

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Расчетно-графическая работа**

**№4**

© **Теоретические основы электротехники: учеб. пособие.** / *К.В. Киреев, В.Е. Высоцкий, А.П. Новикова.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. [РГР№7]

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ**

При изучении курса ТОЭ студенты приобретают необходимые знания об основных методах расчета и физических процессах, происходящих в электрических цепях и электромагнитных полях. Одним из основных видов самостоятельной работы по курсу является выполнение расчетно-графических работ.

Расчетно-графические работы планируются и выполняются с целью:

- углубления и закрепления теоретических знаний;
- приобретения навыков выполнения электротехнических расчетов, освоения технической документации;
- проверки усвоения учебного материала курса.

К представленным работам предъявляются следующие требования:

1. Основные положения и этапы решения задач должны быть достаточно подробно пояснены.

2. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены на отдельном листе бумаги, аккуратно и в удобочитаемом масштабе.

3. В работе следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний рецензента.

4. Вычисления должны быть проведены с точностью до третьей значащей цифры.

5. Работа должна быть датирована и подписана студентом.

6. Незачтенное задание должно быть выполнено заново и сдано на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправления ошибок в отрецензированном тексте не допускаются. Если неправильно выполнена не вся работа, а только ее часть, то переработанный и исправленный текст следует записать после первоначального текста под заголовком «Исправление ошибок».

Работа зачитывается, если решения не содержат ошибок принципиального характера и выполнены все перечисленные требования.

Работа над заданием помогает студентам проверить степень усвоения ими курса, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли. Для успешного достижения этой цели необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Начиная решение задачи, указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов.

2. Тщательно продумать, какие буквенные или цифровые обозначения предполагается использовать в решении. Пояснить значение каждого обозначения.

3. В ходе решения задачи не следует изменять однажды принятые направления токов и наименование узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием. При решении одной и той же задачи различными методами одну и ту же величину следует обозначить одним и тем же буквенным символом.

4. Расчет каждой искомой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученное выражение подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.

5. При решении системы уравнений целесообразно воспользоваться матричным методом с последующим использованием вычислительной техники.

6. Промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста.

### **Оформление работы**

1. Работа оформляется на бумаге форматом 210×297 мм (А4) в соответствии с требованиями ЕСКД и действующих ГОСТов и стандартов учебного заведения.

2. Образец титульного листа приведен на стр. 14.

3. Работа должна содержать разделы, отражающие все этапы расчета (каждый этап должен иметь свой подзаголовок):

3.1. Номер, название и цель работы.

3.2. Предварительные сведения. Приводятся исходные данные, расчетная схема, расчетные формулы, результаты предварительных расчетов.

3.3. Основные расчеты приводятся сначала в общем виде, а затем с подстановкой числовых значений. Формулы обозначаются порядковыми номерами в скобках. Решение не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

Результаты расчетов сводятся в таблицы, приводятся все формулы, по которым делались эти расчеты, поясняющие диаграммы и графики, краткий анализ результатов.

3.4. Графическая часть отчета (схемы, таблицы, диаграммы, графики) выполняется с применением чертежных инструментов или с помощью соответствующих программных пакетов. Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, приведенными в учебниках по ТОЭ.

4. Графики строят в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают независимую физическую величину, а по вертикальной оси (оси ординат) – зависимую физическую величину. Графики, отражающие закономерные зависимости величин, вычерчиваются плавными линиями. Чтобы масштабная шкала легко читалась, необходимо выбрать удобную для восприятия цену деления шкалы. После нанесения масштабных делений на осях указывают их значения.

5. По каждому этапу в работе приводятся обобщения и выводы. В выводах подчеркиваются основные теоретические положения и практическое значение исследуемых явлений.

6. В конце отчета помещается список литературы и программного обеспечения, использованных при выполнении и оформлении расчетно-графической работы.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

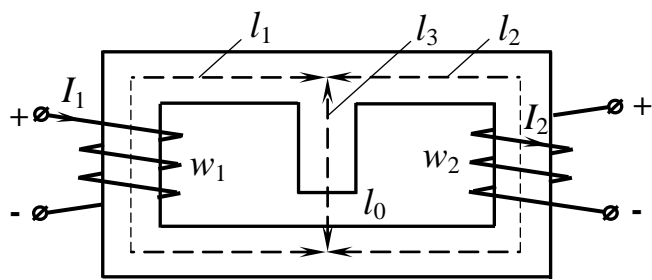
### РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Разветвленная магнитная цепь (рис. 1) состоит из ферромагнитного сердечника с воздушным зазором и двух катушек.

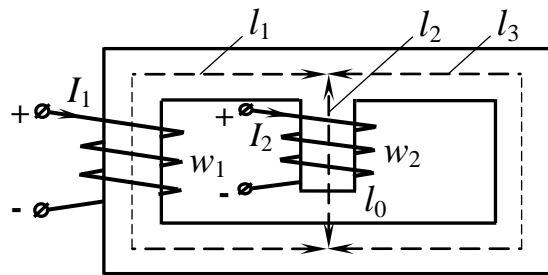
Сердечник изготовлен из листовой стали, кривая намагничивания которой приведена в табл. 1. Размеры  $l_1, l_2, l_3$  сердечника, числа витков катушек  $w_1$  и  $w_2$ , а также токи  $I_1$  и  $I_2$  в катушках даны в табл. 2. Сечения  $S$  всех участков цепи одинаковы и равны  $15 \text{ см}^2$ , длина воздушного зазора во всех случаях равна  $l_0 = 0,2 \text{ см}$ .

*Таблица 1*

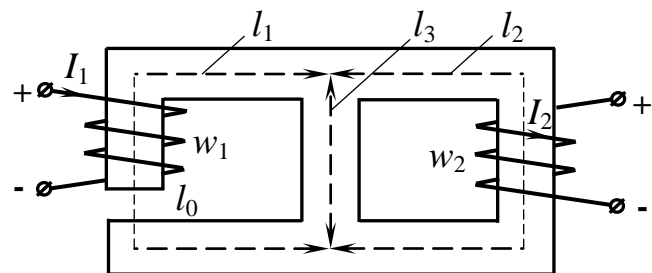
B, Тл	H, А/м (по вариантам)					
	1,7,13,19,25, 31,37,43,49,55	2,8,14,20,26, 32,38,44,50,56	3,9,15,21,27, 33,39,45,51,57	4,10,16,22,28, 34,40,46,52,58	5,11,17,23,29, 35,41,47,53,59	6,12,18,24,30, 36,42,48,54,60
0	0	0	0	0	0	0
0,5	200	100	150	100	100	100
0,6	230	200	230	200	150	150
0,7	300	300	300	250	200	150
0,8	400	400	-	300	250	200
0,9	500	500	500	400	300	200
1,0	670	600	-	450	400	250
1,1	900	700	900	500	550	350
1,2	1200	900	-	550	800	550
1,3	1600	1150	1600	600	1300	900
1,4	2250	1500	-	700	2000	1500
1,5	3200	2000	3200	900	3300	2300
1,6	4700	2650	-	1100	7500	4500
1,7	8000	4000	8000	1350	15000	10000
1,75	-	-	-	-	-	15000
1,8	13000	9000	13000	1800	-	-
1,85	-	15000	-	-	-	-
1,9	-	-	-	2500	-	-
2,0	-	-	-	3600	-	-
2,1	-	-	-	15000	-	-



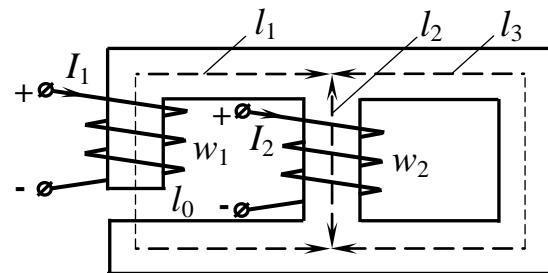
вариант 1-3



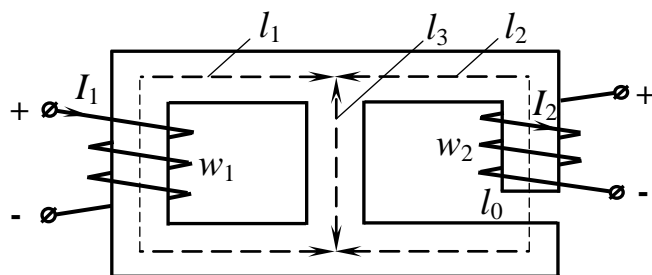
вариант 16-18



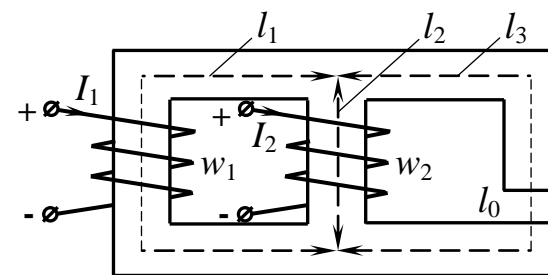
вариант 4-6



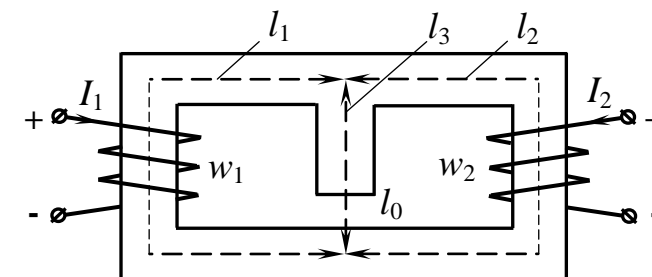
вариант 19-21



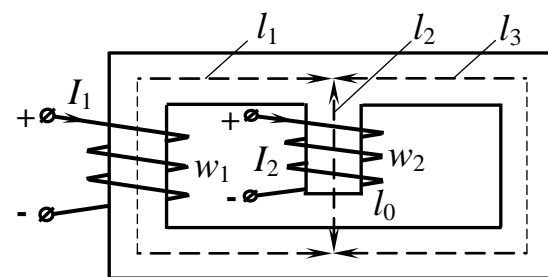
вариант 7-9



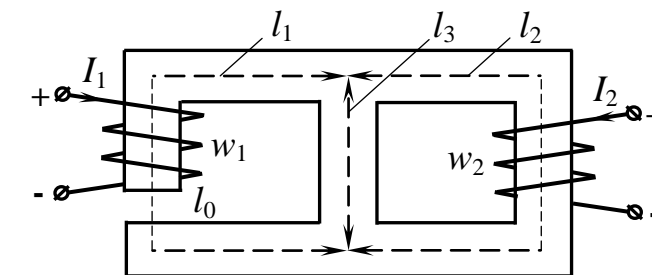
вариант 22-24



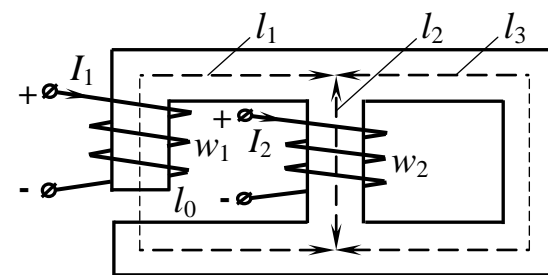
вариант 10-12



вариант 25-27

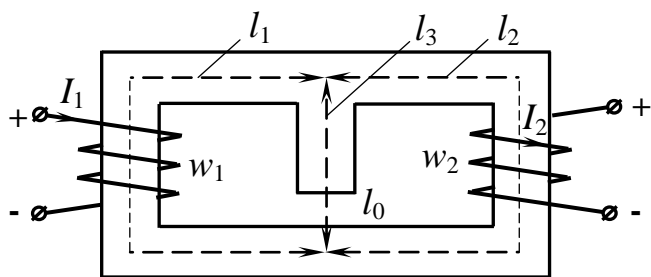


вариант 13-15

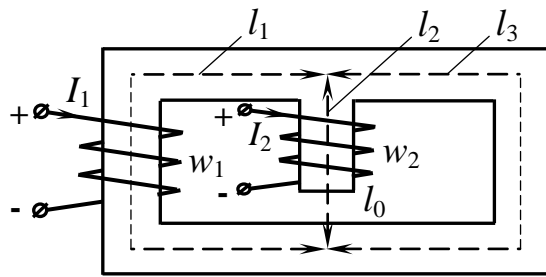


вариант 28-30

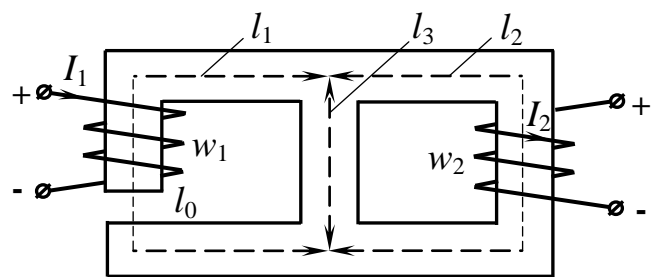
Рис.1



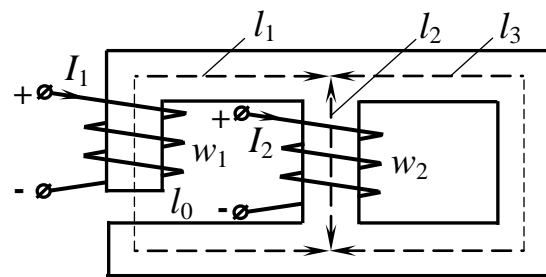
вариант 31-33



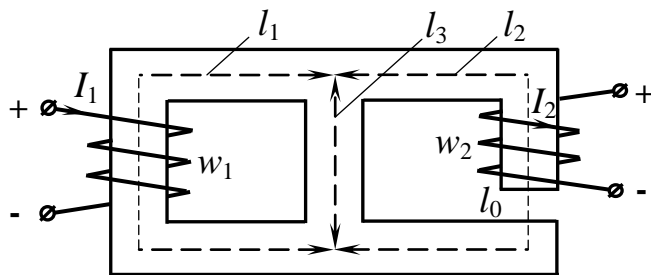
вариант 46-48



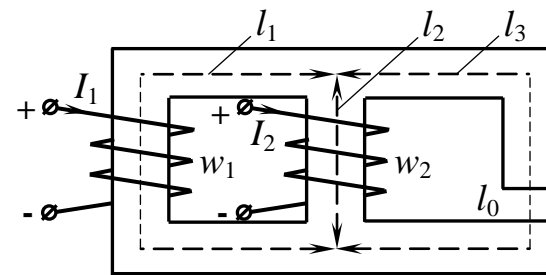
вариант 34-36



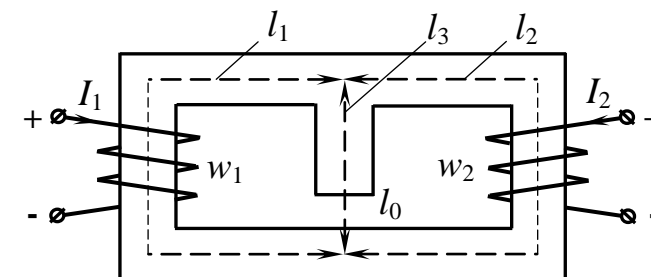
вариант 49-51



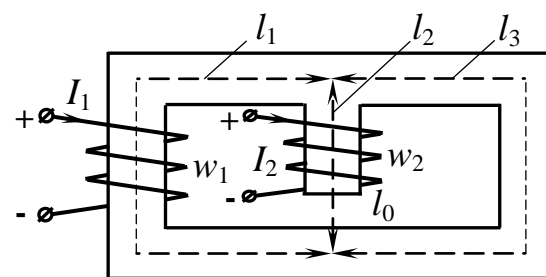
вариант 37-39



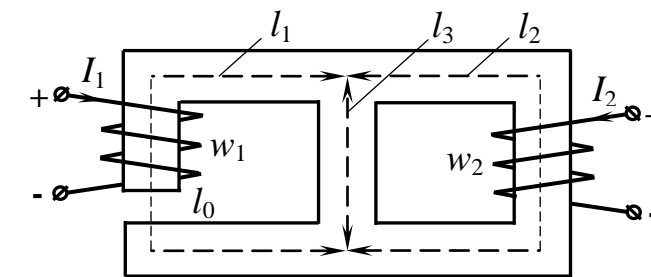
вариант 52-54



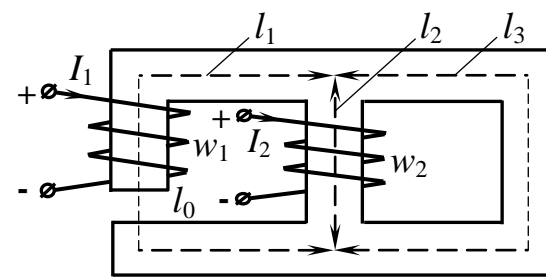
вариант 40-42



вариант 55-57



вариант 43-45



вариант 58-60

Рис.1

Таблица 2

Вариант	Токи		Число витков		Длина участков			Вариант	Токи		Число витков		Длина участков		
	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$w_1$	$w_2$	$l_1$ , см	$l_2$ , см	$l_3$ , см		$I_1$ , А	$I_2$ , А	$w_1$	$w_2$	$l_1$ , см	$l_2$ , см	$l_3$ , см
1	12	8	200	200	35	35	16	26	10	6	330	400	30	30	10
2	10	10	250	180	40	40	15	27	12	4	300	500	35	35	12
3	11	5	240	360	37	37	16	28	4	7	25	50	100	100	30
4	12	8	200	200	35	35	16	29	5	5	20	700	90	90	35
5	10	10	250	180	40	40	15	30	2	12	50	300	110	110	40
6	11	5	240	360	37	37	15	31	4	7	25	500	100	100	30
7	12	8	200	200	35	35	16	32	5	5	20	700	90	90	35
8	10	10	250	180	40	40	15	33	2	12	30	300	110	110	40
9	11	5	240	360	37	37	16	34	4	7	25	500	100	100	30
10	4	10	50	400	40	40	14	35	5	5	20	700	90	90	35
11	3	15	40	280	40	40	13	36	2	12	50	300	110	110	40
12	5	18	40	220	42	42	15	37	12	8	200	200	35	35	16
13	4	10	50	400	40	40	14	38	10	10	250	180	40	40	15
14	3	15	40	280	40	40	13	39	11	5	240	360	37	37	16
15	5	18	40	220	42	42	15	40	4	10	50	400	40	40	14
16	4	10	50	400	40	40	14	41	3	15	40	280	40	40	13
17	3	15	40	280	40	40	13	42	5	18	40	220	42	42	15
18	5	18	40	220	42	42	15	43	4	10	50	400	40	40	14
19	10	7	360	240	30	30	10	44	3	15	40	280	40	40	13
20	12	5	330	400	30	30	10	45	5	18	40	220	42	42	15
21	12	4	300	500	35	35	12	46	4	10	50	400	40	40	14
22	10	7	360	240	30	30	10	47	3	15	40	280	40	40	13
23	12	7	300	400	35	35	12	48	5	18	40	220	42	42	15
24	12	4	300	500	35	35	10	49	10	7	360	240	30	30	10
25	10	7	360	240	30	30	10	50	12	5	330	400	30	30	10



Таблица 2

Вариант	Токи		Число витков		Длина участков			Вариант	Токи		Число витков		Длина участков		
	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$w_1$	$w_2$	$l_1$ , см	$l_2$ , см	$l_3$ , см		$I_1$ , А	$I_2$ , А	$w_1$	$w_2$	$l_1$ , см	$l_2$ , см	$l_3$ , см
51	11	5	240	360	37	37	16	56	12	5	330	400	30	30	10
52	12	8	200	200	35	35	16	57	12	8	200	200	35	35	16
53	10	10	250	180	40	40	15	58	10	7	360	240	30	30	10
54	11	5	240	360	37	37	16	59	12	7	300	400	35	35	12
55	12	8	200	200	35	35	16	60	4	10	50	400	40	40	14

Требуется:

- 1) определить магнитные потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  в сердечнике без учета потоков рассеивания;
- 2) определить магнитную индукцию  $B_0$  в воздушном зазоре;
- 3) определить магнитные сопротивления  $R_M$  участков цепи;
- 4) определить индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  катушек.

### Методические указания

Чтобы сконцентрировать магнитный поток, а также уменьшить величину МДС и мощность катушки при заданном значении магнитной индукции (магнитного потока  $\Phi$ ), электротехнические устройства выполняют на ферромагнитных сердечниках.

Нелинейность магнитных цепей определяется нелинейным характером зависимости  $\Phi(U_M)$ , являющейся аналогом вольт-амперной характеристики  $I(U)$ , которая определяется характеристикой ферромагнитного материала  $B(H)$ . При расчете магнитных цепей при постоянных потоках обычно используют основную кривую намагничивания (ОКН). Петлеобразный характер зависимости  $B(H)$  учитыва-

ется при расчете электромагнитных устройств с переменными магнитными потоками.

В зависимости от конфигурации магнитопровода различают неразветвленные и разветвленные магнитные цепи. *Неразветвленная магнитная цепь* представляет собой один магнитный контур, т.е. различные участки цепи соединены между собой последовательно и по ним проходит один и тот же магнитный поток. *Разветвленные магнитные цепи* имеют несколько контуров, содержащих МДС.

Расчет разветвленных магнитных цепей основан на совместном применении первого и второго законов Кирхгофа для магнитных цепей, поэтому для них применимы основанные на этих законах методы расчета нелинейных электрических цепей.

При расчете магнитных цепей встречаются два типа задач.

*Прямая задача* (задача синтеза) – задача определения МДС (тока  $I$  и числа витков  $w$  катушки), необходимой для создания заданного магнитного потока (магнитной индукции) на участке магнитопровода с известными геометрическими размерами и материалом.

*Обратная задача* (задача анализа) – задача нахождения потоков (магнитных индукций) на отдельных участках цепи по известным значениям МДС, геометрическим размерам и материалу магнитопровода.

Основные моменты решения обратной задачи при расчете разветвленных магнитных цепей:

1. Использование формальной аналогии между магнитными и электрическими цепями позволяет решать такие задачи с использованием графических методов, применяемых при анализе нелинейных электрических цепей постоянного тока [1,2].

2. Замена магнитной цепи эквивалентной электрической схемой замещения упрощает расчет. Наличие воздушного зазора у магнитопровода учитывается введением в ветвь схемы замещения линейного сопротивления.

3. При расчете магнитных цепей, содержащих два узла (такую конфигурацию имеет большое число используемых на практике магнитопроводов), целесообразно использовать метод двух узлов.

Перед расчетом магнитной цепи необходимо определить (указать на схеме) направления МДС по известным направлениям токов в обмотках (по правилу правого винта).

Затем задаются положительными направлениями магнитных потоков (в ветвях с МДС направления потоков совпадают с направлением МДС, в других ветвях они выбираются произвольно). Направления падений магнитного напряжения в ветвях совпадают с направлениями потоков в этих ветвях.

После этого переходят к составлению эквивалентной схемы замещения и расчетам.

В общем случае решение задачи сводится к следующим основным этапам:

1. Вычисляются зависимости  $\Phi_k(U_{M_{ab}})$  потоков во всех  $k$  ветвях магнитной цепи в функции общей величины – магнитного напряжения  $U_{M_{ab}}$  между узлами  $a$  и  $b$  цепи.

2. Определяется, для какой точки на графиках вебер-амперных характеристик выполняется первый закон Кирхгофа  $\sum \Phi_k(U_{M_{ab}}) = 0$ . Значения потоков, соответствующие данной точке, являются решением задачи.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие основные векторные величины характеризуют процессы в магнитных цепях?
2. Какие основные скалярные величины характеризуют процессы в магнитных цепях?
3. Как определить положительное направление МДС?
4. Назовите основные законы магнитных цепей?
5. Сформулируйте закон непрерывности магнитного потока и закон полного тока.
6. Сформулируйте законы Кирхгофа и Ома для магнитных цепей.

7. Чем обуславливается нелинейность магнитной цепи?
8. Проведите аналогию между электрическими и магнитными цепями?
9. В чем заключаются основные допущения, принимаемые при расчете магнитных цепей?
10. Чем отличаются разветвленные магнитные цепи от неразветвленных?
11. Какие два типа задач встречаются при расчете магнитных цепей? Дайте им характеристику.
12. Какими методами решаются «прямые» задачи?
13. Какими методами решаются «обратные» задачи?
14. Что называется основным магнитным потоком?
15. Что называется магнитным потоком рассеяния?
16. Для чего в магнитные цепи электрических машин и аппаратов вводятся ферромагнитные сердечники?
17. Какие ферромагнитные материалы и почему используются для изготовления сердечников для машин переменного тока?

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Демирчян К.С., Л.Р. Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.* Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 2 т. – М.; СПб.: Питер, 2009.
2. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. – М.: Юрайт, 2016.
3. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебник. – М.; СПб.: Лань. 2010.
4. *Киреев К.В., Мякишев В.М.* Теоретические основы электротехники: Линейные цепи постоянного и синусоидального тока. Трехфазные цепи. Цепи несинусоидального тока: учеб. пособ. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2014.
5. *Киреев К.В., Мякишев В.М.* Теоретические основы электротехники: Переходные процессы. Магнитные цепи. Длинные линии: учеб. пособ. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2014.
6. *Киреев К.В.* Теоретическая электротехника: Виртуальная лаборатория в Multisim 10. Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока. – М.: Энергоатомиздат, 2008.

7. *Киреев К.В.* Теоретическая электротехника: Виртуальная лаборатория в Multisim 11. Переходные процессы в линейных электрических цепях. – М.: Машиностроение, 2012.
8. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: в 2 т. / *П.А. Бутырин, Л.В. Алексейчик, С.А. Важнов* и др.; под ред. чл.-корр. РАН *П.А. Бутырина*. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
9. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / *Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди, С.Е. Рисовская, С.А. Миленина, В.П. Каменская*. – М.: Высш. шк., 2003.
10. Задачник по теории линейных электрических цепей / *М.Р. Шебес, М.В. Каблукова*. – М.: Высш. шк., 1990.
11. *Коровкин Н.В., Семина Е.Е., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники. Сборник задач: учеб. пособ. для вузов. – СПб.: Питер, 2006.
12. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах: практ. пособ. / *В.А. Прянишников, Е.А. Петров, Ю.М. Осипов*. – СПб.: Корона-принт, 2001.
13. *Башарин С.А., Федоров В.В.* Теоретические основы электротехники: учеб. пособ. – М.: АСАДЕМА, 2004.
14. *Евдокимов Ф.Е.* Теоретические основы электротехники: учебник. – М.: АСАДЕМА, 2004.
15. *Батура М.П., Кузнецов А.П., Курулев А.П.* Теория электрических цепей: учебник. – Минск: Вышэйш. шк., 2007.
16. *Бакалов В.П., Журавлева О.Б., Крук Б.И.* Основы анализа цепей: учеб. пособ. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007.
17. *Бутырин П.А., Коровкин Н.В.* Теоретические основы электротехники. Интернет-тестирование базовых знаний: учеб. пособие.– М.; СПб.: Лань. 2010.
18. *Киреев К.В.* Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока: лабораторный практикум. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2012.
19. *Киреев К.В.* Линейные электрические цепи синусоидального тока: лабораторный практикум. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013.
20. *Киреев К.В.* Электрические цепи несинусоидального тока: лабораторный практикум. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013.

*Пример оформления титульного листа*

Самарский государственный технический университет  
Кафедра «Теоретическая и общая электротехника»

**Расчетно-графическая работа №4**

**РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНТНОЙ ЦЕПИ**

*Вариант №* \_\_\_

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
*(Курс, факультет, группа, ФИО)*

Принял \_\_\_\_\_  
*(Должность, ФИО преподавателя)*

Самара – 20\_\_\_

