$$\sum_{i=1}^{n} \Phi_i = 0$$

(Принцип непрерывности магнитного потока)

2) Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме м.д.с. вдоль того же контура.

$$\sum_{i=1}^{n} U_{мi} = \sum_{j=1}^{m} I_j \cdot w_j$$

2 Исходные данные для расчёта магнитной цепи постоянного тока

По данным, помещённым ниже в таблице 2.1, выполнить следующее:

1 Рассчитать магнитную цепь методом двух узлов и определить магнитные потоки на участках, а также ток или число витков катушки, если они не заданы, используя дополнительные условия.

Дополнительные условия: Для вариантов (2 + К20) – ($\Phi_1 = \Phi_2$); для (3 + К20) – ($\Phi_1 = \Phi_2$) для (7 + К20) – $\Phi_2 = 0$; для (4 + К20) – ($\Phi_2 - \Phi_1$) = $20 \cdot 10^{-5}$ Вб; для (6 + К20) и (19 + К20) – ($\Phi_2 = \Phi_3$); для (8 + К20) – ($\Phi_1 - \Phi_2$)=$20 \cdot 10^{-5}$ Вб; для (10 + К20) – ($\Phi_1 = \Phi_2$); (1 + К20) – ($\Phi_1 = 25 \cdot 10^{-5}$Вб); (12 + К20) – (Ф2 - Ф1) = $20 \cdot 10^{-5}$ Вб; (14 + К20) – ($\Phi_1 = \Phi_2$); (15 + К20) – ($\Phi_2 = 98 \cdot 10^{-5}$ Вб); (16 + К20) – ($\Phi_2 - \Phi_1$) = $20 \cdot 10^{-5}$ Вб; (17 + К20) – ($\Phi_2 = 70 \cdot 10^{-5}$ Вб); (20 + К20) – ($\Phi_2 - \Phi_1$) = $30 \cdot 10^{-5}$ Вб, где К = 0, 1, 2, 3.

2 По результатам, полученным в пункте 1, найти магнитное напряжение между двумя точками магнитной цепи, вычислив его один раз по пути заданному ниже в указании и другой раз по любому иному пути, выбранному по своему усмотрению; полученные результаты сравнить между собой

3 Для принятых в пункте один положительных направлений магнитных потоков и заданного направления М.Д.С. составить систему уравнений по законам Кирхгофа.

Схематическое изображение магнитопровода с размещением намагничивающих катушек, способа их намотки на сердечник и положительных направлений токов в них даны на рисунке 2.1.

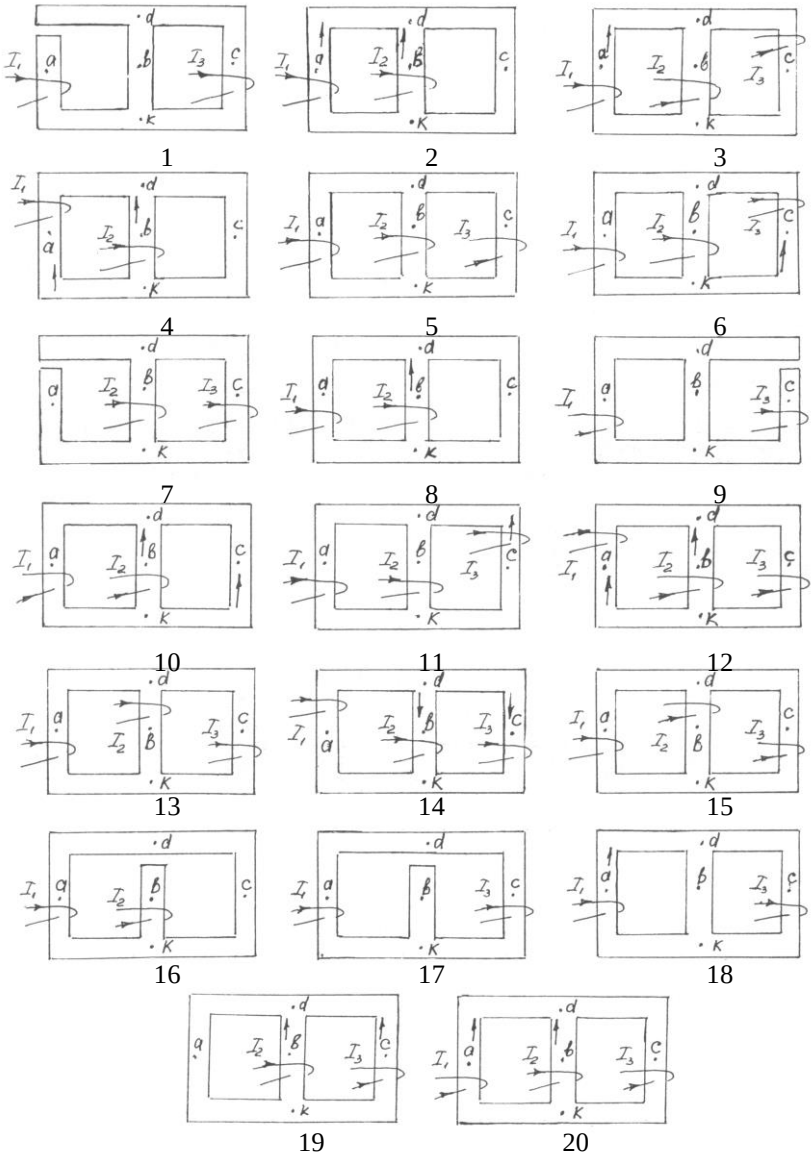

Рисунок 2.1 – Варианты схем для расчётов

Указания к выбору магнитного напряжения в пункте 2: для студентов, фамилии которых начинаются с букв А, И, М, Х, Ю, В, определить U_{akb} ; Г, Д, З, Б,Е – U_{ak} ; К, Ф, Э, , Н – U_{ckb} ; П, Р,Ч, Ш, Ц, Я – U_{ack} ; С,Т, Л, О, У, Щ – U_{bk} .

Здесь U_{akb} – магнитное напряжение между точками а и в по пути a-k-b и т.д.

В таблице 2.1 приняты следующие обозначения:

ℓ – длина средней магнитной линии одной ветви магнитной цепи;

l_{δ} – длина воздушного зазора;

S – сечение участка магнитопровода;

W – число витков катушки;

I – постоянный ток в катушке.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Номер варианта	Номер рис.	l_1 см	S_1 см^2	W_1 —	I_1 А	l_2 см	S_2 см^2	W_2 —	I_2 А	l_3 см	S_3 см^2	W_3 —	I_3 А	l_δ мм
1	1	20	4	413	1,1	12	6,06	—	—	38	4,05	250	1,0	0,5
2	2	80	5,7	300	0,6	25	3,9	200	—	80	9,5	—	—	—
3	5	20	4	100	0,3	10	8	300	—	30	5,6	250	0,21	—
4	6	33,5	7,6	500	0,21	12	12	600	0,05	45	11,3	975	—	—
5	9	45	15,4	300	1	22	10,4	—	—	40	15	400	0,5	1
6	10	45	44	300	0,5	15	14,2	—	0,3	35	13,7	—	—	—
7	13	20	3,9	215	1	10	4,8	—	0,1	26	4,6	500	0,2	—
8	14	17	7,9	615	0,1	5	4,8	420	0,05	26	4,4	150	—	—
9	17	60	60	400	0,65	20	84	—	—	60	60	400	0,57	1,25
10	18	50	25	500	0,7	28	51	—	—	50	50	300	—	—
11	3	12	2	100	—	4	1	500	0,04	12	1,2	196	0,1	—
12	4	40	3	300	0,2	12	5	390	—	40	8	—	—	—
13	7	20	8	—	—	7	2	500	0,2	20	1,78	500	0,3	0,1
14	8	25	5,3	100	0,5	10	5	—	0,2	32	10,2	—	—	—
15	11	30	8	1450	0,1	12	14	204	0,25	35	7	2000	—	—
16	12	25	3,8	76	0,25	12	7,6	275	—	32	10,1	160	0,5	—
17	15	15	7,2	135	0,47	8	4,8	—	0,1	20	2,9	70	0,2	—
18	16	85	100	3000	0,1	33	200	500	0,7	85	100	—	—	0,52

19	19	45	12	—	—	15	12	550	0,4	45	9	520	—	—
20	20	30	9	350	0,05	10	7,8	—	0,2	25	15	1175	0,1	—
21	1	30	4	300	1,52	10	6	—	—	30	4	100	2,5	0,5
22	2	100	6,15	600	0,3	33	4,2	200	—	100	10	—	—	—
23	5	30	4,3	300	0,1	12	6	300	—	20	4,8	125	0,42	—
24	6	30	7,3	105	1	11,5	12,3	100	0,3	22,5	10	975	—	—
25	9	32	14,4	400	0,75	25	10,5	—	—	40	15	200	1	1
26	10	40	42	375	0,4	13	14	—	0,3	40	15	—	—	—
27	13	30	4,2	430	0,5	10	4,8	—	0,1	32	4,9	200	0,5	—
28	14	19	8,1	400	0,15	6,5	5,1	210	0,1	15	3,2	150	—	—
29	17	55	55	260	1	18	84	—	—	57	57	230	1	1,25
30	18	55	25,3	700	0,5	25	50	—	—	47	45,5	300	—	—
31	3	11	1,95	100	—	3,5	0,96	400	0,05	13	1,25	66	0,3	—
32	4	35	2,9	240	0,25	10	4,75	390	—	45	8,33	—	—	—
33	7	13,5	7,5	—	—	4,32	1,9	100	1	19,8	1,75	300	0,5	0,1
34	8	30	5,6	250	0,2	10	5	200	—	18	8,9	—	—	—
35	11	28	7,95	290	0,5	11,5	13,8	51	1	37	7,1	2000	—	—
36	12	28	3,9	38	0,5	8	6,8	275	—	28	9,9	320	0,25	—
37	15	25	8	635	0,1	10	5	—	0,1	25	3	7	2	—
38	16	70	97	750	0,4	35	220	250	1,4	70	92	—	—	0,57
39	19	43	11,9	—	—	14	11,5	200	1,1	48	9,1	520	—	—
40	20	32	9,3	270	0,06	9	7,7	—	0,2	30	15,5	168	0,7	—
41	1	25	4	505	0,9	14	6,15	—	—	25	3,9	625	0,4	0,5
42	2	90	6	360	0,5	30	4	200	—	90	9,7	—	—	—
43	5	25	4,15	150	0,2	8	4	300	—	35	5,95	100	0,52	—

44	6	40	8	210	0,5	22,5	14	300	0,1	30	10	975	—	—
45	9	40	15	600	0,5	20	10,3	—	—	40	15	800	0,25	1
46	10	35	40	150	1	10	13,7	—	0,3	30	14,2	—	—	—
47	13	35	4,3	215	1	10	4,8	—	0,1	20	4,4	1000	0,1	—
48	14	16	7,8	205	0,3	5,5	4,9	300	0,07	23	4,2	150	—	—
49	17	65	71	520	0,5	22	84	—	—	62	62	460	0,5	1,25
50	18	48	24,9	350	1	30	51,5	—	—	52	51,5	300	—	—
51	3	13	2,05	100	—	3	0,94	1000	0,02	11	1,18	132	0,15	—
52	4	45	3,1	200	0,3	14	5,3	390	—	35	7,8	—	—	—
53	7	19,5	7,7	—	—	10	2,1	200	0,5	24,2	1,8	750	0,2	0,1
54	8	18	4,9	200	0,25	10	5	—	0,2	25	9,5	—	—	—
55	11	26	7,9	145	1	11	13,6	102	0,5	39	7,2	2000	—	—
56	12	35	4,1	19	1	6	6,3	275	—	25	9,6	400	0,2	—
57	15	20	7,7	107	0,59	9	4,9	—	0,1	15	2,6	20	0,7	—
58	16	100	104	125	2,4	28	182	125	2,8	95	200	—	—	0,48
59	19	40	11,8	—	—	13	11	100	2,2	50	9,3	520	—	—
60	20	34	9,5	175	0,1	12	8	—	0,2	28	15,6	47	2,5	—
61	1	35	4,1	350	1,3	8	5,8	—	—	20	3,8	500	0,5	0,5
62	2	90	6	100	1,8	30	4	—	1,1	85	9,7	—	—	—
63	5	15	3,8	60	0,5	6	2	300	—	20	4,8	350	0,15	—
64	6	37,5	7,8	200	0,52	13	12,8	150	0,2	37,5	10,5	975	—	—
65	9	35	14,6	900	0,3	18	10,2	—	—	40	15	1000	0,2	1
66	10	30	38	600	0,25	17	14,7	—	0,3	45	15,4	—	—	—
67	13	25	4	1075	0,2	10	4,8	—	0,1	29	4,8	2000	0,05	—
68	14	20	8,2	615	0,1	7	5,2	105	0,2	17	3,6	150	—	—

69	17	58	58	200	1,3	19	84	—	—	55	55	575	0,4	1,25
70	18	45	24,7	700	0,5	27	50,4	—	—	48	47,5	300	—	—
71	3	10	1,92	100	—	4,5	1,02	200	0,1	14	1,26	89	0,2	—
72	4	38	2,97	400	0,15	11	4,9	390	—	43	8,25	—	—	—
73	7	29,8	8,2	—	—	13	2,2	1000	0,1	25	1,82	200	0,75	0,1
74	8	32	6	125	0,4	10	5	200	—	20	9	—	—	—
75	11	32	8,1	725	0,2	12,5	14,1	170	0,3	33	6,9	2000	—	—
76	12	30	4	38	0,5	10	7	275	—	30	10	400	0,2	—
77	15	30	8,4	89	0,73	12	5,2	—	0,1	26	3	35	0,4	—
78	16	110	105	600	0,5	27	177	175	2	100	240	—	—	0,46
79	19	48	12,1	—	—	16	12,9	220	1	43	8,8	520	—	—
80	20	26	8,6	125	0,14	13	8,1	—	0,2	22	14,7	25	4,7	—

Обозначение величин снабжено индексами, которые указывают, к какой ветви магнитной цепи относится та или иная величина: индекс 1 – к левой магнитной ветви, индекс 2 – к средней ветви.

Магнитные свойства стали из которой изготовлены магнитопроводы определяются кривой намагничивания, заданной следующей таблицей 2.2.

Таблица 2.2 – Кривая намагничивания

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

3 Пример расчёта магнитной цепи

Исходными данными для расчёта магнитной цепи являются геометрические размеры магнитопровода [l, S], постоянный ток в катушке [I] и число витков катушки [W] (Таблица 2.1). Магнитные свойства стали, из которой изготовлен магнитопровод определяются кривой намагничивания, приведённой в таблице 2.2.

Расчёт магнитной цепи:

– рассчитать вебер-амперные характеристики каждого участка цепи;

– составить систему уравнений по I и II законам Кирхгофа;

– перестроить вебер-амперные характеристики относительно одного общего параметра цепи, в данном случае, относительно напряжения U_{mdk};

– определить напряжение U_{mdk} и потоки по ветвям, удовлетворяющих I закону Кирхгофа для магнитных цепей;

– определить разность магнитных потенциалов между указанными точками по двум путям.

Дано;

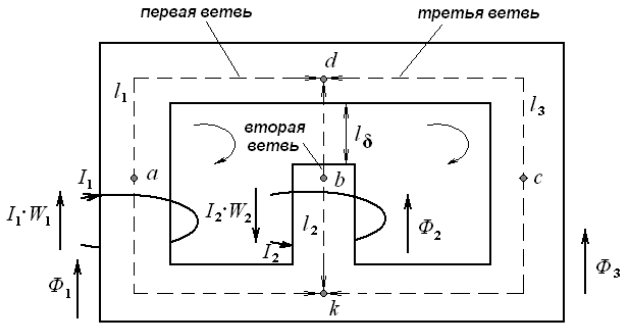

Рисунок 3.1 – Магнитная цепь

$l_1 = 100 см = 1 м$ $l_2 = 28 см = 0{,}28 м$ $l_3 = 95 см = 0.95 м$

$S_1 = 104 см^2 = 104 \cdot 10^{-4} м^2 S_2 = 182 см^2 = 182 \cdot 10^{-4} м^2 S_3 = 200 см^2 = 2 \cdot 10^{-2} м^2$

$W_1 = 125$ $W_2 = 125$ $l_\delta = 0{,}48 мм = 0{,}48 \cdot 10^{-3} м$

$I_1 = 2{,}4 A$ $I_2 = 2{,}8 A$

Т

Таблица 3.1 – Кривая намагничивания

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

Определить:

1. Магнитные потоки на каждом участке: Φ_1, Φ_2, Φ_3 ;
2. Магнитное напряжение U_{a-k-b} между двумя точками магнитной цепи (*a*, *b*).

По данным таблицы 3.1 строим кривую намагничивания – график 3.1.

Разбиваем магнитную цепь, рисунок 3.1, на участки постоянного сечения по точкам, т.е. с одинаковым сечением по всей длине участка (длины участков берём по средней силовой линии):

1-я ветвь с длиной ℓ_1 и площадью поперёчного сечения S_1: участок *k-a-d;*

2-я ветвь с длиной ℓ_2 и площадью поперечного сечения S_2 согласно принципа непрерывности магнитного потока Φ_2: участок *k-b-d*;

3-я ветвь с длиной ℓ_3 и площадью поперечного сечения S_3: участок *k-c-d.*

ℓ_δ – длина воздушного зазора второй ветви (*k-b-d*).

Выбираем положительные направления магнитных потоков Φ_1, Φ_2, Φ_3 вверх к узлу *d*.

По известным направлениям токов (I_1,I_2) в ветвях определяем положительные направления МДС (магнитодвижущей силы) в ветвях цепи ($F_м = I \cdot W$), используя правило правой руки: если сердечник мысленно охватить правой рукой так, чтобы четыре пальца её расположились по направлению тока в витках катушки, то отогнутый большой палец руки укажет направление МДС (I·W).

В нашей магнитной цепи в 1-й ветви МДС ($F_1 = I_1 \cdot W_1$) направлена вверх, во второй ветви МДС ($F_2 = I_2 \cdot W_2$) направлена вниз.

3.1 Рассчитаем вебер-амперные характеристики (ВАХ) каждого участка магнитной цепи, то есть рассчитываем зависимость магнитного потока (Φ) от падения магнитного напряжения $U_м$ на каждом участке:

$$\Phi_1 = f(U_{м1}),\ \Phi_2 = f(U_{м2}),\ \Phi_3 = f(U_{м3}).$$

Для расчета ВАХ сначала необходимо произвести следующие вычисления, результаты которых заносим в таблицу 3.2:

а) определим напряжённость магнитного поля H_δ воздушного зазора (ℓ_δ) второй ветви для каждого значения магнитной индукции (B) (от B = 0,22 Тл до B = 1,57 Тл) по кривой намагничивания из таблицы 3.1 по формуле:

$$H_\delta = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} = 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot B = 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 0{,}22 = 17600 \left[\frac{A}{м}\right]$$

и так далее.

$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Гн}{м}\right]$- постоянная магнитная проницаемость вакуума (воздуха);

б) Определяем падение магнитного напряжения ($U_{м\delta}$) в воздушном зазоре (ℓ_δ) 2-й ветви для каждого значения напряжённости магнитного поля воздушного зазора (H_δ) согласно полученных данных в таблице 3.2:

$$U_{м\delta} = \mathrm{H}_\delta \cdot l_\delta = 176000 \cdot 0{,}48 \cdot 10^{-3} = 84{,}48[A] \ ,$$

и так далее;

в) Определяем падение магнитного напряжения в 1-й ветви ($U_{м2}$) для каждого значения напряжённости магнитного поля (H) согласно кривой намагничивания (Таблица 3.1) от H = 20 А/м до H = 800 А/м:

$$U_{м1} = \mathrm{H}_1 \cdot l_1 = 20 \cdot 1 = 20[A],$$

и так далее;

г) Определяем падение магнитного напряжения во 2-й ветви ($U_{м2}$) для каждого значения напряжённости магнитного поля (H) согласно кривой намагничивания (Таблица 3.1) с учётом соответствующего магнитного напряжения воздушного зазора ($U_{м\delta}$):

$$U_{м2} = \mathrm{H}_2 \cdot l_2 + U_{мб} = 20 \cdot 0{,}28 + 84{,}48 = 90{,}08[A],$$

и так далее;

д) Определяем падение магнитного напряжения в 3-й ветви $(U_{м3})$ для каждого значения напряжённости магнитного поля (Н) согласно кривой намагничивания (Таблица 3.1) от Н = 20 А/м до Н = 800 А/м:

$$U_{м3} = \mathrm{H}_3 \cdot l_3 = 20 \cdot 0{,}95 = 19[A],$$

и так далее;

е) Определяем магнитные потоки в трёх ветвях цепи (Ф = В·S) для каждого значения магнитной индукции В согласно таблице 2.1 от В = 0,22 Тл до В=1,57 Тл:

$$\Phi_1 = \mathrm{B} \cdot \mathrm{S}_1 = 0{,}22 \cdot 104 \cdot 10^{-4} = 22{,}88 \cdot 10^{-4}[Вб],$$

и так далее;

$$\Phi_2 = \mathrm{B} \cdot \mathrm{S}_2 = 0{,}22 \cdot 182 \cdot 10^{-4} = 40 \cdot 10^{-4}[Вб],$$

и так далее;

$$\Phi_3 = \mathrm{B} \cdot \mathrm{S}_3 = 0{,}22 \cdot 200 \cdot 10^{-4} = 44 \cdot 10^{-4}[Вб],$$

и так далее;

Результаты всех вычислений заносим в таблицу 3.2.

По результатам вычислений (данные в таблице 3.2) по точкам строим вебер-амперные характеристики участков магнитной цепи (график 3.2).

Следует отметить, что все три характеристики симметричны относительно начала координат.

Характеристику $\Phi_2 = f(U_{м2})$ с воздушным зазором (участок длиной L_δ, где магнитный поток (Φ_2) проходит по воздуху) можно считать линейной зависимостью, она спрямляется и идёт более полого.

Две характеристики $\Phi_1 = f(U_{м1})$ и $\Phi_3 = f(U_{м3})$, которые не имеют воздушного зазора, круто поднимаются вверх.

Таблица 3.2 – Результаты расчётов вебер-амперных характеристик каждого участка магнитной цепи $\Phi_1(U_{м1})$, $\Phi_2(U_{м2})$, $\Phi_3(U_{м3})$

Таблица 3.2 – Результаты расчётов вебер-амперных характеристик каждого участка магнитной цепи $\Phi_1(U_{м1})$, $\Phi_2(U_{м2})$, $\Phi_3(U_{м3})$

B [Тл]	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57
H [А/м]	20	40	60	80	120	200	400	600	800
$H_\delta = \frac{B}{\mu_0}$ [А/м]	176000	600000	744000	816000	912000	1024000	1176000	1224000	1256000
$U_{м\delta} = H_\delta \cdot l_\delta$	84,48	288	357,12	391,68	437,76	491,52	564,48	587,52	602,88
$U_{м1} = H \cdot l_1$ [А]	20	40	60	80	120	200	400	600	800
$U_{м2} = H \cdot l_2 + U_{м\delta}$	90,08	299,2	373,92	414,08	471,36	547,52	676,48	755,52	826,88
$U_{м3} = H \cdot l_3$ [А]	19	38	57	76	114	190	380	570	760
$\Phi_1 = B \cdot S_1$ [Вб]	$22{,}88 \cdot 10^{-4}$	$78 \cdot 10^{-4}$	$96{,}72 \cdot 10^{-4}$	$106 \cdot 10^{-4}$	$118{,}56 \cdot 10^{-4}$	$133 \cdot 10^{-4}$	$152{,}9 \cdot 10^{-4}$	$159 \cdot 10^{-4}$	$163 \cdot 10^{-4}$
$\Phi_2 = B \cdot S_2$ [Вб]	$40 \cdot 10^{-4}$	$136{,}5 \cdot 10^{-4}$	$169 \cdot 10^{-4}$	$185{,}6 \cdot 10^{-4}$	$207{,}48 \cdot 10^{-4}$	$232{,}9 \cdot 10^{-4}$	$267{,}5 \cdot 10^{-4}$	$278{,}4 \cdot 10^{-4}$	$285{,}7 \cdot 10^{-4}$
$\Phi_3 = B \cdot S_3$ [Вб]	$44 \cdot 10^{-4}$	$150 \cdot 10^{-4}$	$186 \cdot 10^{-4}$	$204 \cdot 10^{-4}$	228·10-4	$256 \cdot 10^{-4}$	$294 \cdot 10^{-4}$	$306 \cdot 10^{-4}$	$314 \cdot 10^{-4}$

3.2. Составление системы уравнений по законам Кирхгофа

Законы Кирхгофа справедливы как для электрических, так и магнитных цепей.

По первому закону Кирхгофа: алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum \Phi = 0$$

Для нашей магнитной цепи:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 \qquad (3.1)$$

Выбираем направления обхода контуров по часовой стрелке.

Первый контур состоит из первой (участок *k–a–d*) и второй (участок *k–b–d*) ветвей. Второй контур состоит из первой и третьей (участок *k–c–d*) ветвей.

По второму закону Кирхгофа: алгебраическая сумма падений магнитного напряжения $H \cdot l$ вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС $I \cdot W$ вдоль того же контура:

$$\sum U_м = \sum I \cdot W$$

I контур:

$$U_{м1} - U_{м2} - U_{м\delta} = I_1 \cdot W_1 + I_2 \cdot W_2 \qquad (3.2)$$

или:

$$H_1 \cdot l_1 - H_2 \cdot l_2 - H\delta \cdot l\delta = I_1 \cdot W_1 + I_2 \cdot W_2$$

Перед $U_{м2}$ и $U_{м\delta}$ (магнитное напряжение воздушного зазора) ставим знак «минус», так как поток Φ_2 направлен встречно обходу контура.

II контур:

$$U_{м1} - U_{м3} = I_1 \cdot W_1 \qquad (3.3)$$

или:

$$H_1 \cdot l_1 - H_3 \cdot l_3 = I_1 \cdot W_1$$

Перед $U_{м3}$ ставим знак «минус», так как поток Φ_3 направлен встречно обходу II контура. Перед МДС $I \cdot W$ ставится знак «плюс», так как она совпадает с направлением обхода контуров.

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей есть иная форма записи закона полного тока: где сумма магнитных напряжений на отдельных участках равна полному току

$$\oint \overline{H} d\overline{l} = \sum I; \sum H \cdot l = \sum I \cdot W;$$

Совместное решение уравнений (3.1), (3.2), (3.3) с тремя неизвестными магнитными потоками Φ_1, Φ_2, Φ_3 на основе законов Кирхгофа трудоёмкое.

Более простым способом этого решения является метод двух узлов в применении к нелинейной цепи.

3.3 Определение магнитных потоков на Φ_1, Φ_2, Φ_3 участках магнитной цепи методом двух узлов.

В схеме два узла: узел *d*, узел *k*. Магнитное напряжение U_{mdk} – это разность магнитных потенциалов между узлами *d* и *k*:

$$U_{mdk} = \varphi_{md} - \varphi_{mk}$$

Для определения магнитных потоков Φ_1, Φ_2, Φ_3 магнитное напряжение U_{mdk} выразим по второму закону Кирхгофа через падение магнитного напряжения участков и МДС $I \cdot W$.

$U_{м1}$ – участок *k–a–d*

$U_{м2}$ – участок *k–b–d*

$U_{м3}$ – участок *k–c–d*

Задавшись положительным направлением магнитных потоков Φ_1, Φ_2, Φ_3 от узла *k* к узлу *d*, следуем от точки *k* к точке *d* сначала по первой ветви, затем по второй и по третьей ветвям.

По второму закону Кирхгофа:

1-я ветвь: $U_{м1} + U_{мdk} = I_1 \cdot W_1$, отсюда $U_{мdk} = I_1 \cdot W_1 - U_{м1}$ (3.4)

2-я ветвь: $U_{м2} + U_{мdk} = -I_2 \cdot W_2$, отсюда $U_{мdk} = -I_2 \cdot W_2 - U_{м2}$ (3.5)

Во второй ветви перед $I_2 \cdot W_2$ ставим знак «минус» т.к. перемещаясь от точки *k* к точке *d* по потоку Φ_2 следуем против направления МДС $I_2 \cdot W_2$.

3-я ветвь: $U_{м3} + U_{мdk} = 0$, отсюда $U_{мdk} = U_{м3}$ (3.6)

В третьей ветви МДС отсутствует.

Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{мdk} = I_1 \cdot W_1 - U_{м1} \\ U_{мdk} = -I_2 \cdot W_2 - U_{м2} \\ U_{мdk} = U_{м3} \end{cases} \quad (3.7)$$

Кроме указанных трёх уравнений сумма потоков в ветвях на основании I закона Кирхгофа должна равняться нулю, т.е.:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 \quad (3.8)$$

Решение проведём графическим методом.

Для этого на графике 3.3 в координатных осях Φ и $U_{мdk}$ построим характеристики ветвей, выраженные через магнитные напряжения $U_{мdk}$.

Кривую $\Phi_1 = f(U_{мdk})$, согласно выражению (3.4), получим путём параллельного смещения характеристики $\Phi_1 = f(U_{м1})$ в положительном направлении (в положительной оси $U_{мdk}$) от начала координат на величину МДС равную:

$$F_1 = I_1 \cdot W_1 = 2{,}4 \cdot 125 = 300[A]$$

и зеркального её отображения по отношению к вертикали, проведённой через точку F_1.

Кривую $\Phi_2 = f(U_{мdk})$, согласно выражению (3.5), получим путём параллельного смещения характеристики $\Phi_2 = f(U_{м2})$ в отрицательном направлении от начала координат (т.к. в выражении (3.5) перед МДС $I_2 \cdot W_2$ стоит знак «минус») на величину МДС равную:

$$F_2 = I_2 \cdot W_2 = 2{,}8 \cdot 125 = 350[A]$$

и зеркального её отображения по отношению к вертикали, проведённой через точку F_2.

Кривую $\Phi_3 = f(U_{мdk})$, согласно выражению (3.6), получим путём зеркального отражения характеристики $\Phi_3 = f(U_{м3})$ относительно оси координат в точке F_3.

Так как все три характеристики выражены через одно и то же магнитное напряжение $U_{мdk}$, проведём сложение магнитных потоков

Φ_1, Φ_2, Φ_3, задаваясь различными значениями $U_{мdk}$; получим зависимость $\sum \Phi(U_{мdk})$.

$$\sum \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$$

$$\text{при } U_{мdk} = -100: \sum \Phi = 150 - 118 + 220 = 252[Вб]$$

$$\text{при } U_{мdk} = -50: \sum \Phi = 146 - 114 + 184 = 186[Вб]$$

$$\text{при } U_{мdk} = -25: \sum \Phi = 142 - 154 + 112 = 100[Вб]$$

$$\text{при } U_{мdk} = 0: \sum \Phi = 141 - 164 + 0 = -23[Вб]$$

$$\text{при } U_{мdk} = 25: \sum \Phi = 140 - 172 - 78 = -110[Вб]$$

$$\text{при } U_{мdk} = 50: \sum \Phi = 138 - 180 - 162 = -204[Вб]$$

$$\text{при } U_{мdk} = 100: \sum \Phi = 134 - 200 - 212 = -278[Вб]$$

Строим результирующую В.А.Х. всей магнитной цепи на графике 3.3.

Для этого на графике на оси абсцисс от точек, равным заданным значениям $U_{мdk}$, проводим вертикали. На оси ординат от точек, соответствующих полученным значениям $\sum \Phi$, проводим горизонтали. Точки пересечения вертикалей с горизонталями дадут результирующую В.А.Х. – зависимость $\sum \Phi(U_{мdk})$.

Результирующая В.А.Х. пересекает ось абсцисс в точке *m*. Эта точка пересечения зависимости $\sum \Phi(U_{мdk})$ с осью абсцисс и есть решение системы уравнений (3.4), (3.5), (3.6).

Эта точка *m* даёт величину и знак искомого магнитного напряжения $U_{мdk}: U_{мdk} = -7[A]$

Проведём через точку *m* вертикаль. Ординаты точек пересечения (*a, b, c*) характеристик $\Phi_1 = f(U_{мdk})$, $\Phi_2 = f(U_{мdk})$ и $\Phi_3 = f(U_{мdk})$ с вертикалью дают значения искомых магнитных потоков Φ_1, Φ_2, Φ_3 по величине и знаку. В результате графического расчёта имеем:

$$\Phi_1 = 144 \cdot 10^{-4}[Вб], \Phi_2 = -160 \cdot 10^{-4}[Вб], \Phi_3 = 16 \cdot 10^{-4}[Вб]$$

Согласно первому закона Кирхгофа выражение (3.1) должно определяться суммой магнитных потоков, равной нулю.

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

Проверяем значения полученных результатов:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 144 \cdot 10^{-4} + (-160 \cdot 10^{-4}) + 16 \cdot 10^{-4} = 0$$

В результате расчёта поток Φ_2 оказался отрицательным $(-160 \cdot 10^{-4})$.

Это значит, что в действительности на схеме на рисунке 3.1 он направлен противоположно (вниз) направлению, показанному стрелкой.

3.4. Определение разности магнитных потенциалов между двумя точками магнитной цепи *a* и *b* $U_{мab}$ по двум путям

Согласно указания к заданию, сначала определяем магнитное напряжение $U_{мab}$ по пути через точку *k*.

Затем определяем $U_{мab}$ по другому пути через точки *k, c, d*.

Магнитное напряжение $U_{мab}$ – это разность магнитных потенциалов между точками *a* и *b*.

$$U_{мab} = \varphi_{мab} - \varphi_{мab}$$

Это значит, что потенциал точки *a* выше потенциала точки *b*, поэтому следуем по пути от меньшего потенциала (точки *b*) к большему потенциалу (точка *a*).

Для первого пути двигаемся по точкам в направлении: *b–k–a*.

Для второго пути движемся по точкам в направлении: *b–k–c–d–a*. Определяем разность магнитных потенциалов U_{makb} по первому пути.

$$U_{makb} = \varphi_{ма} - \varphi_{мb}$$

Выразим магнитный потенциал точки «*a*» $\varphi_{ма}$ через магнитный потенциал точки «*b*» $\varphi_{мb}$, следуя от точки «*b*» к точке «*a*» по первому пути.

$$\varphi_{ма} = \varphi_{мb} + \frac{U_{м2}}{2} + I_2 \cdot W_2 - \frac{U_{м1}}{2} + I_1 \cdot W_1$$

$$U_{\text{makb}} = \varphi_{\text{ма}} - \varphi_{\text{мb}} = \frac{U_{м2}}{2} + \mathrm{I}_2 \cdot W_2 - \frac{U_{м1}}{2} + I_1 \cdot W_1 = \\ = \frac{H_2 \cdot l_2}{2} + I_2 \cdot W_2 - \frac{H_1 \cdot l_1}{2} + I_1 \cdot W_1 \qquad (3.9)$$

Для второго пути следуем от точки «*b*» к точке «*a*» через точки «*k*», «*c*», «*d*».

$$\varphi_{ма} = \varphi_{мb} + \frac{U_{м2}}{2} + I_2 \cdot W_2 - U_{м3} + \frac{U_{м1}}{2}$$

$$U_{\text{madckb}} = \varphi_{ма} - \varphi_{мb} = \frac{U_{м2}}{2} + \mathrm{I}_2 \cdot W_2 - U_{мз} + \frac{U_{м1}}{2} =$$
$$= \frac{H_2 \cdot l_2}{2} + I_2 \cdot W_2 - \mathrm{H}_з \cdot \mathrm{l}_з + \frac{H_1 \cdot l_1}{2} \qquad (3.10)$$

На первом участке пути встречаются две МДС $I \cdot W$, на втором участке – одна МДС.

Знак «плюс» ставится перед магнитным напряжением $U_м$, когда перемещаемся против магнитного потока *Ф;* и наоборот, ставим «минус» когда перемещаемся согласно с направлением магнитного потока *Ф*.

Знак «плюс» ставится перед МДС, когда перемещаемся от точки «*b*» к точке «*a*», идём согласно с направлением МДС (т.е. идём по стрелке); и наоборот, ставим знак «минус» когда перемещаемся против направления МДС (т.е. идём против стрелки).

По известным магнитным потокам $Ф_1, Ф_2, Ф_3$ определяем магнитные индукции *B* на каждом участке (для каждой ветви l_1, l_2, l_3), которые имеют различные площади поперечного сечения *S*:

$$B_1 = \frac{Ф_1}{S_1} = \frac{144 \cdot 10^{-4}}{104 \cdot 10^{-4}} = 1{,}385[Тл]$$

$$B_2 = \frac{Ф_2}{S_2} = \frac{-160 \cdot 10^{-4}}{182 \cdot 10^{-4}} = -0{,}879[Тл]$$

$$B_3 = \frac{Ф_3}{S_3} = \frac{16 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} = 0{,}08[Тл]$$

По кривой намагничивания (График 3.1) определяем напряжённости поля участков:

$$H_1 = 287\left[\frac{A}{м}\right], H_2 = -53\left[\frac{A}{м}\right], H_3 = 13{,}7\left[\frac{A}{м}\right]$$

Подставив числовые значения в выражения (3.9) и (3.10), получим:

$$U_{мakb} = \frac{-53 \cdot 0{,}28}{2} + 2{,}8 \cdot 125 - \frac{287 \cdot 1}{2} + 2{,}4 \cdot 125 =$$
$$= -7{,}42 + 350 - 143{,}5 + 300 = 499{,}08A$$

$$U_{мadckb} = \frac{-53 \cdot 0{,}28}{2} + 2{,}8 \cdot 125 - 13{,}7 \cdot 0{,}95 + \frac{287 \cdot 1}{2} =$$
$$= -7{,}42 + 350 + 13{,}015 + 143{,}5 = 499{,}08A$$

При сравнении полученных результатов разность магнитных потенциалов между точками «*a*» и «*b*» по двум путям одинаковая:

$$U_{мab} = 499{,}08A$$

В некоторых вариантах МДС одной из обмоток неизвестна. Чтобы система уравнений (3.7) была решена даётся дополнительное условие: например, $\Phi_1 = \Phi_2$ и пусть неизвестна МДС ($I_2 \cdot W_2$). В этом случае из в уравнении (3.8) исключают поток Φ_2:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 2 \cdot \Phi_1 + \Phi_3 = 0 \qquad (3.11)$$

Для определения $U_{мdk}$ в соответствии с дополнительным условием строят зависимости по уравнениям (3.4) и (3.6), которые складываются. В точке пересечения с осью абсцисс суммарной характеристики (3.11) определяют $U_{мdk}$ и соответственно потоки Φ_1 и Φ_2.

Затем по уравнениям (3.7) находят $I_2 \cdot W_2$.

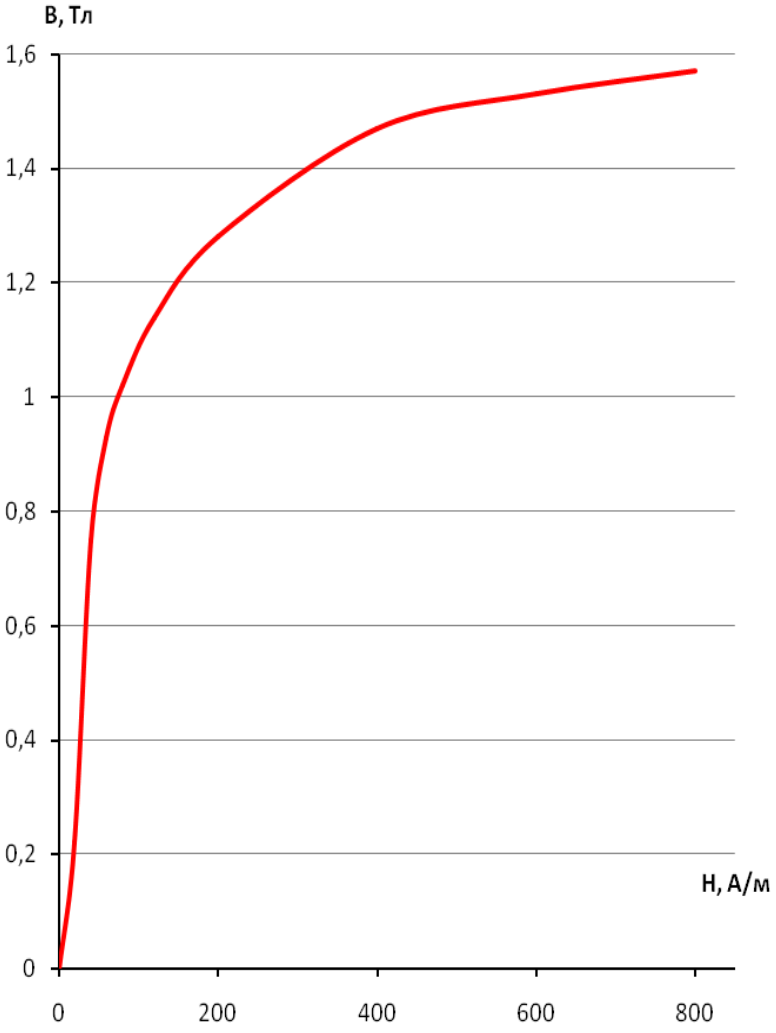

График 3.1 – Кривая намагничивания

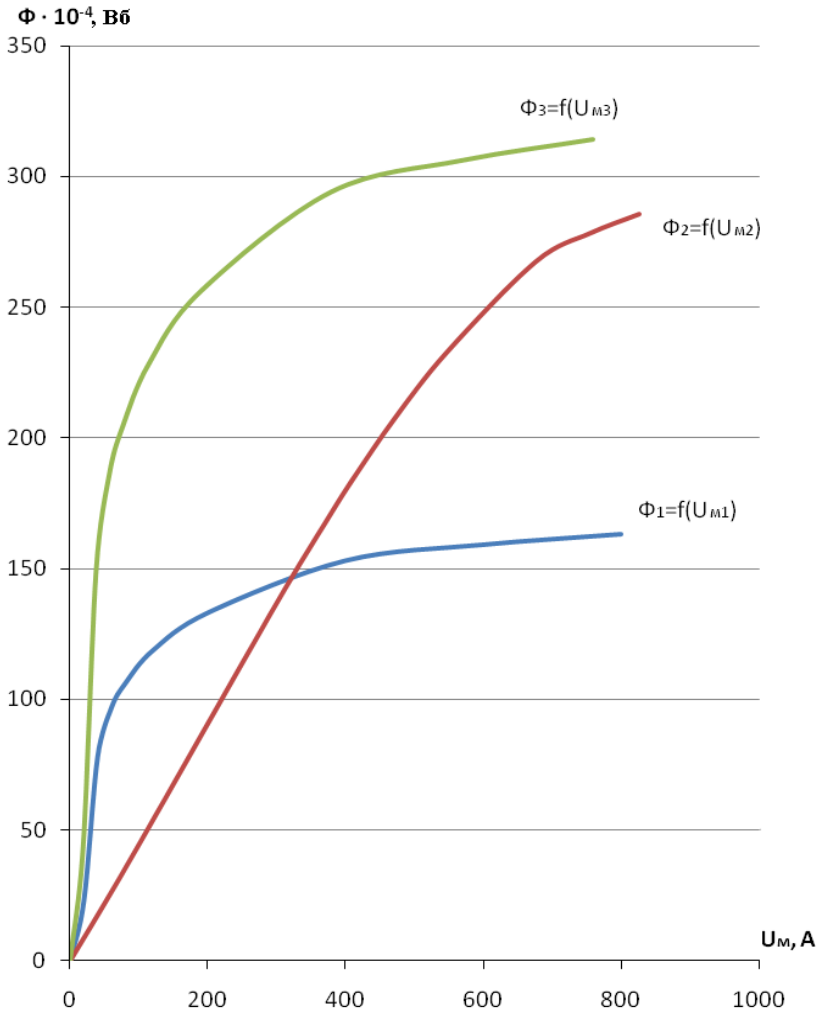

График 3.2 – Вебер-амперные характеристики участков магнитной цепи

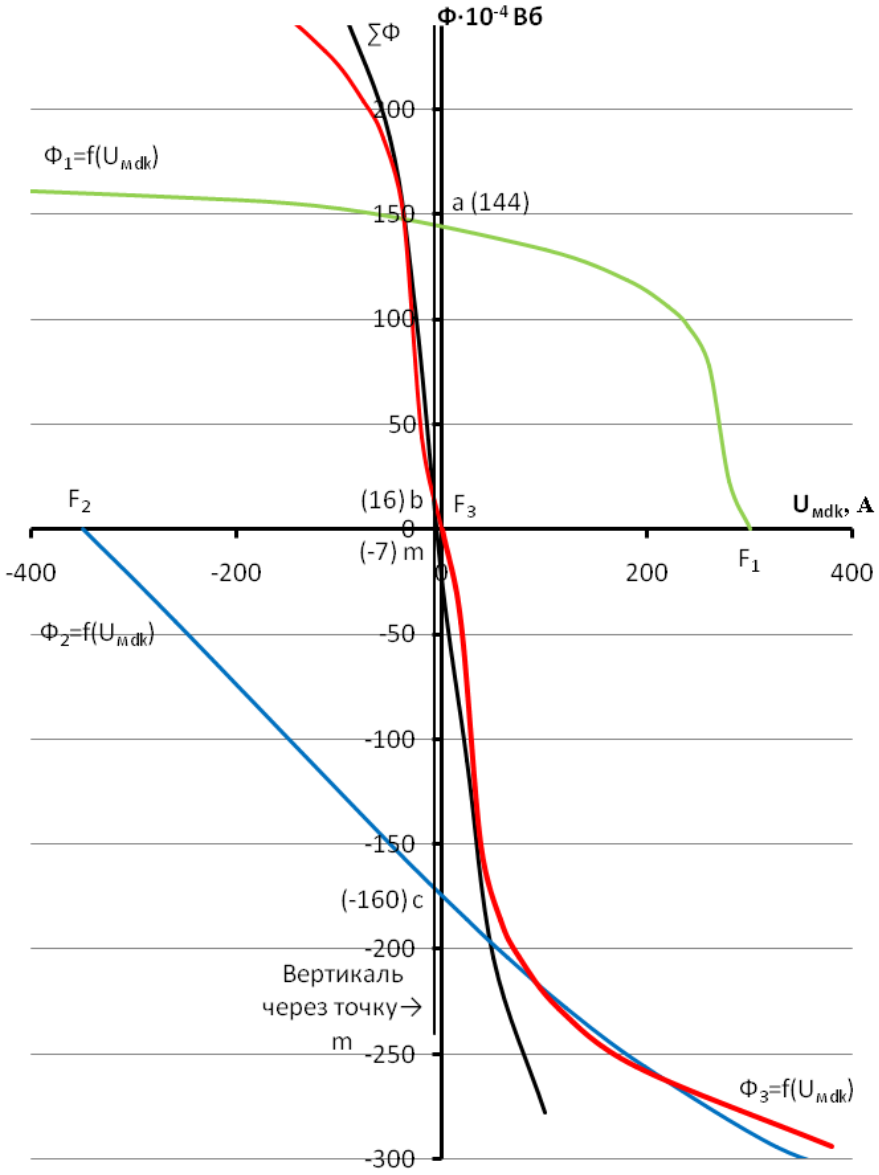

График 3.3 – Графическое решение методом двух узлов