

### **3Ф-808**

1	Артемьев Виктор Сергеевич	нет
2	Атчанов Санат Ерланович	да
3	Багдасарян Артём Славикович	нет
4	Бессараб Виктор Юрьевич	нет
5	Борецкая Наталия Сергеевна	нет
6	Бочаров Николай Васильевич	нет
7	Бровко Виктор Юрьевич	нет
8	Васильева Анастасия Васильевна	нет
9	Власовец Игорь Дмитриевич	нет
10	Генин Иван Александрович	нет
11	Гутов Дмитрий Александрович	нет
12	Дружинин Максим Александрович	нет
13	Егоров Петр Андреевич	да
14	Жуков Андрей Сергеевич	нет
15	Зеленин Артем Алексеевич	нет
16	Каешкин Владислав Александрович	нет
17	Качурин Дмитрий Олегович	нет
18	Кузнецов Владислав Николаевич	нет
19	Кузовлев Артем Александрович	нет
20	Ларионов Александр Евгеньевич	нет

21	Макаров Иван Измаилович	нет
22	Медведев Юрий Евгеньевич	нет
23	Мелешко Вадим Петрович	нет
24	Морозов Иван Ильич	нет
25	Мунтян Станислав Валерьевич	нет
26	Николаенко Вячеслав Витальевич	нет
27	Табатчиков Алексей Юрьевич	нет
28	Титов Кирилл Сергеевич	нет
29	Трутаева Наталья Валерьевна	нет
30	Хоптенко Денис Игоревич	нет
31	Цвингер Владислав Андреевич	нет
32	Шамонина Анна Витальевна	нет
33	Шихов Егор Владимирович	нет
34	Щёголев Никита Сергеевич	нет

**НОМЕР ВАРИАНТА БЕРЕТЕ ПО НОМЕРУ В СПИСКЕ  
ГРУППЫ**

## ЗАДАНИЕ № 5

### РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Задание включает в себя две задачи.

- Расчет магнитной цепи постоянного тока.
- Расчет нелинейной электрической цепи переменного тока с использованием замены реальных нелинейных элементов условно-нелинейными.

#### 5.1. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В основу задачи по расчету магнитной цепи постоянного тока положена разветвленная неоднородная магнитная цепь с катушками, обтекаемыми постоянным током. Задача должна быть решена двумя методами: графическим с использованием эквивалентных схем замещения и аналитическим методом последовательного приближения (итерационным методом).

#### СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ

Определить магнитную индукцию во всех участках стального магнитопровода, изображенного на рис. 5.1. Геометрические размеры магнитопровода (сечения  $S_1, S_2, S_3$  и длины  $l_1, l_2, l_3$  соответствующих участков), величина воздушного зазора  $l_\delta$ , числа витков катушек  $W_1, W_2, W_3$  и токов в них  $I_1, I_2, I_3$  представлены в табл. 5.1. Кривая намагничивания стали, из которой выполнен магнитопровод, задана в табл. 5.2.

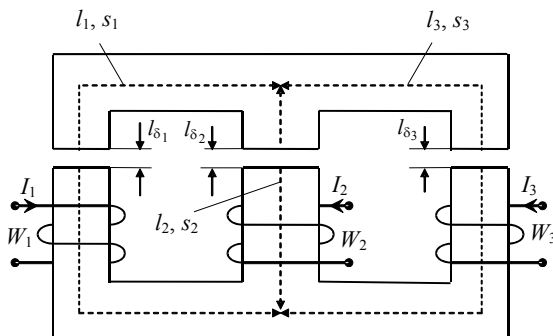


Рис. 5.1

Таблица 5.1

Вариант	$l_1$	$S_1$	$l_{\delta 1}$	$W_1$	$I_1$	$l_2$	$S_2$	$l_{\delta 2}$	$W_2$	$I_2$	$l_3$	$S_3$	$l_{\delta 3}$	$W_3$	$I_3$
	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А
1	30	30	–	100	2	20	20	–	–	–	30	30	0,1	100	2
2	30	30	–	100	2	20	20	–	–	–	30	30	0,1	100	1
3	20	20	–	100	1	10	10	0,2	100	2	20	20	–	–	–
4	20	20	–	100	2	10	10	0,2	100	4	20	20	–	–	–
5	45	25	–	–	–	15	25	–	100	1,1	20	20	0,3	100	2
6	25	25	–	–	–	15	15	–	100	2	20	20	0,3	100	4
7	40	40	–	100	3	20	20	0,2	100	4	40	40	–	–	–
8	40	40	–	100	1	20	20	0,2	100	3	40	40	–	–	–
9	20	20	0,1	100	5	15	30	–	100	2,5	30	30	–	100	3
10	20	20	0,1	100	3	15	16	–	100	2,2	30	30	–	100	5
11	50	50	–	100	1	40	40	0,2	100	2	50	50	–	–	–
12	50	50	–	100	2	40	40	0,2	100	2	50	50	–	–	–
13	30	30	–	–	–	25	25	–	100	0,9	40	40	0,3	100	2
14	30	30	–	–	–	25	25	–	100	1,9	40	40	0,3	100	4
15	45	40	–	100	4	25	25	0,2	100	1	30	30	–	–	–
16	40	40	–	100	1	25	25	0,2	100	4	30	30	–	–	–
17	30	40	–	–	–	10	10	0,1	100	2	30	30	–	100	3
18	30	30	–	–	–	10	10	0,1	100	3	30	30	–	100	2
19	60	50	0,1	100	5	30	30	–	100	2	50	50	–	–	–
20	50	50	0,1	100	2	30	30	–	100	5	50	50	–	–	–
21	40	60	–	–	–	20	30	0,2	100	6	60	40	–	100	8
22	20	30	–	–	–	15	15	0,2	100	4,8	30	20	–	100	6

23	50	30	0,15	100	7	30	50	–	100	6	60	100	–	–	–
24	60	10	–	100	6	40	20	0,5	100	7	60	30	–	–	–
25	50	20	–	–	–	20	40	–	100	5	60	10	0,4	100	2
26	40	40	0,1	–	–	30	20	0,45	100	2	60	20	–	100	5
27	50	20	0,5	100	6	20	40	–	100	3,4	30	30	–	–	–
28	50	40	–	100	4	30	20	0,3	100	6	40	30	–	–	–
29	25	30	–	–	–	10	15	–	100	4	15	20	0,2	100	5
30	40	50	–	100	5	10	20	0,1	100	4	25	70	–	–	–
31	50	20	0,2	100	3	40	30	–	–	–	60	40	–	100	7
32	30	40	–	–	–	10	40	0,3	100	7	20	20	–	100	5
33	30	30	0,1	100	1	11	10	–	100	2	50	50	–	–	–
34	50	50	0,15	100	2	20	20	–	100	5	40	40	0,1	–	–
35	80	40	–	100	1	30	30	–	–	–	50	50	0,3	100	5
36	25	25	–	100	6	15	15	–	100	4	30	30	0,5	100	2
37	30	30	0,5	100	3	25	50	–	100	1,9	40	40	–	100	1
38	40	40	0,4	100	7	10	10	–	100	3	60	50	–	–	–
39	50	50	–	100	3	20	20	–	–	–	60	60	0,1	100	7
40	60	60	–	100	7	30	30	–	–	–	70	70	0,2	100	3
41	40	40	–	100	4	15	15	0,3	100	8	50	50	–	–	–
42	60	60	–	100	7,5	25	25	0,4	100	4	75	70	–	–	–
43	50	50	–	100	4	25	25	–	–	–	40	60	0,55	100	8
44	60	60	–	100	8	30	30	–	–	–	70	70	0,1	100	4
45	40	40	–	100	5	10	10	0,2	100	9	30	30	–	–	–
46	30	30	–	100	3	15	15	0,5	100	5	38	30	–	–	–
47	40	40	0,3	100	5	20	30	–	100	6,4	40	40	–	100	9

Продолжение табл. 5.1

Вариант	$l_1$	$S_1$	$l_{\delta 1}$	$W_1$	$I_1$	$l_2$	$S_2$	$l_{\delta 2}$	$W_2$	$I_2$	$l_3$	$S_3$	$l_{\delta 3}$	$W_3$	$I_3$
	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А
48	40	40	0,4	100	9	25	30	0,18	–	–	50	25	–	100	5
49	60	60	–	–	–	30	30	0,5	100	3	50	50	–	100	6
50	50	60	–	100	4	40	20	0,1	100	3,3	70	70	–	–	–
51	30	30	0,3	100	6	15	20	0,27	–	–	20	20	–	100	3
52	40	40	0,4	100	7	30	30	–	100	5	50	50	–	100	5,5
53	50	50	–	–	–	25	25	0,5	100	8	40	40	–	100	4
54	45	50	–	–	–	30	30	0,1	100	4	40	40	–	100	8
55	50	50	0,1	100	4	25	25	–	–	–	50	50	–	100	2
56	75	60	0,2	100	8	20	25	0,35	–	–	60	60	–	100	4
57	60	60	–	100	8	15	15	0,3	100	4	30	40	–	100	6,7
58	34	30	–	100	4	10	10	0,4	100	8	60	50	–	–	–
59	40	40	–	–100	4	20	15	0,5	100	6,5	30	30	–	–	–
60	50	50	–	100	1	20	20	–	–	–	60	60	0,4	100	4
61	60	60	–	100	5	25	25	–	–	–	70	70	0,3	100	2
62	40	40	–	100	2	30	30	–	–	–	50	50	0,2	100	5
63	55	50	–	–	–	25	25	–	100	1,9	40	40	0,1	100	5
64	40	40	–	–	–	20	20	0,2	100	5	60	60	–	100	2
65	30	30	–	100	3	15	15	0,3	100	6	50	50	–	–	–
66	20	20	0,1	100	6	10	10	–	100	3	35	30	–	–	–
67	30	30	0,2	100	6	15	20	0,27	–	–	40	40	–	100	3
68	40	40	0,3	100	3	20	30	–	100	4,8	50	50	–	100	6
69	55	50	–	–	–	25	25	0,4	100	3	60	60	–	100	6



Окончание табл. 5.1

Вариант	$l_1$	$S_1$	$l_{\delta 1}$	$W_1$	$I_1$	$l_2$	$S_2$	$l_{\delta 2}$	$W_2$	$I_2$	$l_3$	$S_3$	$l_{\delta 3}$	$W_3$	$I_3$
	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А	см	см <sup>2</sup>	мм	–	А
94	45	40	–	–	–	30	30	–	100	10	50	50	0,3	100	7
95	40	50	0,2	100	8	35	35	–	100	5	70	60	–	–	–
96	60	60	0,1	100	5	40	40	–	100	8	70	70	–	–	–
97	70	70	0,2	100	8	35	35	–	–	–	50	50	–	100	5
98	50	50	0,3	100	5	30	40	0,58	–	–	60	60	–	100	8
99	60	60	–	–	–	25	25	0,4	100	8	70	70	–	100	5
100	40	40	0,2	100	4	30	30	–	100	3	60	60	–	–	–

Таблица 5.2

$H$	А/м	0	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200	2000
$B$	Тл	0	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6	1,666



## УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

Прежде чем рассчитывать магнитную цепь, необходимо определить величину и направления магнитодвижущих сил (МДС) катушек и произвольно направить магнитные потоки в сердечниках магнитопровода.

### Расчет магнитной цепи методом последовательного приближения (итерационный метод)

В качестве примера рассматривается магнитная цепь, представленная на рис. 5.2.

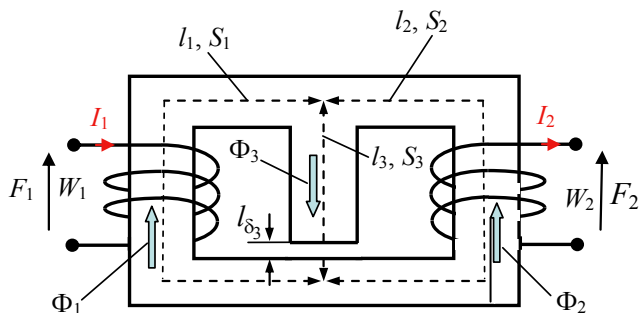


Рис. 5.2

Сердечник магнитной цепи выполнен из стали 2411, кривая намагничивания которой представлена в табл. 5.3.

Таблица 5.3

$B$	Тл	0	0,67	0,9	1,05	1,14	1,42	1,53
$H$	А/м	0	100	150	240	400	1200	2220

Параметры магнитной цепи:

$$l_1 = l_2 = 0,52 \text{ м}, \quad l_3 = 0,178 \text{ м}, \quad l_{\delta 3} = 0,002 \text{ м},$$

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_{\delta 3} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$W_1 = W_2 = 500, \quad I_1 = 2 \text{ А}, \quad I_2 = 1 \text{ А}.$$

Определить магнитные потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  в различных участках магнитопровода.

Решение задачи  
Численные значения МДС

$$F_1 = I_1 W_1 = 1000 \text{ А}, \quad F_2 = I_2 W_2 = 500.$$

Направления МДС, найденные по правилу правоугового винта, а также произвольно выбранные положительные направления магнитных потоков  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  указаны на рис. 5.2.

Уравнения магнитного состояния рассматриваемой цепи, составленные на основании законов Кирхгофа, имеют вид

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0, \quad (5.1)$$

$$H_3 l_3 + H_{\delta 3} l_{\delta 3} + H_2 l_2 = F_2, \quad (5.2)$$

$$H_1 l_1 - H_2 l_2 = F_1 - F_2. \quad (5.3)$$

Для организации итерационного расчета необходимо выбрать критерий сходимости, в качестве которого целесообразно выбрать какую-либо из заданных МДС (например,  $F_1 = I_1 W_1 = 1000 \text{ А}$ ) и какую-либо стартовую функцию (например, магнитную индукцию  $B_3$  в третьем сердечнике магнитопровода).

Итерационный расчет магнитной цепи состоит в многократном решении системы уравнений (5.1)–(5.3) в направлении от стартовой величины к критериальной. Выбирается произвольное значение стартовой функции (например,  $B'_3$ ), решается система уравнений (5.1)–(5.3) и по выбранному значению индукции определяется критериальная функция (например,  $F'_3$ ). Найденное значение критериальной функции сравнивается с заданной величиной и при несовпадении этих значений расчет повторяется до их сходимости с требуемой точностью.

*Порядок действий следующий:*

- Произвольно выбирается первое приближение стартовой величины  $B'_3 = 0,4 \text{ Тл}$ .

- По кривой намагничивания стали (табл. 5.3) для выбранного значения  $B'_3 = 0,4 \text{ Тл}$  определяется соответствующее значение магнитной напряженности первого приближения в третьем сердечнике магнитной цепи  $H'_3 = 59,7 \text{ А/м}$ .

- С учетом того что  $B'_{\delta 3} = B'_3$ , определяется первое приближение магнитной напряженности в немагнитном зазоре

$$H'_{\delta 3} = \frac{B'_{\delta 3}}{\mu_0} = \frac{0,4}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 3,185 \cdot 10^5 \text{ А/м}.$$

- Определяется магнитный поток первого приближения в третьей ветви магнитной цепи  $\Phi'_3 = B'_3 S_3 = 0,4 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 2,4$  мВб.

- Из уравнения (5.2) отыскивается магнитная напряженность  $H'_2$  первого приближения во втором сердечнике магнитопровода

$$H'_2 = \frac{F_2 - H'_3 l_3 - H'_{\delta 3} l_{\delta 3}}{l_2} =$$

$$= \frac{500 - 59,7 \cdot 0,178 - 3,185 \cdot 10^5 \cdot 0,002}{0,52} = -283,9 \text{ А/м.}$$

- По кривой намагничивания стали (табл. 5.3) для найденного значения  $H'_2$  определяется величина индукции первого приближения во втором сердечнике магнитопровода  $B'_2 = -1,0735$  Тл.

- Рассчитывается величина магнитного потока первого приближения во втором сердечнике

$$\Phi'_2 = B'_2 S_2 = -1,0735 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = -6,44 \text{ мВб.}$$

- Из уравнения (5.1) определяется магнитный поток первого приближения в первом сердечнике

$$\Phi'_1 = \Phi'_3 - \Phi'_2 = 2,4 - (-6,44) = 8,84 \text{ мВб.}$$

- Находится значение магнитной индукции первого приближения в первом сердечнике

$$B'_1 = \frac{\Phi'_1}{S_1} = \frac{8,84 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 1,473 \text{ Тл.}$$

- Соответственно найденному значению индукции  $B'_1$  по кривой намагничивания (табл. 5.3) определяется первое приближение магнитной напряженности в первом сердечнике  $H'_1 = 1697$  А/м,

- Из уравнения (5.3) определяется первое приближение критериальной величины

$$F'_1 = F'_2 + H'_1 l_1 - H'_2 l_2 = 500 + 1697 \cdot 0,52 + 283,9 \cdot 0,52 = 1530 \text{ А.}$$

Рассчитанное значение критериальной величины сравнивается с заданным значением этой функции ( $F_1 = 1000$  А) и при несовпадении

результатов повторяется расчет системы уравнений (5.1)–(5.3) при новом значении (*второе приближение*) индукции (например,  $B_3'' = 0,3$  Тл). Полученное значение второго приближения критериальной величины (например,  $F_1''$ ) вновь сравнивается с заданным значением. При несовпадении величин расчет повторяется до тех пор, пока значение критериальной величины очередного приближения не совпадет с требуемой точностью с ее заданным значением. Данный метод наиболее эффективен при использовании вычислительной техники. Однако если применить метод последовательного приближения в сочетании с графическим методом, то по результатам трех приближений можно определить истинное значение индукции в третьем сердечнике и вслед за этим по приведенному выше алгоритму расчета системы уравнений (5.1)–(5.3) найти истинные значения всех магнитных потоков в цепи. Для этого достаточно по результатам трех приближений (см. табл. 5.4) построить характеристику  $F_1 = f(B_1)$ , представленную на рис. 5.3, и по ней определить истинное значение индукции  $B_1$  для заданного значения МДС  $F_1 = 1000$  А.

Т а б л и ц а 5.4

$B_3$ , Тл	$H_3$ , А/м	$H_{\delta 3} = B_3/\mu_0$ , А/м	$\Phi_3$ , мВб	$H_2$ , А/м	$B_2$ , Тл	$\Phi_2$ , мВб	$\Phi_1$ , мВб	$B_1$ , Тл	$H_1$ , А/м	$I_1 W_1$ , А
0,4	59,7	$3,185 \cdot 10^5$	2,4	-283,9	—	-6,44	8,84	1,473	1697	1529
0,3	45	$2,389 \cdot 10^5$	1,8	28,8	0,193	1,15	0,65	1,083	359	724
0,35	52,2	$2,786 \cdot 10^5$	2,1	-126,5	—	-4,75	6,85	1,142	406	776,8
					0,792					

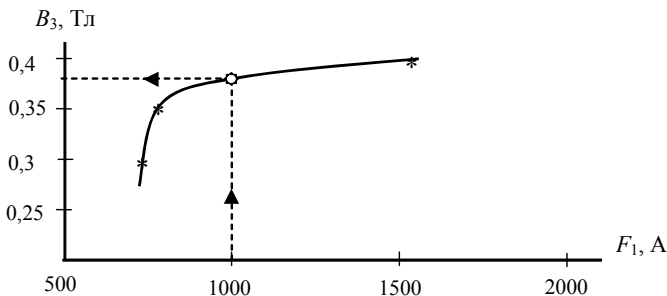


Рис. 5.3

Из рис. 5.3 следует, что для заданной величины МДС  $F_1 = 1000$  А значение магнитной индукции в третьем сердечнике магнитопровода  $B_3 = 0,38$  Тл. Решение системы уравнений (5.1)–(5.3) для найденного значения  $B_3$  дает величины магнитных потоков в сердечниках магнитопровода

$$\Phi_1 = 7,883 \text{ мВб},$$

$$\Phi_2 = -5,683 \text{ мВб},$$

$$\Phi_3 = 2,2 \text{ мВб}.$$

### Расчет магнитной цепи графическим методом

Расчет магнитной цепи удобно проводить по схеме замещения, представленной на рис. 5.4 (направления МДС определены по правилу правоходового винта, положительные направления магнитных потоков выбраны произвольно).

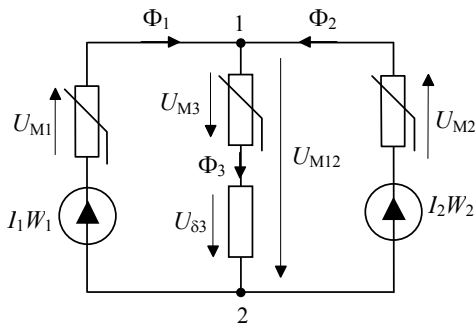


Рис. 5.4

Р е ш е н и е

По первому закону Кирхгофа для узла «1» (рис. 5.4)

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3. \quad (5.4)$$

Для графического решения уравнения (5.4) необходимо иметь зависимости всех трех потоков в функции одной переменной. Этой общей для всех магнитных потоков в данной цепи переменной является магнитное напряжение между узлами «1» и «2». Таким образом, нелинейное уравнение (5.4) может быть графически разрешено, если его представить в виде

$$\Phi_1(U_{M12}) + \Phi_2(U_{M12}) = \Phi_3(U_{M12}). \quad (5.5)$$

Зависимости  $\Phi_1(U_{M12})$ ,  $\Phi_2(U_{M12})$  и  $\Phi_3(U_{M12})$  могут быть построены на основании уравнений по второму закону Кирхгофа для схемы (рис. 5.4):

$$U_{M12}(\Phi_1) = I_1 W_1 - U_{M1}(\Phi_1), \quad (5.6)$$

$$U_{M12}(\Phi_2) = I_2 W_2 - U_{M2}(\Phi_2), \quad (5.7)$$

$$U_{M12}(\Phi_3) = U_{M3}(\Phi_3) + U_{\delta 3}(\Phi_3). \quad (5.8)$$

Порядок построения вебер-амперных характеристик (5.6)–(5.8) по данным кривой намагничивания электротехнической стали 2411 (табл. 3) приведен в табл. 5.5.

Зависимости  $\Phi_1(U_{M12})$ ,  $\Phi_2(U_{M12})$  и  $\Phi_3(U_{M12})$ , построенные по результатам табл. 5.5, приведены на рис. 5.5.

Посредством суммирования ординат зависимостей  $\Phi_1(U_{M12})$  и  $\Phi_2(U_{M12})$ , соответствующих одному и тому же значению магнитного напряжения  $U_{M12}$ , строится вебер-амперная характеристика  $(\Phi_1 + \Phi_2) = f(U_{M12})$ . Точка  $m_3$  пересечения характеристики  $(\Phi_1 + \Phi_2) = f(U_{M12})$  с кривой  $\Phi_3(U_{M12})$ , в которой удовлетворяется уравнение (5.2), определяет магнитное напряжение  $U_{M12}$  и магнитный поток  $\Phi_3 = 2,25$  мВб.

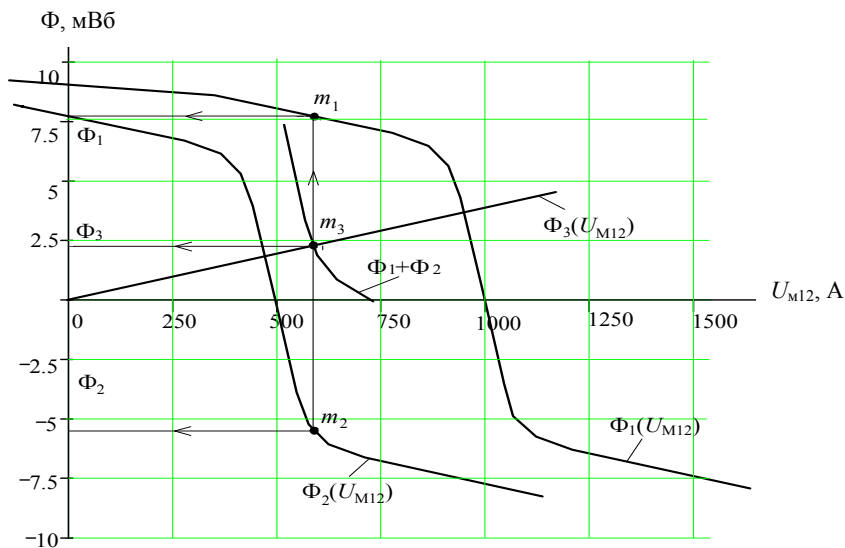


Рис. 5.4

Т а б л и ц а 5.5

$B$	$H$	I сердечник			II сердечник			III сердечник			
		$\Phi_1$	$U_{M1}$	$U_{M12}$	$\Phi_2$	$U_{M2}$	$U_{M12}$	$\Phi_3$	$U_{M3}$	$U_{\delta 3}$	$U_{M12}$
		$B_1 S_1$	$H_1 l_1$	$F_1 - U_{M1}$	$B_2 S_2$	$H_2 l_2$	$F_2 - U_{M2}$	$B_3 S_3$	$H_3 l_3$	$\Phi_3 R_{\delta 3}$	$U_{\delta 3} + U_{M3}$
Тл	А/м	мВб	А	А	мВб	А	А	мВб	А	А	А
0	0	0	0	1000	0	0	500	0	0	0	0
0,67	100	4,02	52	948	4,02	52	448	4,02	17,8	1065	1082,8
0,9	150	5,4	78	922	5,4	78	422	5,4	26,7	1430	1456,7
1,05	240	6,3	125	875	6,3	125	375	6,3	42,6	1670	1712,6
1,14	400	6,83	208	792	6,83	208	292	6,83	71,1	1810	1881,1
1,42	1200	8,5	624	376	8,5	624	-124	8,5	214	2250	2464
1,53	2220	9,16	1155	-155	9,16	1155	-655	9,16	395	2430	2825
-0,67	-100	-4,02	-52	1052	-4,02	-52	552	-4,02	-17,8	-1065	-1082,8
-0,9	-150	-5,4	-78	1072	-5,4	-78	578	-5,4	-26,7	-1430	-1456,7
-1,05	-240	-6,3	-125	1125	-6,3	-125	625	-6,3	-42,6	-1670	-1712,6
-1,14	-400	-6,83	-208	1208	-6,83	-208	708	-6,83	-71,1	-1810	-1881,1
-1,42	-	-8,5	-624	1624	-8,5	-624	1124	-8,5	-214	-2250	-2464

Ординаты точек  $m_1$  и  $m_2$  пересечения прямой ( $m-m_3$ ) с кривыми  $\Phi_1(U_{M12})$  и  $\Phi_2(U_{M12})$  дают соответственно магнитные потоки  $\Phi_1 = 7,75$  мВб и  $\Phi_2 = -5,5$  мВб.

**Ответ:**  $\Phi_1 = 7,75$  мВб,  $\Phi_2 = -5,5$  мВб,  $\Phi_3 = 2,25$  мВб.

## 5.2. РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАМЕНЫ РЕАЛЬНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСЛОВНО-НЕЛИНЕЙНЫМИ (расчет по действующим значениям эквивалентных синусоид)

В задаче по расчету нелинейной цепи переменного тока рассматривается последовательно параллельная цепь, содержащая два безынерционных элемента (нелинейную индуктивность и нелинейную емкость). Задача должна быть решена с использованием метода эквивалентных синусоид (посредством замены безынерционных элементов условно-нелинейными).

### СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ

Схемы рис. 5.6–5.11 включают в себя линейные ( $r$ ,  $r_1$ ,  $L$ ,  $C$ ) и нелинейные элементы. В качестве нелинейных элементов рассматриваются нелинейная индуктивность (НЭ1) и нелинейный конденсатор (НЭ2). Вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейных элементов для действующих значений заданы в табл. 5.6. Схемы питаются от источника синусоидального напряжения. Значения сопротивлений линейных элементов и напряжения источника  $U_{вх}$  (*действующие значения*) приведены в табл. 5.7. Во всех схемах  $r = 10$  Ом. Полагая реальные нелинейные элементы условно-нелинейными:

- рассчитать токи в ветвях схемы при заданном  $U_{вх}$ ;
- определить сопротивление нелинейного элемента, при котором в цепи имеет место резонанс (*если в результате расчета получается два значения искомого сопротивления, то для схем 4,5 учитывать меньшее значение, для остальных схем – большее*);
- найти входное напряжение  $U_{вх}$  и входной ток  $I_1$  в режиме резонанса;



- определить и построить вольт-амперную  $U_{\text{вх}}(I_1)$  и фазоамперную  $\varphi_1(I_1)$  характеристики рассматриваемой цепи (при расчете этих характеристик необходимо учесть все точки ВАХ нелинейного элемента).

Таблица 5.6

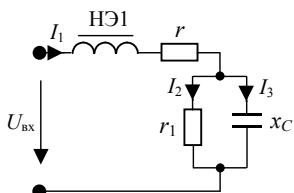


Рис. 5.6

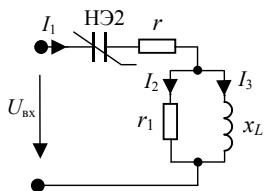


Рис. 5.7

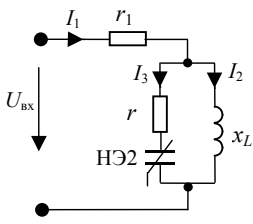


Рис. 5.8

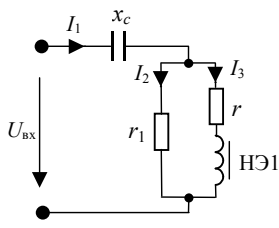


Рис. 5.9

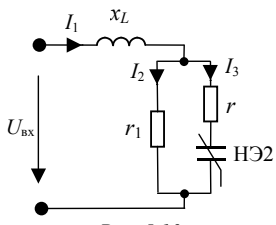


Рис. 5.10

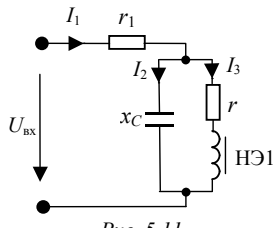


Рис. 5.11

ВАХ НЭ1		ВАХ НЭ2	
В	А	В	А
10	0,04	10	0,4
20	0,08	20	0,7
30	0,12	30	0,9
40	0,16	40	1,0
50	0,2	50	1,08
60	0,26	60	1,14
70	0,32	70	1,18
80	0,4	80	1,21
90	0,5	90	1,24
100	0,65	100	1,28
110	1,1	110	1,3
112,5	1,83	120	1,34
115	2,55	130	1,36
117,5	3,28	140	1,4
120	4	150	1,42

Таблица 5.7

Номер варианта	Номер схемы	$x_L, x_C$		$r_1$	$U_{BX}$	Номер варианта	Номер схемы	$x_L, x_C$		$r_1$	$U_{BX}$
		Ом	Ом	Ом	В			Ом	Ом	В	
1	1	80	250	100	40	4	80	200	180		
2	2	90	600	40	41	5	65	180	45		
3	3	100	70	80	42	6	150	50	150		
4	4	40	100	30	43	1	220	200	200		
5	5	60	200	30	44	2	100	100	60		
6	6	100	50	80	45	3	100	90	70		
7	1	120	500	110	46	4	35	90	80		
8	2	50	350	50	47	5	45	190	60		
9	3	80	70	50	48	6	200	50	110		
10	4	35	90	60	49	1	80	250	120		
11	5	80	240	30	50	2	90	100	90		
12	6	90	40	50	51	3	100	70	120		
13	1	130	400	140	52	4	40	100	50		
14	2	100	100	90	53	5	60	200	50		
15	3	70	50	30	54	6	100	50	150		
16	4	75	190	160	55	1	100	150	120		
17	5	40	180	70	56	2	70	500	35		
18	6	80	30	60	57	3	80	70	40		
19	1	140	450	150	58	4	35	90	50		
20	2	80	400	30	59	5	80	240	70		
21	3	60	80	120	60	6	90	40	170		
22	4	70	180	160	61	1	100	150	90		
23	5	50	180	30	62	2	60	450	30		
24	6	70	20	140	63	3	70	100	60		
25	1	100	300	60	64	4	90	210	50		
26	2	100	150	70	65	5	40	180	40		
27	3	50	70	140	66	6	80	30	140		
28	4	50	170	100	67	1	220	200	150		
29	5	55	185	60	68	2	100	500	50		
30	6	100	10	120	69	3	70	50	140		
31	1	200	200	110	70	4	90	210	200		
32	2	100	500	40	71	5	50	180	60		
33	3	90	60	40	72	6	70	20	60		
34	4	60	200	150	73	1	120	500	150		
35	5	55	170	40	74	2	100	100	70		
36	6	60	10	130	75	3	60	80	50		
37	1	130	400	140	76	4	80	200	60		
38	2	60	450	60	77	5	55	185	50		
39	3	80	60	40	78	6	60	10	60		

Номер варианта	Номер схемы	$x_L, x_C$	$r_1$	$U_{BX}$	Номер варианта	Номер схемы	$x_L, x_C$	$r_1$	$U_{BX}$
		Ом	Ом	В			Ом	Ом	В
79	1	140	450	120	90	6	150	50	60
80	2	50	350	40	91	1	200	200	130
81	3	100	90	60	92	2	100	150	50
82	4	70	180	60	93	3	90	60	50
83	5	55	170	60	94	4	50	170	50
84	6	100	10	50	95	5	45	190	40
85	1	100	300	100	96	6	200	50	150
86	2	80	400	45	97	1	150	500	180
87	3	50	70	100	98	2	100	110	60
88	4	40	100	100	99	3	80	60	50
89	5	65	180	60	100	4	60	200	60

### УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

Для расчета схем, представленных на рис. 5.6–5.11, может быть использован метод последовательных приближений. Задавшись комплексом произвольной величины (тока или напряжения) в удаленной от источника ветви, с помощью законов Кирхгофа определяют комплексное напряжение на входе цепи. Полученное значение входного напряжения сравнивается с заданным и при несовпадении этих значений расчет повторяется до их сходимости с требуемой точностью.

Если известны вольт-амперные  $U_{BX}(I_1)$  и фазоамперные  $\varphi_1(I_1)$  характеристики рассматриваемых схем, то заданное входное напряжение позволяет определить по этим характеристикам комплекс входного тока  $\underline{I}_1 = I_1 \angle \varphi_1$  и вслед за этим с помощью законов Кирхгофа определить все остальные токи и напряжения в цепи.

В режиме резонанса входной ток должен быть в фазе с входным напряжением. Поэтому значение входного тока в режиме резонанса определяется по точке пересечения фазоамперной характеристики с осью абсцисс (т.е. при  $\varphi_1 = 0$ ). Найденное значение резонансного входного тока позволяет определить (с помощью законов Кирхгофа) напряжения и токи во всех участках цепи в том числе и в нелинейном

элементе. Отношение  $\frac{U_{HЭ}}{I_{HЭ}} = x_{HЭ}$  характеризует величину сопротивления нелинейного элемента в режиме резонанса.

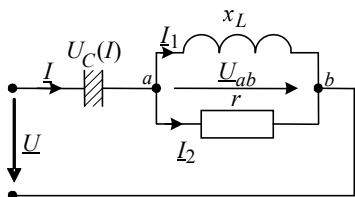


Рис. 5.12

Величина сопротивления нелинейного элемента в режиме резонанса может быть также найдена посредством определения комплексного входного сопротивления схемы  $Z_{\text{вх}} = r_{\text{вх}} + jx_{\text{вх}}$ . В режиме резонанса цепь должна быть активной, поэтому  $x_{\text{вх}} = 0$ . Данное тождество, включающее в себя искомое

сопротивление нелинейного элемента, позволяет его найти.

В качестве примера рассматривается цепь, представленная на рис. 5.12.

Схема состоит из линейных элементов  $r = 100$  Ом;  $x_L = 80$  Ом и нелинейного конденсатора, вольт-амперная характеристика которого для действующих значений напряжения и тока приведена в табл. 5.8.

Т а б л и ц а 5.8

$U_C, \text{ В}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$I, \text{ А}$	0,4	0,7	0,9	1,0	1,08	1,14	1,18	1,21	1,24	1,28	1,3	1,34

Рассчитать токи в ветвях схемы при  $U = 60$  В, пренебрегая несинусоидальностью режима. Определить действующее значение напряжения на входе цепи, при котором в цепи будет иметь место резонанс напряжений. Найти сопротивление нелинейного конденсатора в режиме резонанса.

### Р е ш е н и е

Расчет проводится посредством подбора величин либо посредством построения зависимостей  $I = f(U_{\text{вх}})$  и  $(\varphi_{u_{\text{вх}}} - \varphi_i) = f(U_{\text{вх}})$ .

1. Произвольно выбирается первое приближение действующего значения тока в нелинейном конденсаторе  $I'$ .

2. По заданной вольт-амперной характеристике  $U_C(I)$  для значения тока первого приближения определяется действующее значение емкостного напряжения  $U'_C$  первого приближения.

3. В предположении, что  $\underline{I}' = I' \angle 0^\circ$ , комплекс действующего значения емкостного напряжения  $\underline{U}'_C = U'_C \angle -90^\circ = -jU'_C$  (В).

4. С помощью символического метода определяется комплекс входного напряжения первого приближения

$$\begin{aligned} \underline{U}'_{\text{вх}} &= -jU'_C + \underline{I}' \frac{r \cdot jx_L}{r + jx_L} = \\ &= -jU'_C + \underline{I}' \frac{100 \cdot j80}{100 + j80} = -jU'_C + \underline{I}' \cdot 62,5 \angle 51,3^\circ = U'_{\text{вх}} \angle \varphi'_{u_{\text{вх}}} \text{ В.} \end{aligned}$$

Полученное значение входного напряжения первого приближения  $U'_{\text{вх}}$  сравнивается с действующим значением заданного входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , и при несовпадении этих величин расчет повторяется до тех пор, пока действующее значение очередного приближения входного напряжения не совпадет (с требуемой точностью) с заданной величиной входного напряжения. Порядок расчета нескольких приближений приведен в табл. 5.9.

Т а б л и ц а 5.9

$I, \text{ А}$	0,4	0,7	0,9	1,0	1,08	1,14	1,18	1,21	1,24	1,28	1,3	1,34
$U_C, \text{ В}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	18,3	31	37,8	40	42,2	44,8	47	51,8	57	62,5	69	76
$\varphi_{u_{\text{вх}}}, \text{ град}$	31,4	27,4	21,7	12,7	3,7	-5,8	-15,6	-24	-31,3	-37	-42,7	-46,2

5. Для ускорения процесса сходимости можно построить зависимость  $I(U_{\text{вх}})$  и по ней определить для заданного значения входного напряжения  $U_{\text{вх}} = 60 \text{ В}$  действительное значение входного тока цепи  $I = 1,26 \text{ А}$  (рис. 5.13).

6. В предположении, что начальная фаза входного тока принята равной нулю (см. п. 3), комплекс действующего значения входного тока будет иметь вид:  $\underline{I} = 1,26 \angle 0^\circ = 1,26 \text{ А}$ . Токи в остальных ветвях схемы могут быть найдены с использованием символического метода следующим образом:

$$\underline{I}_1 = \underline{I} \frac{r}{r + jx_L} = 1,26 \frac{100}{100 + j80} = 0,986 \angle 38,6^\circ \text{ А,}$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I} \frac{jx_L}{r + jx_L} = 1,26 \frac{j80}{100 + j80} = 0,788 \angle 51,4^\circ \text{ А.}$$

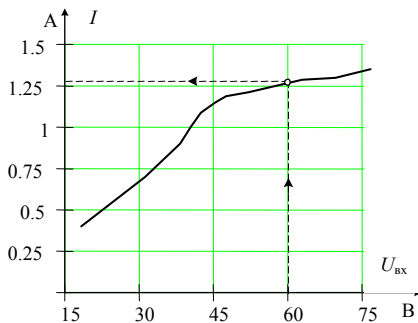


Рис. 5.13

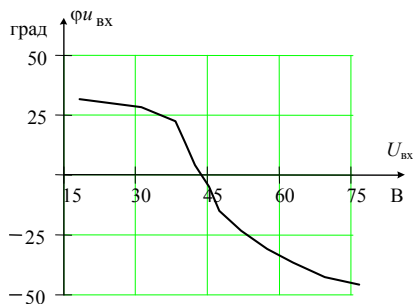


Рис. 5.14

7. Для оценки резонансного режима достаточно построить зависимость  $\varphi_{u_{\text{вх}}}(U_{\text{вх}})$  по расчетным данным табл. 5.9. Режим резонанса напряжений будет иметь место в том случае, когда входной ток будет совпадать по фазе с входным напряжением. Так как в расчете начальная фаза входного тока принята равной нулю (см. п. 3), резонанс будет иметь место, если начальная фаза входного напряжения тоже равна нулю. Как следует из графика  $\varphi_{u_{\text{вх}}}(U_{\text{вх}})$ , нулевая фаза входного напряжения имеет место при  $U_{\text{вх}} = 43$  В. Таким образом, резонанс напряжений в рассматриваемой нелинейной цепи наступит при входном напряжении  $U_{\text{вх}} = 43$  В.

8. Чтобы определить величину нелинейной емкости, соответствующей режиму резонанса, достаточно определить комплекс входного сопротивления цепи и приравнять нулю его мнимую часть

$$\underline{z}_{\text{вх}} = -jx_C + \frac{jx_L \cdot r}{r + jx_L}.$$

Чтобы выделить мнимую часть в полученном выражении, необходимо избавиться от комплексности в знаменателе, посредством умножения и деления дроби на сопряженный комплекс знаменателя:

$$\underline{z}_{\text{вх}} = -jx_C + \frac{jx_L r}{r + jx_L} \frac{(r - jx_L)}{(r - jx_L)} = \frac{x_L^2 r}{r^2 + x_L^2} - j \left( x_C - \frac{x_L r^2}{r^2 + x_L^2} \right).$$

Условием резонанса для рассматриваемой цепи является соотношение

$$\operatorname{Im}[z_{\text{вх}}] = x_C - \frac{x_L \cdot r^2}{r^2 + x_L^2} = 0,$$

из которого определяется искомая величина

$$x_C = \frac{x_L r^2}{r^2 + x_L^2} = \frac{80 \cdot 10^4}{10^4 + 0,64 \cdot 10^4} = 48,8 \text{ Ом.}$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1989.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – Ч. 5.
3. Каплянский А.Е. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1972.
4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергии, 1981. – Ч. 2.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

Кривая намагничивания, используемая в задании при расчетах магнитных цепей, представлена дискретными точками в виде таблицы. В тех случаях, когда искомая функция не может быть найдена непосредственно из таблицы, необходимо прибегать к интерполяции (если аргумент находится между дискретными точками внутри таблицы) и к экстраполяции (если аргумент находится за пределами таблицы). Простейшая интерполяция – линейная, когда принимается, что приращение функции пропорционально приращению аргумента (рис. П.1 и П.2).

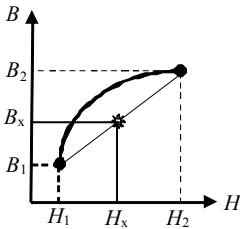


Рис. П1

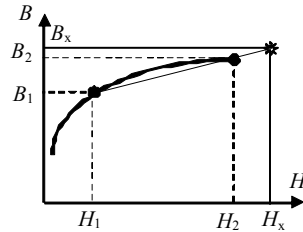


Рис. П2

Формулы интерполяции (экстраполяции)

$$B_x = B_1 + \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} (H_x - H_1);$$

$$H_x = H_1 + \frac{H_2 - H_1}{B_2 - B_1} (B_x - B_1).$$



Приложение 2

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

Кафедра теоретических основ электротехники

ЗАДАНИЕ №

-----  
(название задания)

Вариант №

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
Ф.И.О.

Группа \_\_\_\_\_

Принял \_\_\_\_\_  
Ф.И.О.

Новосибирск 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Задание № 5. Расчет нелинейных цепей .....	65
5.1. Расчет магнитных цепей постоянного тока .....	65
Содержание задачи .....	65
Указания к расчету .....	71
Расчет магнитной цепи методом последовательного приближения .....	71
Расчет магнитной цепи графическим методом .....	75
5.2. Расчет нелинейных электрических цепей с использованием замены реальных нелинейных элементов условно- нелинейными .....	78
Содержание задачи .....	78
Указания к расчету .....	81
Литература .....	85
Приложение 1 .....	86
Приложение 2 .....	87