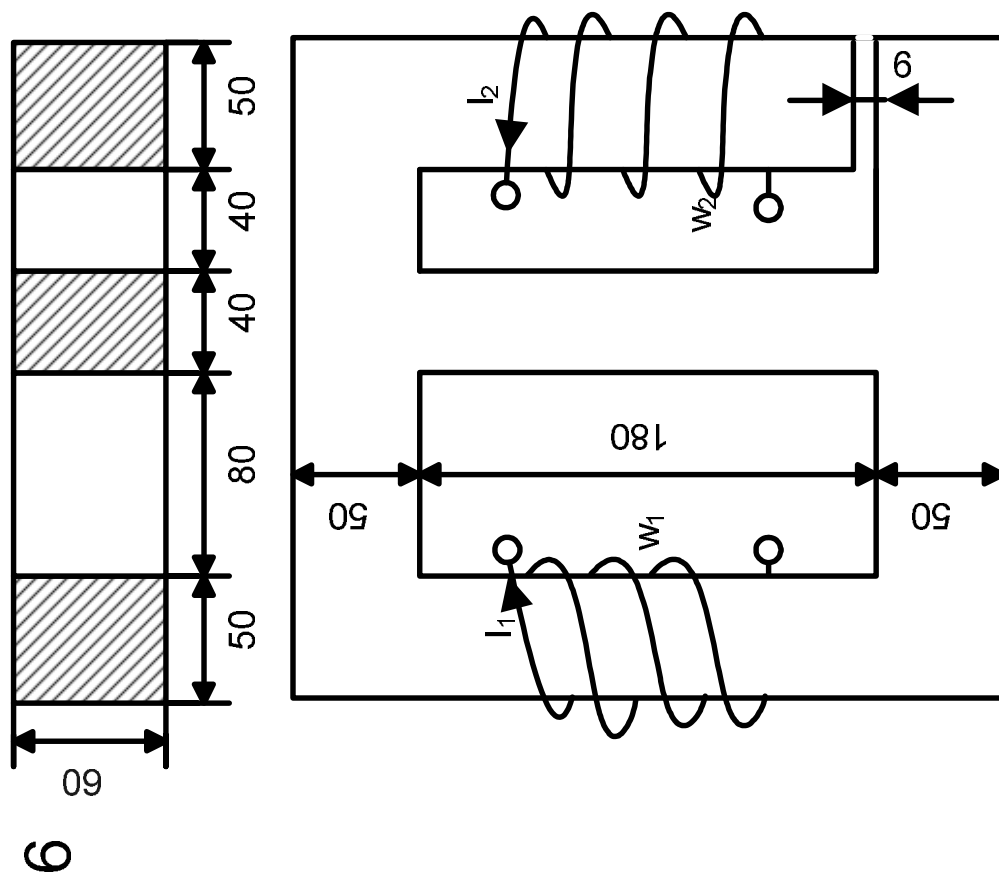
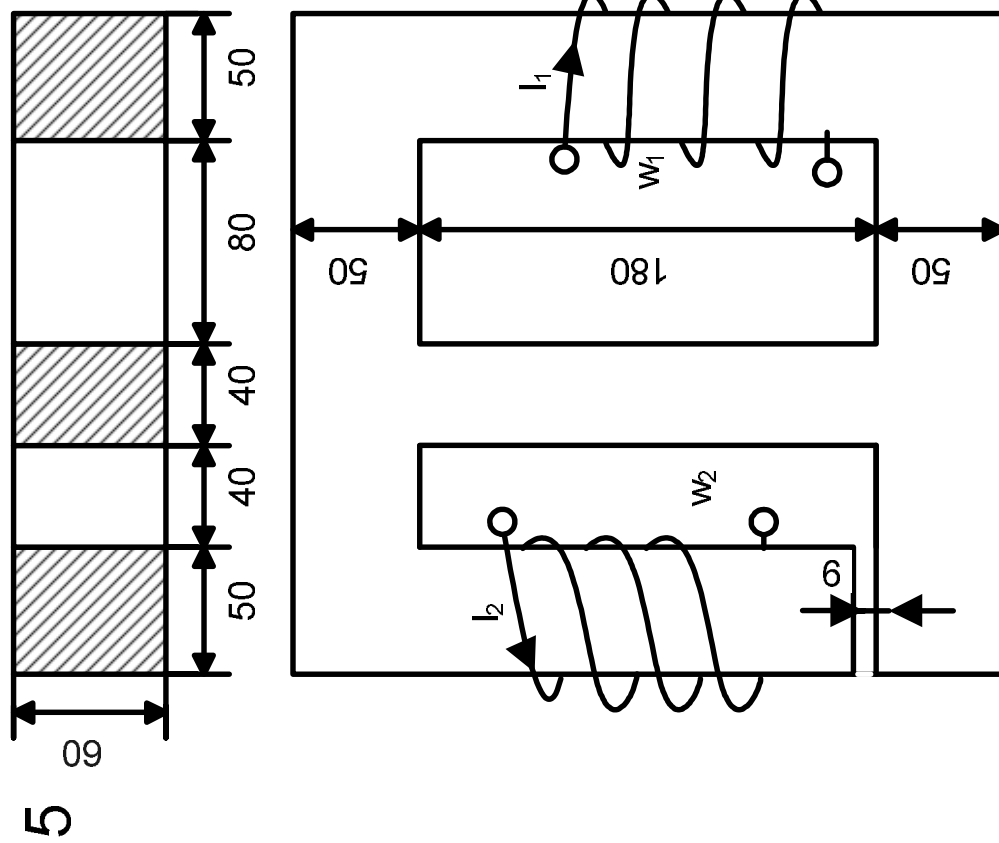


Рис.1. Продолжение

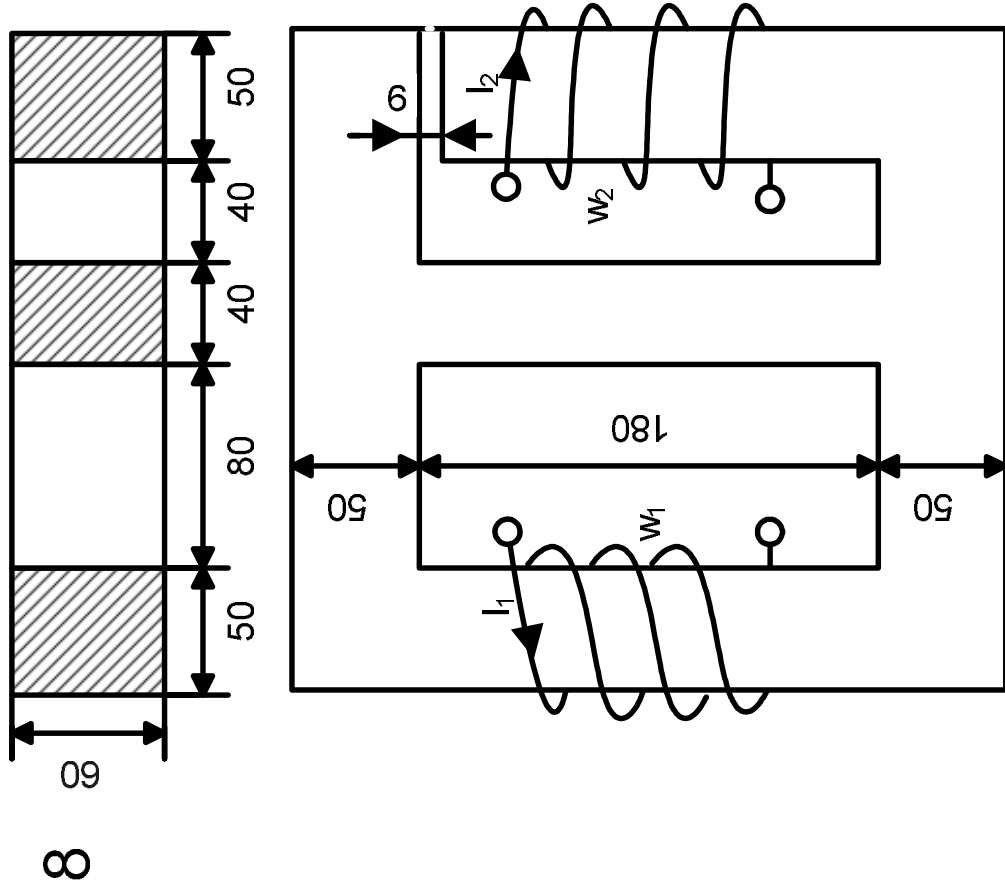
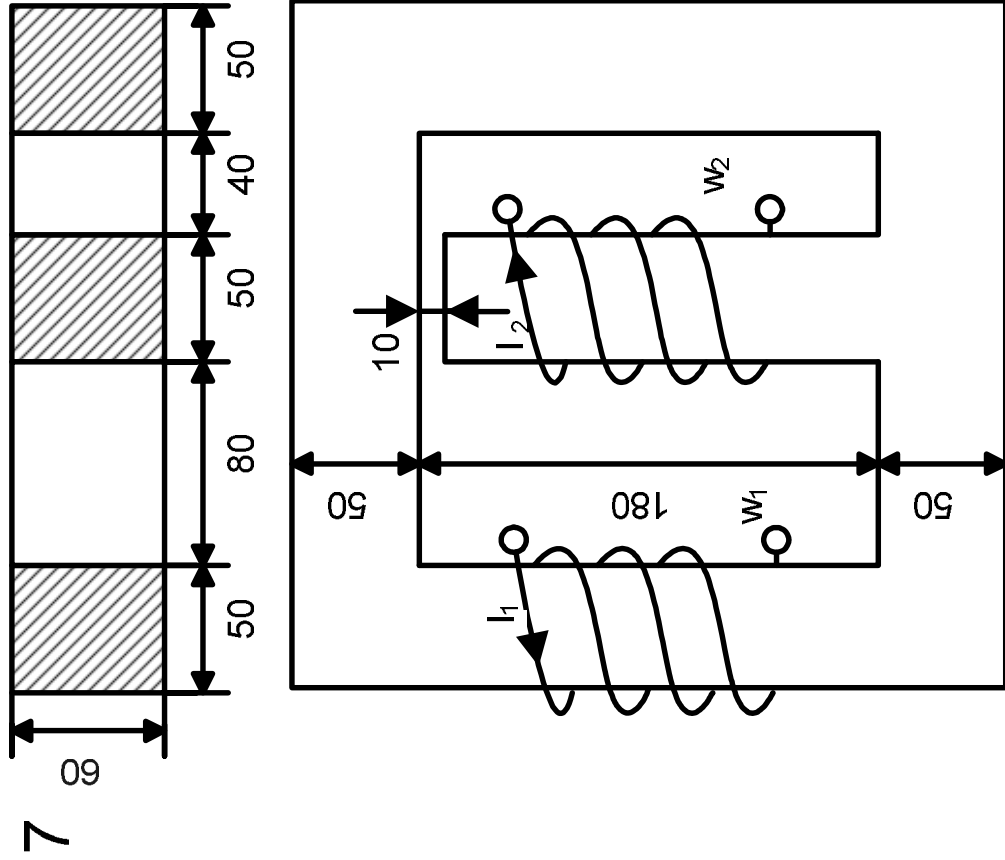


Рис.1. Продолжение

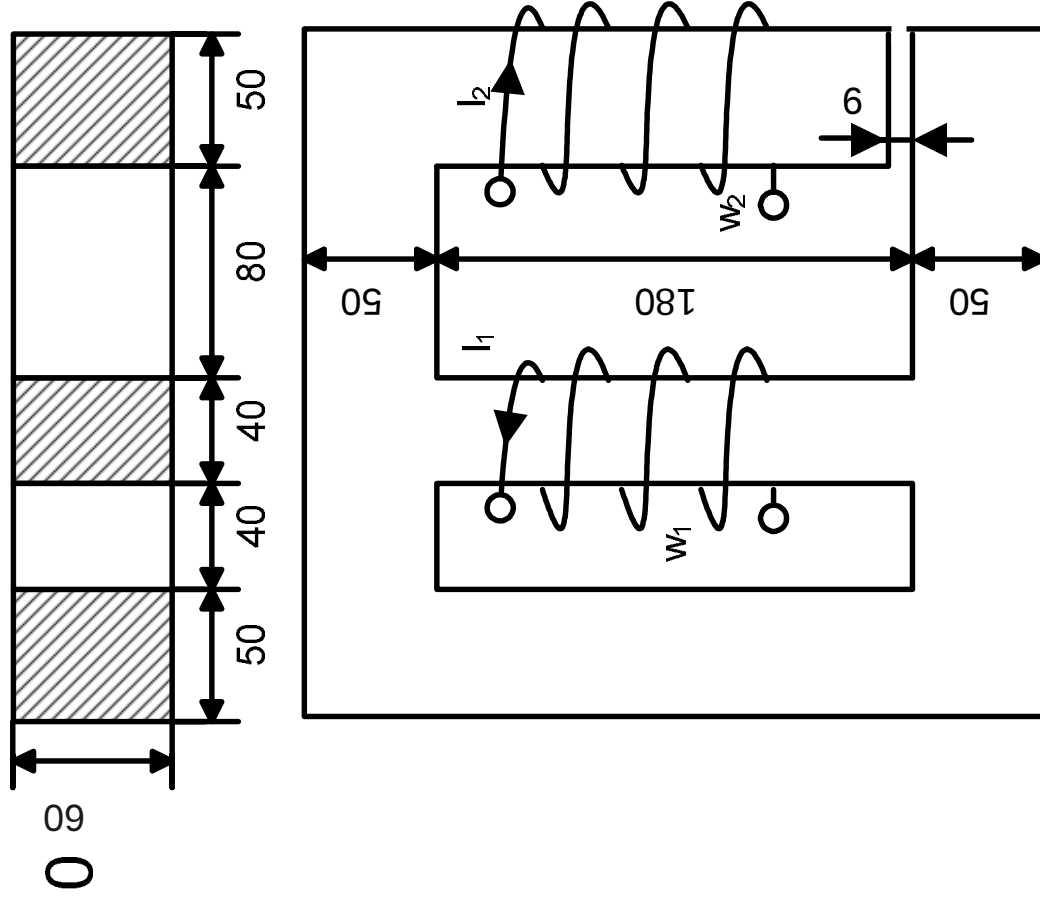
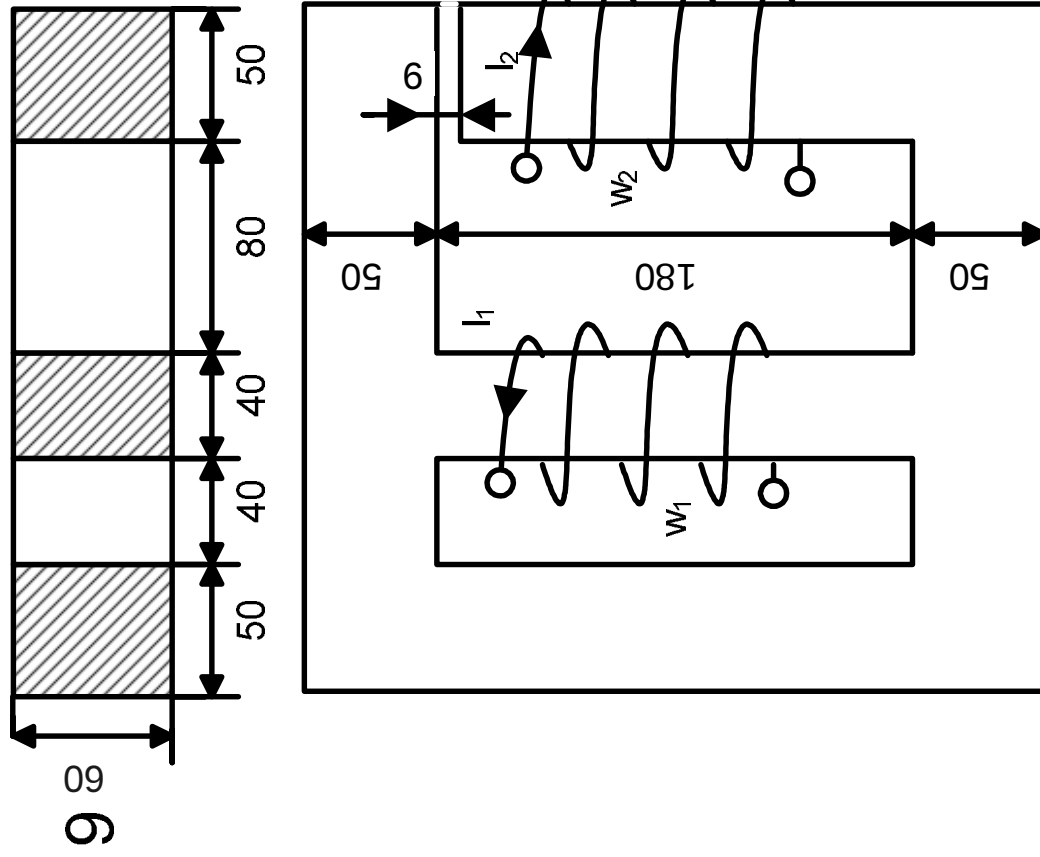


Рис.1. Окончание

2. РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет разветвленных магнитных цепей постоянного тока основанный на применении законов Кирхгофа для магнитных цепей содержит несколько этапов: 1) составление эквивалентных схем; 2) запись уравнений Кирхгофа для магнитной цепи; 3) решение полученной нелинейной системы уравнений.

2.1. Составление эквивалентной схемы

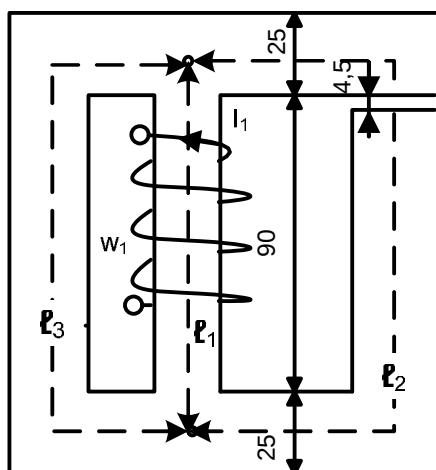


Рис. 2. Пример магнитной цепи

На рис. 2 приведен пример разветвленной однородной магнитной цепи. Размеры цепи указаны на рисунке в миллиметрах, а $I_1=10$ А, $w_1=200$

Данная магнитная цепь имеет два узла, обозначим их на эквивалентной схеме как **a** и **b**, три ветви, один воздушный зазор и один источник **МДС**, направление которой определяем по правилу правой руки (вытянутые пальцы правой руки направляем по току, протекающему по обмотке, а отогнутый на 90° большой палец покажет направление магнитодвижущей силы). В данном случае **МДС** направлена вниз.

Эквивалентная схема будет представлять собой три параллельно соединенные ветви (рис. 3). Первая ветвь состоит из последовательно соединенных источника **МДС** $F_1=I_1w_1$, нелинейного сопротивления R_{1M} ; вторая – нелинейного сопротивления R_{2M} , и линейного сопротивления R_B ;

третья содержит нелинейное сопротивление R_{3M} (рис.3). Сопротивления R_{1M} , R_{2M} , R_{3M} характеризуют сопротивление участков магнитопровода, а R_B – сопротивление воздушного зазора.

На эквивалентной схеме покажем направление магнитных потоков: магнитный поток Φ_1 совпадает по направлению с магнитодвижущей силой F_1 и направлен от узла **a**, Φ_2 и Φ_3 пусть будут направлены к узлу **a**.

Обозначим магнитное напряжение между узлами **b** и **a**, как U_{Mba} и покажем его направление на эквивалентной схеме.

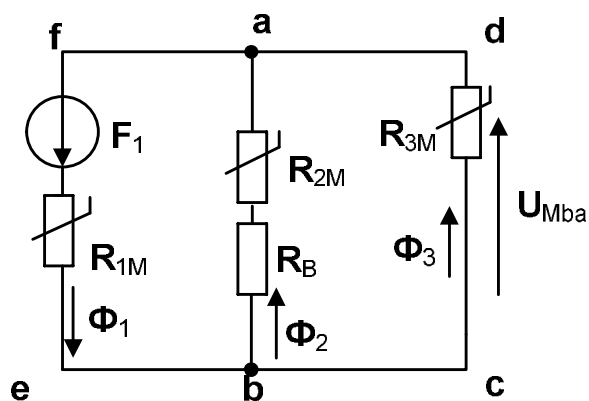


Рис. 3. Эквивалентная схема магнитной цепи

2.2. Законы Кирхгофа для магнитной цепи

При расчете магнитных цепей используют так называемые первый и второй законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи: Алгебраическая сумма магнитных потоков Φ_k в узле равна нулю

$$\sum \Phi_k = 0.$$

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи: Алгебраическая сумма **МДС** ($\sum I_k w_k$) в контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений ($\sum H_k \ell_k$) в этом же контуре

$$\sum I_k w_k = \sum H_k \ell_k,$$

где I_k – намагничивающий ток, w_k – количество витков катушки, H_k – напряженность магнитного поля k-го участка, ℓ_k – длина средней линии. Магнитное напряжение U_{mk} на участке магнитной цепи определяется как:

$$U_{mk} = H_k \ell_k.$$

Согласно [2-4] для расчета электрической цепи непосредственно по законам Кирхгофа надо составить по первому закону на одно уравнение меньше, чем узлов, а по второму – количество ветвей минус количество уравнений, составленных по первому закону. Этим правилом будем пользоваться и для расчета магнитной цепи. Поскольку цепь содержит два узла и три ветви, то по первому закону надо составить одно уравнение, по второму – два.

Составляем уравнения.

Примем, что втекающие магнитные потоки будут записаны со знаком минус, а вытекающие – с плюсом. Тогда для узла **a** по первому закону Кирхгофа для магнитной цепи получаем:

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0.$$

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров **afebcda** и **abcda**. Обход контура и в том и в другом случае выбираем против обхода часовой стрелки.

$$\text{afebcda: } F_1 = H_1 \ell_1 + U_{Mba}$$

$$\text{abcda: } 0 = -H_2 \ell_2 - H_0 \ell_0 + U_{Mba},$$

$$U_{Mba} = H_3 \ell_3.$$

где $H_1, H_2, H_3, H_0, \ell_1, \ell_2, \ell_3, \ell_0$ – напряженности магнитного поля и средние линии участков магнитной цепи, соответственно, первой, второй, третьей ветвей магнитопровода и воздушного зазора, $F_1 = I_1 w_1$ – магнитодвижущая сила.

Полученная система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \\ I_1 w_1 = H_1 \ell_1 + U_{\text{Mba}} \\ 0 = -H_2 \ell_2 - H_0 \ell_0 + U_{\text{Mba}} \\ U_{\text{Mba}} = H_3 \ell_3. \end{cases}$$

2.3. Решение нелинейной системы уравнений

Полученная в пункте 2.2. система нелинейных уравнений может быть решена графоаналитическим методом. Для этого необходимо будет построить зависимости магнитных потоков от магнитного напряжения U_{Mba} : $\Phi_1 = f(U_{\text{Mba}})$, $\Phi_2 = f(U_{\text{Mba}})$, $\Phi_3 = f(U_{\text{Mba}})$. Поскольку по первому закону Кирхгофа $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$, то необходимо будет построить и суммарную кривую магнитных потоков Φ_2 и Φ_3 при одних и тех же значениях магнитного напряжения U_{Mba} . Точка пересечения суммарной кривой и $\Phi_1 = f(U_{\text{Mba}})$ определит значения магнитного потока Φ_1 и магнитного напряжения U_{Mba} . Зная значения U_{Mba} , по построенным кривым $\Phi_2 = f(U_{\text{Mba}})$ и $\Phi_3 = f(U_{\text{Mba}})$ можно определить магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 .

Прежде чем строить необходимые зависимости надо выполнить следующее:

1. Определить площади поперечного сечения участков магнитопровода

$$S_1 = 30 \cdot 20 = 600 \text{ мм}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$S_2 = S_3 = 30 \cdot 25 = 750 \text{ мм}^2 = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

В дальнейшем все вычисления будем производить в единицах системы СИ;

2. На рис. 2 наметить среднюю линию и определить длины ее участков.

$$\ell_1 = \frac{0,025}{2} + 0,09 + \frac{0,025}{2} = 0,115 \text{ м}$$

$$\ell_2 = \left(\frac{0,02}{2} + 0,04 + \frac{0,025}{2} + \frac{0,025}{2} \right) \cdot 2 + 0,09 - 0,0045 = 0,2355 \text{ м}$$

$$\ell_3 = \left(\frac{0,02}{2} + 0,02 + \frac{0,025}{2} + \frac{0,025}{2} \right) \cdot 2 + 0,09 = 0,2 \text{ м}$$

$$\ell_0 = 0,0045 \text{ м}.$$

3. Вычислить:

3.1. Магнитодвижущую силу $F_1 = I_1 w_1 = 10 \cdot 200 = 2000 \text{ А}$;

3.2. Напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 8 \cdot 10^5 B_0, \text{ А/м } (\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} - \text{магнитная постоянная});$$

3.3. Произведение $H_0 \ell_0 = 8 \cdot 10^5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} B_0 = 3600 B_0, \text{ А}$.

4. По табличным данным (табл. 1) построить кривую намагничивания (рис. 4).

5. Из уравнений составленных по второму закону Кирхгофа для магнитных цепей $I_1 w_1 = H_1 \ell_1 + U_{\text{Mba}}$ и $0 = -H_2 \ell_2 - H_0 \ell_0 + U_{\text{Mba}}$ выразить магнитное напряжение между узлами **b** и **a**.

$$U_{\text{Mba}} = I_1 w_1 - H_1 \ell_1$$

$$U_{\text{Mba}} = H_2 \ell_2 + H_0 \ell_0$$

6. Вычислить для заданных значений потоков Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 магнитные напряжения U_{Mba} .

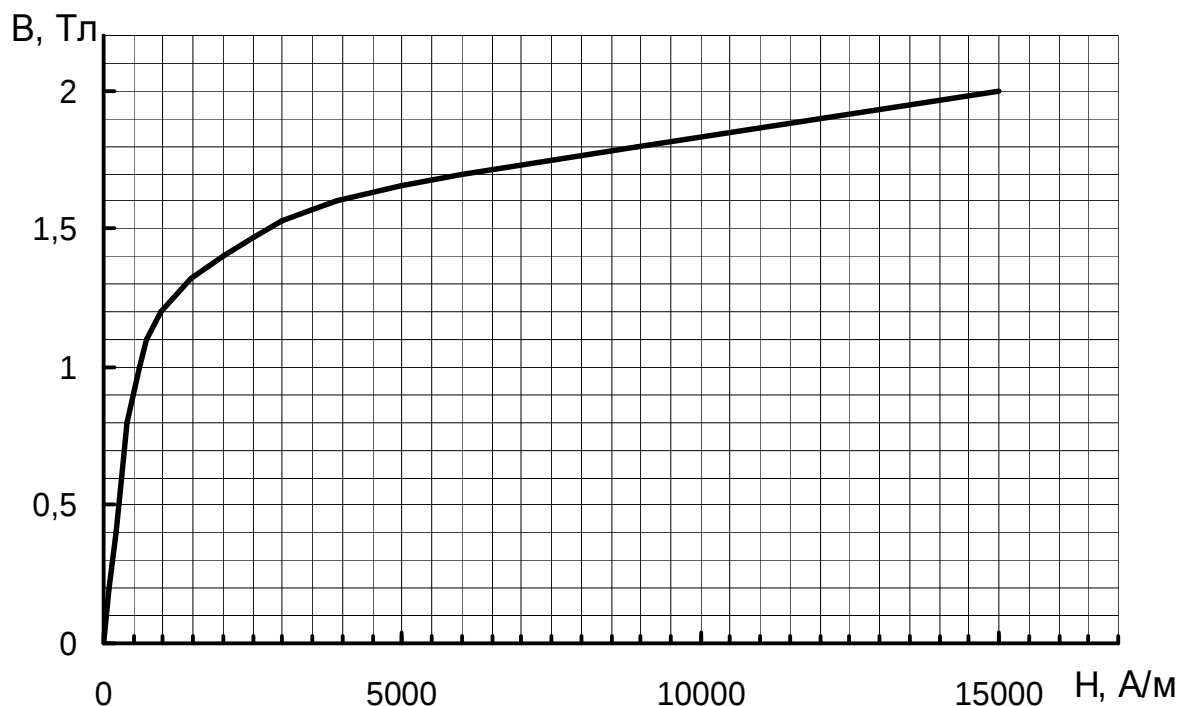


Рис. 4. Кривая намагничивания

Для этого зададимся рядом значений магнитной индукции **B**, тогда магнитные потоки в ветвях определим по формуле $\Phi = B \cdot S$. Для данной схемы при одних и тех же значениях магнитной индукции **B** магнитные потоки во второй и третьей ветви равны $\Phi_2 = \Phi_3$, т.к. равны площади поперечного сечения магнитопровода в соответствующих ветвях.

Далее для каждого заданного значения **B** по кривой намагничивания (рис. 4) определим напряженность магнитного поля магнитопровода **H**. По известным значениям напряженности магнитного поля **H** вычислим магнитное напряжение U_{Mba} для различных потоков.

Например, при магнитной индукции **B**=0,4 Тл, напряженность магнитного поля равна **H**=200 А/м (см. рис. 4).

Вычислим сначала магнитные потоки:

$$\Phi_1 = B_1 \cdot S_1 = 0,4 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб} = 0,24 \text{ мВб},$$

$$\Phi_2 = \Phi_3 = B_2 \cdot S_2 = 0,4 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Вб} = 0,3 \text{ мВб}.$$

Магнитное напряжение на участках магнитопровода для различных потоков определяем как:

$U_{Mba}=I_1 w_1 - H_1 l_1 = 2000 - 200 \cdot 0,115 = 1977 \text{ А}$ – для магнитного потока Φ_1 ,
 $U_{Mba}=H_2 l_2 + H_0 l_0 = H_2 l_2 + 3600 B_0 = 200 \cdot 0,2355 + 3600 \cdot 0,4 = 1487,1 \text{ А}$ – для Φ_2
 $U_{Mba}=H_3 l_3 = 200 \cdot 0,2 = 40 \text{ А}$ – для Φ_3 .

Результаты вычислений представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Расчетные данные для построения зависимости $\Phi_1(U_{Mba})$

B_1 , Тл	H_1 А/м	$H_1 l_1$, А	$U_{Mba}=I_1 w_1 - H_1 l_1$, А	Φ_1 , мВб
0	0	0	2 000	0
0,2	25	2,875	1 997,1	0,12
0,4	200	23	1 977	0,24
0,6	300	34,5	1 965,5	0,36
0,8	400	46	1 954	0,48
1	550	63,25	1 936,8	0,6
1,2	950	109,25	1 890,8	0,72
1,3	1 400	161	1 839	0,78
1,6	3 900	448,5	1 551,5	0,96
2	15 000	1 725	275	1,2

Таблица 4

Расчетные данные для построения зависимости $\Phi_2(U_{Mba})$

$B_2=B_0$, Тл	H_2 А/м	$H_0 l_0$, А	$H_2 l_2$, А	$U_{Mba}=H_2 l_2 + H_0 l_0$, А	Φ_2 , мВб
0	0	0	0	0	0
0,2	25	720	5,8875	725,89	0,15
0,4	200	1 440	47,1	1 487,1	0,3
0,6	300	2 160	70,65	2 230,7	0,45
0,8	400	2 880	94,2	2 974,2	0,6
1	550	3 600	129,53	3 729,5	0,75
1,2	950	4 320	223,73	4 543,7	0,9
1,3	1 400	4 680	329,7	5 009,7	0,975
1,6	3 900	5 760	918,45	6 678,5	1,2
2	15 000	7 200	3 532,5	10 733	1,5

Таблица 5

Расчетные данные для построения зависимости $\Phi_3(U_{Mba})$

B_3 , Тл	H_3 А/м	$U_{Mba}=H_3 l_3$, А	Φ_3 , мВб
0	0	0	0
0,2	25	5	0,15
0,4	200	40	0,3
0,6	300	60	0,45
0,8	400	80	0,6
1	550	110	0,75
1,2	950	190	0,9
1,3	1 400	280	0,975
1,6	3 900	780	1,2
2	15 000	3 000	1,5

На основании результатов вычислений, представленных в табл. 3–5, строим зависимости $\Phi_1=f(U_{Mba})$, $\Phi_2=f(U_{Mba})$, $\Phi_3=f(U_{Mba})$ (рис.5) и суммарную кривую $\Phi(U_{Mab})=(\Phi_3+\Phi_2)(U_{Mba})$.

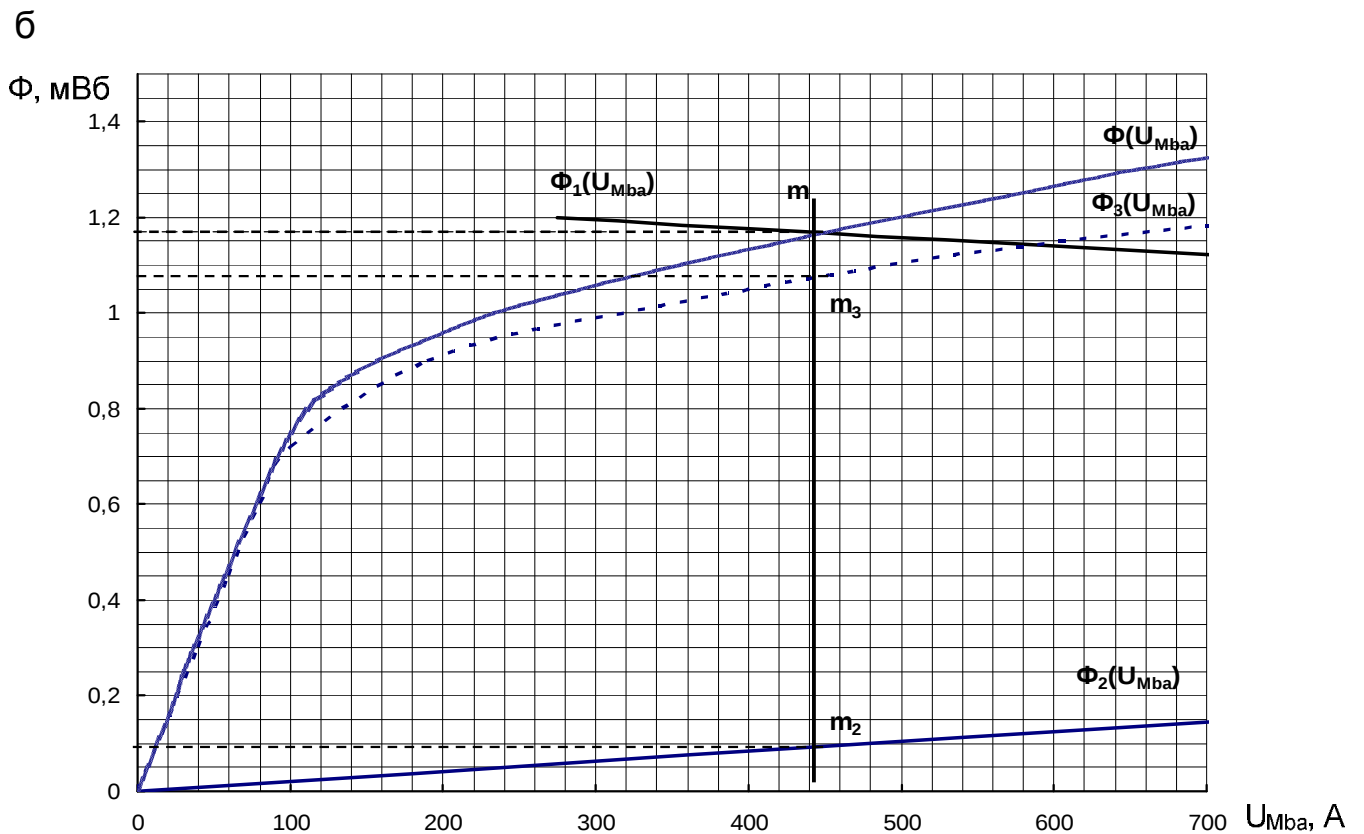
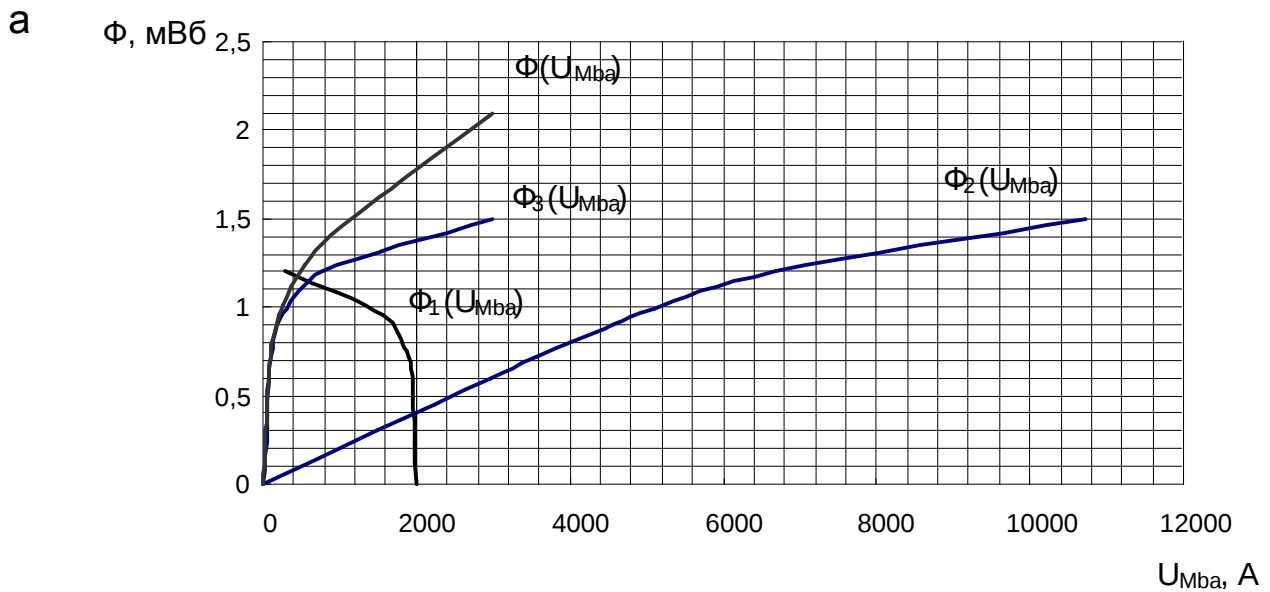


Рис. 5. Зависимости $\Phi(U_{Mba})$

Последнюю кривую строим суммируя ординаты кривых $\Phi_2=f(U_{Mba})$ и $\Phi_3=f(U_{Mba})$ при одних и тех же значениях магнитного напряжения U_{Mba} . Для этого задаемся рядом значений магнитного напряжения и для этих значений находим потоки Φ_3, Φ_2 и их сумму для данного напряжения, так согласно рис.5 при магнитном напряжении равном 200 А поток $\Phi_2=0,04$ мВб, $\Phi_3=0,91$ Вб, тогда суммарный поток равен

$$\Phi=\Phi_3+\Phi_2=0,04+0,91=0,95 \text{ мВб.}$$

На координатной плоскости откладываем точку с координатами $U_{Mba}=200$ А и $\Phi=0,95$ мВб.

Аналогичным образом рассчитываем и координаты других точек зависимости $\Phi(U_{Mba})$.

Из рис. 5 видно, что кривые $\Phi(U_{Mab})$ и $\Phi_1(U_{Mba})$ пересекаются в некоторой точке. Окрестность этой точки в увеличенном масштабе представлена на рис. 5,б. Обозначим точку пересечения кривых $\Phi(U_{Mab})$ и $\Phi_1(U_{Mba})$ как m . Ордината этой точки будет искомым поток Φ_1 , а абсцисса магнитным напряжением U_{Mba} .

В рассматриваемом примере $\Phi_1=1,17$ мВб, $U_{Mba}=445$ А.

На рис.5,б из точки m проведем прямую параллельную оси ординат. Точки пересечения проведенной прямой с кривыми $\Phi_2=f(U_{Mba})$ и $\Phi_3=f(U_{Mba})$ обозначим m_2 и m_3 , соответственно.

Определим ординаты точек m_2 и m_3 , которые и будут значениями соответствующих магнитных потоков

$$\Phi_2=0,09 \text{ мВб и } \Phi_3=1,08 \text{ мВб.}$$

Определим значения магнитной индукции и магнитного напряжения в воздушном зазоре. Пренебрегая магнитными потоками рассеяния будем считать, что $\Phi_0=\Phi_2$, следовательно,

$$B_0 = B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} = \frac{0,09 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^{-4}} = 0,12 \text{ Тл,}$$

$$U_0 = H_0 l_0 = 3600 B_0 = 3600 \cdot 0,12 = 432 \text{ А.}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие цепи называются магнитными?
2. Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей
3. Поясните, почему магнитные цепи являются нелинейными?
4. Какие физические величины характеризуют магнитную цепь?
5. Какие методы расчета магнитных цепей Вы знаете?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном методическом пособии не отражены физические процессы, протекающие в магнитных цепях постоянного тока, поэтому для успешного усвоения студентами одного из разделов теоретических основ электротехники автор настоятельно советует учащимся дополнительное изучение учебной литературы и самостоятельное решение задач по данной теме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы электротехники: Задание на контрольную работу № 4 с метод. указаниями/Сост.: М.В. Тарнижевский, Ю. Г.Кравцов, А. А. Сатаров, Л. А. Частоедов. – М.: ВЗИИТ, 1992. – 14 с.
2. Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чепурин. Т.2. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 576 с.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для вузов / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарика, 2002. – 638 с.
4. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей: Учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил и др. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКУЮ РАБОТУ	4
2. РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	10
2.1. Составление эквивалентной схемы	10
2.2. Законы Кирхгофа для магнитной цепи	11
2.3. Решение нелинейной системы уравнений.....	12
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	17
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	18

Учебное издание

Гафиатулина Елена Саугановна

РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методическое пособие

Отпечатано методом прямого репродуцирования

Технический редактор *И.А. Нильмаер*

План 2007 г. Поз. 6.3.

Сдано в набор 19.12.2006. Подписано в печать 28.03.2007.

Формат 60x84¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарнитура Arial. Печать плоская.

Усл. печ. л. 1,2. Зак. 122. Тираж 200 экз. Цена 16 руб.

Издательство ДВГУПС

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.