

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Методические рекомендации для
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

Б1.Б.12 Электротехника и электроника

Направление подготовки (специальность) 27.03.04 Управление в технических системах

Профиль подготовки (специализация) Интеллектуальные системы обработки информации и управления

Квалификация выпускника бакалавр

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	3
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ	3
КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	3
2.1 Цели и задачи курсовой работы	3
2.2 Порядок и сроки выполнения курсовой работы	3
Структура курсовой работы (проекта):.....	4
2.4 Требования к оформлению курсовой работы (проекта).....	4
2.5 Критерии оценки:.....	5
2.6 Рекомендуемая литература.	5
4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ	6
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ	6
4.1 Темы индивидуальных домашних заданий	6
4.2 Содержание индивидуальных домашних заданий	6
4.3 Порядок выполнения заданий.....	7
4.4 Пример выполнения задания	7
5. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО	10
САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ.....	10
1. “Электромагнетизм”	10
6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	23
ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ	23
6.1 Лабораторная работа 1 (ЛР 1) «Исследование цепи постоянного тока с последовательны и параллельным включением элементов»	
6.2 Лабораторная работа 2 (ЛР2) «Исследование законов Кирхгофа и метода наложения в сложной электрической цепи постоянного тока.».....	23
6.3 Лабораторная работа 3 (ЛР 3) «Исследование прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов»	23
6.4 Лабораторная работа 4 (ЛР 4) «Усилитель постоянного тока»	
6.5 Лабораторная работа 5 (ЛР 5) «Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя при работе со сглаживающими фильтрами»	
6.6 Лабораторная работа 6 (ЛР 6) «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»	
6.22 Практическое занятие1 (ПЗ 1) “ Расчет трансформаторов ”.....	24

1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п.п .	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы				
		подго- товка курсово- го проек- та (рабо- ты)	подготовка рефера- та/эссе	индивидуаль- ные домаш- ние задания (ИДЗ)	самосто- тельное изу- чение вопро- сов (СИВ)	подго- товка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Электромагне- тизм				15	
1.1	Элементы в це- пях однофазно- го переменного тока				17	
1.2	Синусоидаль- ный перемен- ный электриче- ский ток.				17	
2	Расчет цепей переменного тока. Резонанс напряжений и токов				17	

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ

КУРСОВОЙ РАБОТЫ

2.1 Цели и задачи курсовой работы

- 2.1. Для приведенной электрической схемы трансформатора произвести расчет его основных параметров при работе на заданную нагрузку.
- 2.2. Произвести расчет выпрямительного устройства при работе на активно-емкостную нагрузку.
- 2.3. Произвести расчет компенсационного стабилизатора с непрерывным регулированием напряжения.

2.2 Порядок и сроки выполнения курсовой работы

1. Предварительный этап:

- выбор темы курсовой работы и оценка возможности раскрытия данной темы;
- подача заявления на закрепление темы.

2. Основной этап:

- составление плана;
- сбор материала;
- оформление курсовой работы;

3. Заключительный этап:

- рецензирование работы руководителем и допуск к защите;
- защита работы.

Структура курсовой работы (проекта):

- титульный лист;
- содержание;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованной литературы;
- приложения.

2.4 Требования к оформлению курсовой работы (проекта).

Страницы текста работы должны соответствовать формату А4 ГОСТ 9327. Текст должен быть выполнен с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков должна составлять 14 пунктов (кегль 14), форматирование текста по ширине, заголовков — по центру. При использовании текстового редактора Microsoft Word рекомендуется использовать стандартную гарнитуру шрифта Times New Roman. Текст следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое — 2,5 см, правое — 1,5 см, верхнее — 2 см, нижнее — 2 см. Абзацный отступ — 1,25 см.

Условные графические обозначения в электрических схемах должны отвечать действующим требованиям ЕСКД. В конце работы указываются использованные учебники и учебные пособия использованные для выполнения курсовой работы.

Работа должна быть подписана с указанием даты ее окончания.

Исходные данные выбираются на основании номера варианта (по первой и второй цифре варианта), выданного преподавателем.

2.5 Критерии оценки:

- сроки сдачи;
- правильность и аккуратность оформления;
- соответствие оформление курсовой работы (проекта) установленным требованиям;
- умение работать с документальными и литературными источниками;
- умение формулировать основные выводы по результатам анализа конкретного анализа;

2.6 Рекомендуемая литература.

2.6.1 Основная литература:

1. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008 г. – 448 с.
2. Китаев В.Е. Расчет источников электропитания устройств связи. – М.: Радио и связь, 1993. – 232 с.
3. Сидоров И.Н. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: справочник / И.Н. Сидоров, А.А. Христинин, С.В. Скорняков. – М.: Радио и связь, 1989. – 384 с.
4. Диоды: справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев. – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.
5. Транзисторы: справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
6. Резисторы: справочник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Пратусевич. – М.: Радио и связь, 1991 – 528 с.
7. Справочник по электрическим конденсаторам / М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.
8. Нефедов А.В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги. Справочник. Т.1. – М.: ИП РадиоСофт, 2000. – 512 с.

2.6.2 Дополнительная литература:

1. Иванов И.И., Лукин А.Ф., Соловьев Г.И. Электротехника. Основные положения, примеры, задачи. Изд. 3-е , С.П., М, Краснодар, 2004.-192с.
2. Горбунов А.Н., Кабанов И.Д., Кравцов А.В., Петров В.А., Редько И.Я. Электротехника. Учебник для вузов. – М.: УМЦ «Триада», 2005-264с.
3. Миловзоров О.В. Электроника [Текст]: Учебник для вузов/О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 3-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2006.- 288с.
4. Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Электротехника и электроника»: учебное пособие/ В.В.Пугачев, И.К.Петина, З.К. Балмугамбетов-Оренбург, ФГБОУ ВПО «Оренбургский ГАУ», 2014 (электронный ресурс)

В конце методических рекомендаций для самостоятельной работы обучающихся показать в приложениях образец титульного листа и содержания курсовой работы (проекта).

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ

4.1 Темы индивидуальных домашних заданий

Задание 1. Расчет цепей постоянного тока, пример расчета.

Задание 2. Пример выполнения задачи по расчету электрической цепи переменного тока со смешанным включением элементов.

4.2 Содержание индивидуальных домашних заданий

Задача 1:

Методом контурных токов определить токи в ветвях схемы (рисунок 1) если $E_1 = 145$ В, $E_2 = 140$ В, $R_1 = R_2 = R_6 = 1$ Ом, $R_3 = 0.5$ Ом, $R_4 = 10$ Ом, $R_5 = 4$ Ом, $R_7 = 8$ Ом, $R_8 = 5$ Ом.

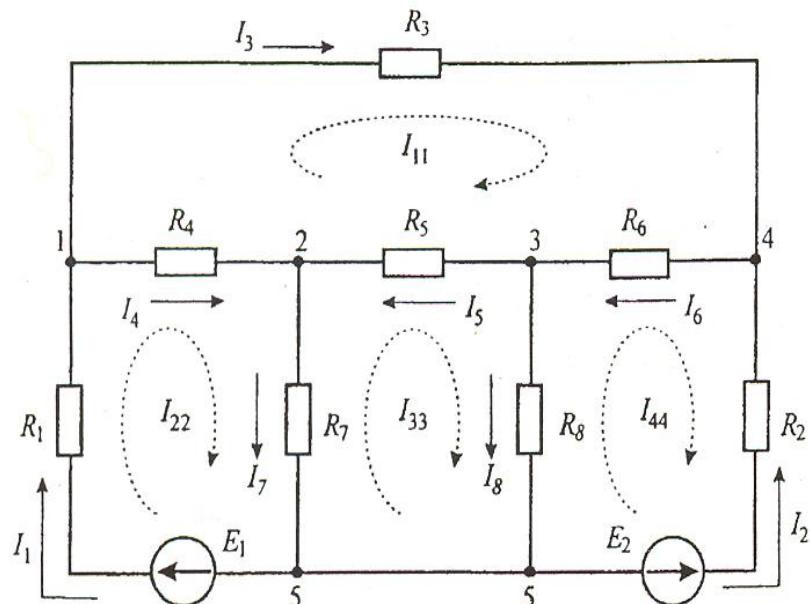


Рисунок 1

Задача 2:

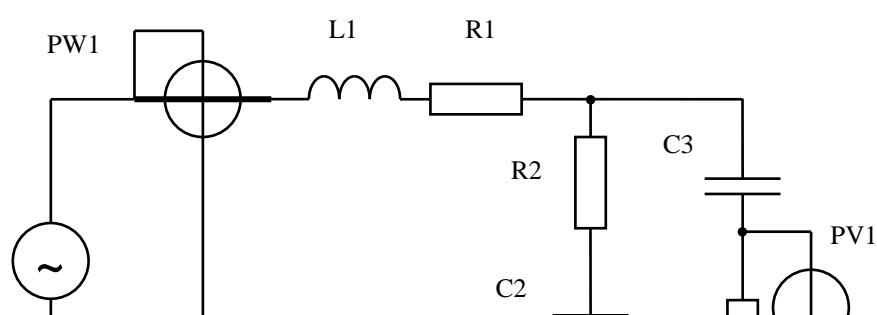


Рис. 1

На рисунке 1 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

$U=220$ В, $f=50$ Гц, $R_1=78$ Ом, $R_2=43$ Ом, $R_3=61$ Ом,

$L_1=180$ мГн, $C_2=40$ мкФ, $C_3=58$ мкФ.

Определить силу тока во всех ветвях цепи, напряжения на отдельных участках и показания измерительных приборов, изображенных на схеме.

При выполнении ИДЗ распределение заданий между обучающимися.

Таблица 1. Распределение заданий

Номер по списку	Номера вариантов									
	1	8	16	24	32	40	48	56	64	
01	1	8	16	24	32	40	48	56	64	
02	3	11	19	27	35	43	51	59	67	
03	2	10	18	26	34	42	50	58	66	
04	5	13	21	29	37	45	53	61	69	
05	4	12	20	28	36	44	52	60	68	
03	7	15	23	31	39	47	55	63	71	
07	6	14	22	30	38	46	54	62	70	
08	9	17	25	33	41	49	57	65	72	

4.3 Порядок выполнения заданий

Необходимо указать:

1. Номер варианта задания
2. Принципиальную электрическую схему исходные данные варианта для расчета
3. Результаты расчетов
4. Каждый этап решения должен иметь пояснение. Конечный результат должен быть выделен из общего текста.

4.4 Пример выполнения задания

Задача 1:

Решение:

Определяем количество уравнений системы:

$$K=B-(Y-1)=8-(5-1)=4$$

Выбираем контуры и записываем для каждого уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$1-4-3-2 -I_{11} \cdot (R_3 + R_4 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_5 - I_{44} \cdot R_6 = 0$$

$$1-2-5-2 - I_{11} \cdot R_4 + I_{22} \cdot (R_1 + R_4 + R_7) - I_{33} \cdot R_7 - I_{44} \cdot 0 = E_1$$

$$2-3-5-2 - I_{11} \cdot R_5 - I_{22} \cdot R_7 + I_{33} \cdot (R_5 + R_7 + R_8) - I_{44} \cdot R_8 = 0$$

$$3-4-5-3 -I_{11} \cdot R_6 - I_{22} \cdot 0 - I_{33} \cdot R_8 + I_{44} \cdot (R_2 + R_6 + R_8) = -E_2$$

Решив систему одним из численных методов, получим значения контурных токов:

$$I_{11} = 10 \text{ A}; \quad I_{22} = 15 \text{ A}; \quad I_{33} = 5 \text{ A}; \quad I_{44} = -15 \text{ A}.$$

Затем выражаем токи ветвей из контурных токов.

$$I_1 = I_{22} = 15 \text{ A}; \quad I_3 = I_{11} = 10 \text{ A}; \quad I_5 = I_{11} - I_{33} = 5 \text{ A};$$

$$I_7 = I_{22} - I_{33} = 10 \text{ A}; \quad I_2 = -I_{44} = 15 \text{ A}; \quad I_4 = I_{22} - I_{11} = 5 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{11} - I_{44} = 25 \text{ A}; \quad I_8 = I_{33} - I_{44} = 20 \text{ A};$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{ист} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = 145 \cdot 15 + 140 \cdot 15 = 4275 \text{ Вт}$$

$$P_{потр} = I_{12} R_1 + I_{22} R_2 + I_{32} R_3 + I_{42} R_4 + I_{52} R_5 + I_{62} R_6 + I_{72} R_7 +$$

$$I_{82} R_8 = 4275 \text{ Вт}$$

Задача 2:

Решение:

Определяем круговую частоту переменного тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$$

Рассчитываем сопротивления реактивных элементов цепи

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 79,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314 \cdot 58 \cdot 10^{-6}} = 54,9 \text{ Ом}$$

Рассчитываем реактивные сопротивления участков цепи

$$X_1 = X_{L1} - X_{C1} = 56,5 - 0 = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_2 = X_{L2} - X_{C2} = 0 - 79,6 = -79,6 \text{ Ом}$$

$$X_3 = X_{L3} - X_{C3} = 0 - 54,9 = -54,9 \text{ Ом.}$$

Определяем полное сопротивление каждого участка

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{78^2 + 56,5^2} = 96,3 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{43^2 + (-79,6)^2} = 90,5 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{61^2 + (-54,9)^2} = 82,1 \text{ Ом.}$$

Определяем активную проводимость второго и третьего участка

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{43}{90,5^2} = 0,0052 \text{ См}$$

$$g_3 = \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{61}{82,1^2} = 0,0091 \text{ См.}$$

Рассчитываем эквивалентную активную проводимость второго и третьего участка
 $g_{23} = g_2 + g_3 = 0,0053 + 0,0091 = 0,0143 \text{ См.}$

Определяем реактивную проводимость второго и третьего участка

$$b_2 = \frac{X_2}{Z_2^2} = \frac{-79,6}{90,5^2} = -0,0097 \text{ См}$$

$$b_3 = \frac{X_3}{Z_3^2} = \frac{-54,9}{82,1^2} = -0,0082 \text{ См.}$$

Рассчитываем эквивалентную реактивную проводимость второго и третьего участка

$$b_{23} = b_2 + b_3 = -0,0097 - 0,0082 = -0,0179 \text{ См.}$$

Определяем полную эквивалентную проводимость второго и третьего участка

$$y_{23} = \sqrt{g_{23}^2 + b_{23}^2} = \sqrt{0,0143^2 + (-0,0179)^2} = 0,0229 \text{ См.}$$

Находим полное эквивалентное сопротивление участка 2-3 и разлагаем его на активную и реактивную составляющие

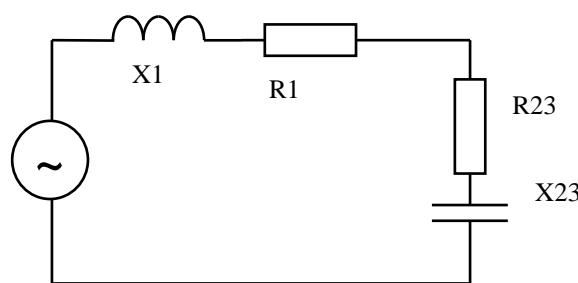
$$Z_{23} = \frac{1}{y_{23}} = \frac{1}{0,0229} = 43,7 \text{ Ом}$$

$$R_{23} = g_{23}Z_{23}^2 = 0,0143 \cdot 43,7^2 = 27,3 \text{ Ом}$$

$$X_{23} = b_{23}Z_{23}^2 = -0,0179 \cdot 43,7^2 = -34,1 \text{ Ом.}$$

На основании результатов расчетов можно выполнить эквивалентное преобразование исходной цепи. При этом необходимо учесть, что участок 1 имеет индуктивный характер нагрузки, а участок 2-3, как следует из расчета – емкостной. В результате преобразования получается цепь с последовательным соединением всех элементов. Схема цепи изображена на рис. 2.

Рис. 2



Рассчитываем активное и реактивное сопротивление всей цепи

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = 78 + 27,3 = 105,3 \text{ Ом}$$

$$X_{123} = X_1 + X_{23} = 56,5 - 34,1 = 22,4 \text{ Ом.}$$

Определяем полное сопротивление всей цепи

$$Z_{123} = \sqrt{R_{123}^2 + X_{123}^2} = \sqrt{105,3^2 + 22,4^2} = 107,7 \text{ Ом.}$$

Находим силу тока в неразветвленной части цепи (ток, текущий через первый участок)

$$I_1 = \frac{U}{Z_{123}} = \frac{220}{107,7} = 2,04 \text{ A.}$$

Используя закон Ома для участка цепи, рассчитываем напряжение на участке 1

$$U_1 = I_1 Z_1 = 2,04 \cdot 96,3 = 196,9 \text{ В.}$$

Аналогично рассчитываем напряжение на участке 2-3

$$U_{23} = I_1 Z_{23} = 2,04 \cdot 43,7 = 89,3 \text{ В.}$$

Определяем силу тока второго и третьего участка

$$I_2 = \frac{U_{23}}{Z_2} = \frac{89,3}{90,5} = 0,99 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{23}}{Z_3} = \frac{89,3}{82,1} = 1,09 \text{ A.}$$

Находим показания вольтметра

$$U_{R3} = I_3 R_3 = 1,09 \cdot 61 = 66,3 \text{ В}$$

Находим показания ваттметра

$$P = I_1^2 R_{123} = 2,04^2 \cdot 105,3 = 440 \text{ Вт}$$

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

1. “Электромагнетизм”

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующий вопрос.

- Расчет магнитных цепей. Законы Ома и Кирхгофа в магнитных цепях.

Вокруг проводника, по которому проходит электрический ток, возбуждается магнитное поле. Рассмотрим пример, если перпендикулярно к проводнику поместить плексиглас с металлическими опилками, то под воздействием магнитного поля проводника опилки расположатся по концентрическим окружностям. Таким образом, можно сказать, что в магнитном поле действуют магнитные силы, а ток возбуждает магнитное поле благодаря своей намагничивающей силе или магнитодвижущей силе.

Для наглядности, пространство, где находится магнитное поле, можно представить заполненным силовыми линиями. Направление силовых линий определяется по правилу правоходового винта (правило буравчика).

Магнитодвижущая сила (МДС) создает в каждой точке поля определенную напряженность \vec{H} , измеряемую в $[\text{А/м}]$. Напряженность характеризует интенсивность МП, но не учитывает влияния среды, в котором оно находится.

В вакууме и неферромагнитной среде величина напряженности определяется выражением:

$$H = \frac{B}{\mu_0},$$

где B - магнитная индукция, $[\text{Тл}]$;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Гн/м}]$ - магнитная проницаемость вакуума.

Магнитная индукция величина векторная. Направление вектора магнитной индукции является касательной к силовым линиям МП в каждой их точке.

Посредством магнитных линий можно магнитную индукцию выразить числом линий, проходящих через площадку, равную единице поверхности, поставленную перпендикулярно направлению силовых линий поля.

Поток вектора магнитной индукции сквозь какую-либо поверхность площадью S называется магнитным потоком

$$\Phi = \int_S B \, dS, \quad [B6].$$

Характеристики ферромагнитных материалов.

Для использования явления ЭМИ в рабочем объеме ЭТУ создается магнитный поток заданной конфигурации и интенсивности. Причем задачу усиления МП и придания ему необходимой конфигурации можно решить, используя магнитные материалы с различными свойствами и геометрическими размерами.

Все магнитные материалы подразделяются на диамагнетики, относительная магнитная проницаемость которых меньше 1, парамагнетики и ферромагнетики, к последним относятся: железо, никель, кобальт и их сплавы.

Если в магнитное поле, например в поле катушки, поместить стержень из ферромагнитного материала, то его магнитные свойства усиливаются: на конце стержня, из которого поток выходит, возникает северный полюс, другой полюс стержня является южным. Намагниченный стержень, удаленный из магнитного поля, в некоторой степени сохраняет свои магнитные свойства, называемые остаточным намагничиванием. Оно особенно сильно выражено у ферромагнетиков, и незначительно у пара- и диамагнетиков. Для электротехнических расчетов имеет значение, что отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля для ферромагнетиков, называемое магнитной проницаемостью материала сердечника μ , имеет большое значение и непостоянно.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Таким образом, зависимость $B = f(H)$ у ферромагнетиков не может быть выражена аналитически, а может быть представлена графической или табличной зависимостью. Рассмотрим пример кривой намагничивания Листовой стали Э4. Нижняя ветвь кривой соответствует ненасыщенному состоянию стали, в этой части зависимость практически линейна. Затем вследствие явления магнитного насыщения имеет место перегиб кривой, так называемое колено кривой намагничивания. В условиях, соответствующих части кривой, лежащей выше этого колена, ферромагнетик насыщен, т.е. магнитная индукция увеличивается незначительно при значительном увеличении напряженности.

Если требуется, чтобы колебания тока намагничивания мало влияли на магнитный поток, то выбирается индукция соответствующая условиям насыщения (генераторы постоянного тока параллельного возбуждения), если же нужно, чтобы индукция или магнитный поток изменялись пропорционально току намагничивания, то выбирают индукцию, соответствующую нижней части кривой (в приборах автоматического управления, измерительных приборах).

Данные кривой намагничивания получают экспериментально по образцу материала. В рабочих же условиях магнитная индукция ферромагнетика определяется не только данной напряженностью поля, но и предыдущим магнитным состоянием, что является следствием магнитного гистерезиса. При первоначальном намагничивании сердечника кривая намагничивания возрастает от нулевого значения по кривой. Затем, при уменьшении намагничающего тока, магнитная индукция уменьшается, но не по кривой первоначального намагничивания, а по кривой, лежащей несколько выше. При напряженности магнитного поля, равной нулю, в сердечнике сохраняется некоторая остаточная индукция B_0 . Чтобы полностью размагнитить сердечник, необходима напряженность поля обратного направления H_c , называемая коэрцитивной силой, для возбуждения которой, по ка-

тушке нужно пропустить ток обратного направления. Дальнейшее увеличение напряженности приводит к возникновению магнитной индукции обратного направления. Если уменьшать намагничивающий ток, то магнитная индукция будет уменьшаться по кривой расположенной ниже оси абсцисс, но такой же по форме, что и кривая убывания индукции при положительно направлении напряженности магнитного поля. Эта кривая намагничивания при циклическом перемагничивании сердечника называется петлей гистерезиса. В условиях такого циклического перемагничивания работают якоря машин постоянного тока и сердечники машин и аппаратов машин переменного тока.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна затрате энергии на один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика. Чтобы уменьшить потери энергии на гистерезис, в машинах с циклическим перемагничиванием ферромагнетика используют материалы с узкой петлей гистерезиса. К таким материалам относится электротехническая сталь.

Также к магнитным потерям относят потери, связанные с вихревыми токами. Вихревыми называют электрические токи, возникающие вследствие электромагнитной индукции в проводящей среде (обычно в металле) при изменении пронизывающего ее магнитного потока. В качестве примера рассмотрим массивный цельный сердечник, на который поместим катушку с переменным током. Переменное магнитное поле индуктирует токи, которые замыкаются в самом сердечнике по плоскостям, перпендикулярным направлению магнитного потока, вызывают: во-первых, нагрев сердечника, во-вторых, вихревые токи обладают размагничивающим действием, т.е. их собственное магнитное поле, уменьшает величину магнитного потока, их индуктирующего. Для уменьшения потерь от вихревых токов, можно либо увеличить сопротивление сердечника, либо уменьшить площадь контуров, охватываемых вихревыми токами. Для этого сердечник изготавливают не цельным, а сборным из штампованных, изолированных друг от друга изоляционным лаком листов электротехнической стали.

Рассмотрим магнитное поле, образованное постоянным магнитом. Направление силовых линий магнитного поля всегда от северного поля к южному. Вектор магнитной индукции, в каждой точке поля, всегда направлен от северного поля к южному. Если поместить в область действия поля проводник с током, то он испытывает со стороны внешнего для него поля механическую силу F , стремящуюся вытолкнуть его из области действия поля. Для определения направления этой силы служит правило левой руки: ладонь нужно поставить так, чтобы магнитные линии в нее входили, пальцы вытянуть по направлению тока вдоль проводника, отогнутый большой палец левой руки покажет направление действующей на проводник механической силы. Эта сила называется электромагнитной, так как она является следствием взаимодействия тока и магнитного поля.

Связь между током, магнитной индукцией и электромагнитной силой установил Ампер: электромагнитная сила прямо пропорциональна величине магнитной индукции, силе тока активной длине проводника и синусу угла между направлением поля и направлением тока.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, [\text{H}]$$

Применим закон Ампера для расчета силы взаимодействия проводов двухпроводной линии. На расстоянии a от оси провода 1 напряженность магнитного поля, возбуждаемого током этого провода равна:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a},$$

следовательно, магнитная индукция поля

$$B = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

Силовые линии магнитного поля первого провода располагаются перпендикулярно току второго провода, следовательно, на второй провод действует электромагнитная сила:

$$F = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I \cdot l = \mu_0 \cdot \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I^2.$$

Такая же сила, но противоположная по направлению, создается воздействием поля второго проводника на провод 1. И та, и другая электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, поэтому при коротких замыканиях, когда токи увеличиваются в сотни раз, силы взаимодействия возрастают в десятки тысяч раз и могут нарушить механическую целостность устройства.

Механическое проявление магнитного поля используют во всех электродвигателях для получения вращающих моментов, в измерительных приборах, а также в подъемных электромагнитах и электромагнитных реле.

В проводнике, движущемся в магнитном поле, возбуждается электрическое поле, пропорциональное магнитной индукции и скорости движения проводника. В проводнике происходит смещение зарядов против направления сил электрического поля, как это имеет место внутри всякого источника электроэнергии. Следовательно, здесь действует ЭДС, называемая индуцированной. Если проводник движется под углом α к направлению магнитного поля, то величина ЭДС прямо пропорциональна скорости перемещения, длине проводника, магнитной индукции и синусу угла между направлением магнитного поля и направлению перемещения проводника:

$$E = -v \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Направление индуцированной ЭДС определяется по правилу правой руки. Если ладонь правой руки расположить так, чтобы силовые линии входили в нее, а большой палец направлен по направлению движения проводника, то вытянутые пальцы покажут направления действия индуцированной ЭДС.

Знак «-» в уравнении ЭДС выражает принцип Ленца, т.е. индуцированная ЭДС стремится противодействовать причине, ее вызывающей.

Если замкнуть проводник на сопротивление и перемещать его со скоростью v , то индуцированная ЭДС вызовет в созданном контуре ток i . Взаимодействие которого с магнитным полем создаст электромагнитную силу, противодействующую движению проводника, т.е. причине возбуждающей ЭДС.

Закон электромагнитной индукции может быть выражен другой формулой. Скорость движения проводника может быть выражена через путь dx , проходимый им за время dt , т.е.

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Произведение магнитной индукции на площадь есть магнитный поток, пересеченный проводником за время dt , следовательно:

$$E = -\frac{B \cdot l \cdot dx}{dt} = -\frac{B \cdot dS}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Индукцированная ЭДС равна скорости изменения магнитного потока.

В различных электромагнитных устройствах – трансформаторах, машинах измерительных приборах – магнитный поток пронизывает катушку устройства, сцепляясь с отдельными ее витками. Причем, этот поток может по-разному, сцепляясь с витками. Например, часть потока Φ_1 сцепляется со всеми витками одного диаметра, а другая часть потока Φ_2 пронизывает несколько витков большего диаметра. Как только катушка начнет перемещаться по отношению к потокам, или поток начнет изменяться во времени, так в каждом отдельном витке будет индуцироваться ЭДС, величина которой определится выражением:

$$e_0 = -\frac{d\Phi_e}{dt}$$

Так как катушка представляет собой последовательное соединение витков, то ЭДС всей катушки будет представлять собой сумму индуцированных ЭДС каждого отдельного витка

$$e_k = - \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w)}{dt} \Psi = (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w)$$

Величина в скобках является суммой магнитных потоков отдельных витков катушки, и называется потокосцеплением Ψ , измеряется как и магнитный поток в [Вб].

Если же магнитный поток пронизывает витки одинакового диаметра, то имеет место полное потокосцепление:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_w = \Phi, \Psi = w \cdot \Phi.$$

Электродвижущая сила, индуцируемая в катушке при полном потокосцеплении, будет равна:

$$e_k = -w \frac{d\Psi}{dt}.$$

Закон полного тока. Магнитные цепи с постоянными магнитными потоками.

Магнитные цепи

Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток.

Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

Закон полного тока

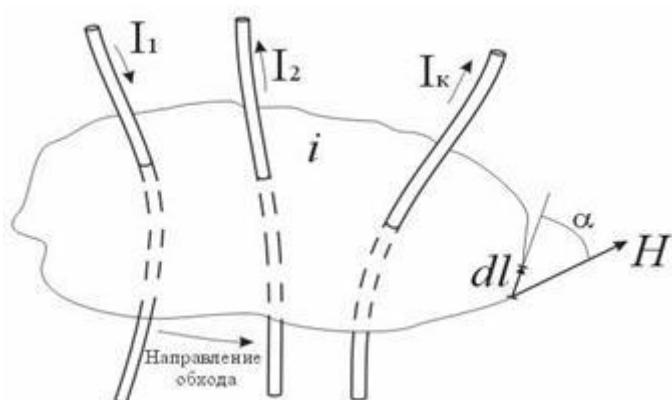
В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{L} = \oint \mathbf{H} \cos \alpha dL = \sum I,$$

где: \mathbf{H} – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;
 $d\mathbf{L}$ – элемент длины замкнутого контура L ;

α – угол между направлениями векторов \mathbf{H} и $d\mathbf{L}$;

\square I – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур L .

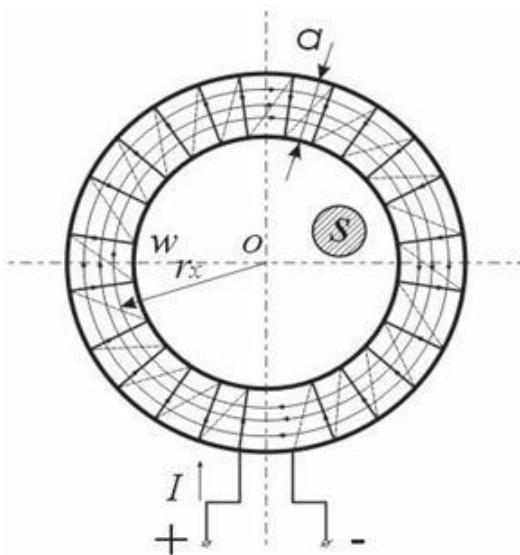


Закон полного тока

Ток I_k , пронизывающий контур L считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правоходового винта (буравчика).

Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей

Рассмотрим простейшую магнитную цепь, выполненную в виде кольца тороида из однородного материала (рис. 4.4).



Кольцевая магнитная цепь

Обмотка имеет W витков и обтекается током I . Магнитные линии внутри кольца представляют собой концентрические окружности с центром в точке O . Применим к контуру C_x , совпадающему с одной из магнитных линий, проходящих в магнитопроводе, закон полного тока. При этом будем считать:

\bar{H} и $d\bar{L}$ совпадают, следовательно $\alpha = 0$;

величина H_x во всех точках контура одинакова;

сумма токов, пронизывающих контур, равна IW .

Тогда

$$\int H_x \cos \alpha dL = H_x \int dL = H_x L_x = IW$$

Отсюда

$$H_x = \frac{IW}{L_x} = \frac{IW}{2\pi r_x} [A/m],$$

где L_x – длина контура, вдоль которого велось интегрирование;
 r_x – радиус окружности.

Вектор \bar{H} внутри кольца зависит от расстояния r_x . Если a – ширина кольца $\ll d$, то эта разница между значениями H в пределах сердечника не велика. При этом в расчет допустимо принять для всего поперечного сечения магнитопровода одно значение напряженности магнитного поля:

$$H_{cp} = IW / L,$$

где L – длина средней магнитной линии.

Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца.

Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой.

Исходя из соотношений $\Phi = B_{cp} S$ и $B_{cp} = \mu_a H_{cp}$ получим

$$\Phi = B_{cp} S = \mu_a H_{cp} S.$$

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_m}$$

Магнитный поток Φ зависит от произведения $IW = F$, которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).

Величину $L / (\mu_a S) = R_m$ – принято называть магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротивлением $r = L / \gamma S$).

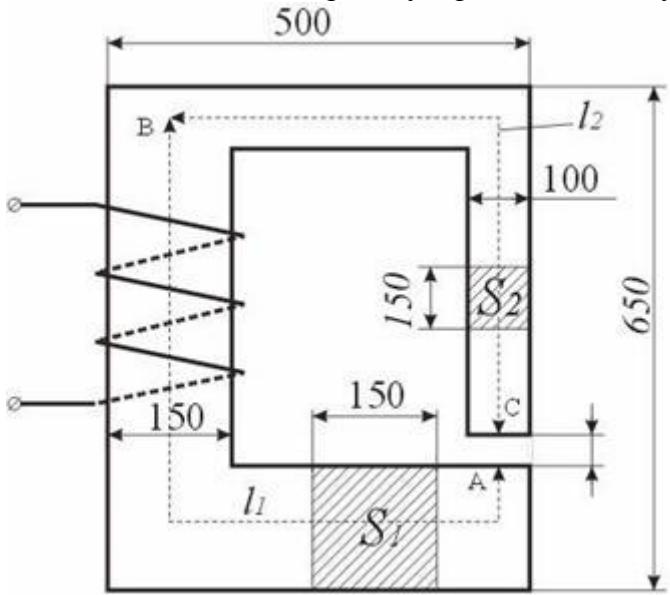
Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к. $\mu_a = \mu_0 = \text{const}$. Магнитное сопротивление сердечника нелинейно – μ_a зависит от B .

Если намагничивающую силу F , уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу (*) принято называть законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

В расчетах магнитных цепей различают прямую и обратную задачи.

Прямая задача Задано: 1) геометрические размеры магнитной цепи; 2) характеристика $B = f(H)$ (кривая намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь; 3) магнитный поток Φ , который надо создать в магнитной цепи. Требуется найти намагничивающую силу обмотки $F = IW$. Решение задачи рассматривается при-

менительно к магнитопроводу, представленному на рис. 4.7.



Магнитная цепь

1. Магнитная цепь разбивается на ряд участков с одинаковым поперечным сечением S , выполненным из однородного материала.
2. Намечается путь прохождения средней магнитной линии (
3. Т.к. магнитный поток на всех участках цепи остается постоянным, то магнитная индукция $B = \Phi / S$ на каждом из участков и напряженность магнитного поля H неизменны. Это позволяет сравнительно просто определить значение $\int H dL$ для контура, образованного средней магнитной линией, а следовательно, найти искомую величину намагничивающей силы, поскольку $F = \int H dL$.

Запишем интеграл $\int H dL$ в виде суммы интегралов с границами интегрирования, совпадающими с началом и концом каждого участка цепи. Тогда

$$\int H dL = \int_a^b H_1 dL + \int_b^c H_2 dL + \int_c^a H_3 dL = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_{\text{возд}} \delta = IW$$

где: L_1 и L_2 – длины ферромагнитных участков цепи [м].

δ – ширина воздушного зазора, [м].

4. Значения H_1 и H_2 определяют по известным величинам магнитной индукции B с помощью кривых намагничивания, соответствующих ферромагнитных материалов.

А для воздушного зазора

$$H_{\text{возд}} = \frac{B_{\text{возд}}}{\mu_0} = \frac{B_{\text{возд}}}{4\pi \times 10^{-7}} = 8 \times 10^5 B_{\text{возд}} \text{ A/m.}$$

Обратная задача .Задано:

Геометрические размеры магнитной цепи;

Характеристики ферромагнитных материалов;

Намагничающая сила обмотки F.

Требуется определить магнитный поток Φ .

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_m}$$

Непосредственное использование формулы для определения магнитного потока Φ оказывается невозможным, поскольку магнитное сопротивление цепи переменное и само зависит от величины магнитного потока. Такие задачи решаются методом последовательного приближения в следующем порядке. Задаются рядом произвольных значений магнитного потока в цепи и для каждого из этих значений определяют необходимую намагничающую силу обмотки так, как это делается при решении прямой задачи.

По полученным данным строят кривую $\Phi(F)$ – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничающей силы найти величину магнитного потока.

Для оценки необходимого значения Φ можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничающей силы F при сопротивлении воздушного участка. Это значение Φ заведомо больше расчетного.

Остальные значения можно давать меньше.

$$\Phi = \frac{F}{R_{ возд }} = \frac{F}{\frac{b}{S \times 4\pi \times 10^{-7}}}.$$

Особенности расчета магнитных цепей с переменной магнитодвижущей силой

Физические процессы в цепях переменного тока, содержащих катушку со стальным сердечником, имеют ряд особенностей по сравнению с процессами в цепях постоянного тока. Эти особенности оказывают существенное влияние на конструктивное выполнение и технические характеристики электрических аппаратов и машин переменного тока.

Ферромагнитные элементы в цепях переменного тока имеют дополнительные потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи. Для снижения потерь стальной сердечник выполняют шихтованным из тонких изолированных друг от друга пластин.

Потери в сердечнике, называемые потерями в стали P_c , увеличиваются при повышении частоты питающего напряжения. Переменный магнитный поток Φ индуцирует в стальном сердечнике вихревые токи (токи Фуко), замыкающиеся в плоскостях, перпендикулярных к оси потока. Эти токи вызывают нагрев стали, снижая тем самым к.п.д. и ограничивая нагрузочную способность электромагнитных устройств. Потери энергии в стальном магнитопроводе значительно снижаются при уменьшении толщины листа электротехнической стали ($0,1 \div 0,5$ мм)

$$P_b = k_b f^2 B_m^2 d^2 / \rho ,$$

где k_b – коэффициент, определяемый экспериментально;

f – частота перемагничивания стали;

B_m – максимальная магнитная индукция;

d – толщина листа электротехнической стали сердечника;

ρ – удельное сопротивление материала сердечника.

Помимо потерь от вихревых токов, в стальном магнитопроводе при переменном магнитном потоке возникают потери, обусловленные явлением гистерезиса

$$P_r = k_r f B_m^2 G ,$$

где k_r – постоянный коэффициент;

G – вес сердечника в килограммах.

Суммарные потери от вихревых потоков и гистерезиса $P_c = P_b + P_r$ [Вт] называют магнитными потерями или потерями в стали.

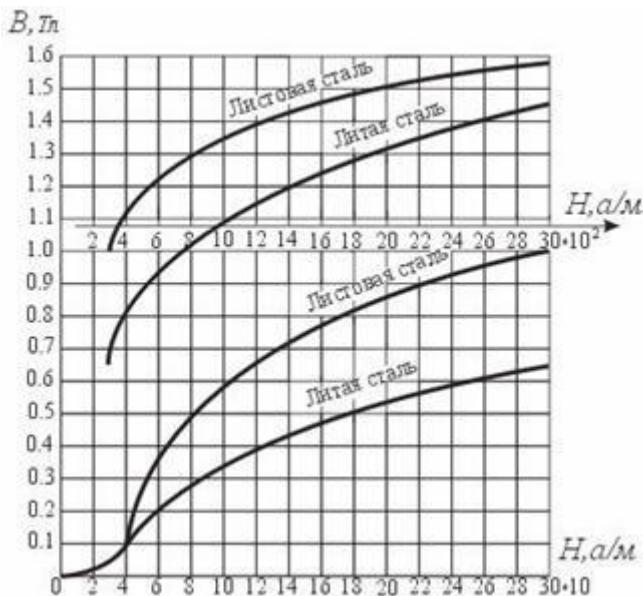
Векторная диаграмма и схема замещения катушки с сердечником

При расчете цепей с ферромагнитными элементами с синусоидальными источниками питания индуктивность L нельзя считать постоянной, и поэтому необходимо использовать зависимость между ЭДС и потокосцеплением или потоком. Форма кривой зависимости между потоком Φ и намагничающим током i подобна форме основной кривой намагничивания $B(H)$, т.к. $\Phi = B S$, а $H = IW / L$.

Нелинейный характер зависимости между Φ и i приводит к тому, что индуктивность катушки $L = W \Phi / i$ перестает быть величиной постоянной и зависит от величины намагничающего тока.

При непостоянстве индуктивности L ЭДС самоиндукции e , наводимую в катушке переменным током i следует определять по формуле

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} .$$



Зависимость $B(H)$

Если к катушке подведено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$, а активное сопротивление обмотки $R \approx 0$, то приложенное напряжение уравновешивается только ЭДС самоиндукции:

$$u = -e, \\ U_m \sin(\omega t + \pi/2) = W d\Phi / dt.$$

Интегрируя это выражение, получим

$$\Phi = U_m / (2 \pi f) W \sin(\omega t) = \Phi_m \sin(\omega t).$$

Из полученного соотношения следует:

1. При синусоидальном напряжении на зажимах катушки магнитный поток Φ , вызванный протекающим по цепи током I , тоже синусоидальный.
2. Заданному действующему значению напряжения U на зажимах катушки соответствует определенная амплитуда магнитного потока Φ_m независимо от того, имеется ли у катушки стальной сердечник или же магнитный поток целиком замыкается по воздуху. Магнитный поток индуцирует в обмотке катушки ЭДС самоиндукции e , равную по величине приложенному напряжению и противоположную ему по направлению

$$e = -W d\Phi / dt = -W \Phi_m \omega \cos(\omega t) = 2 \pi f W \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2),$$

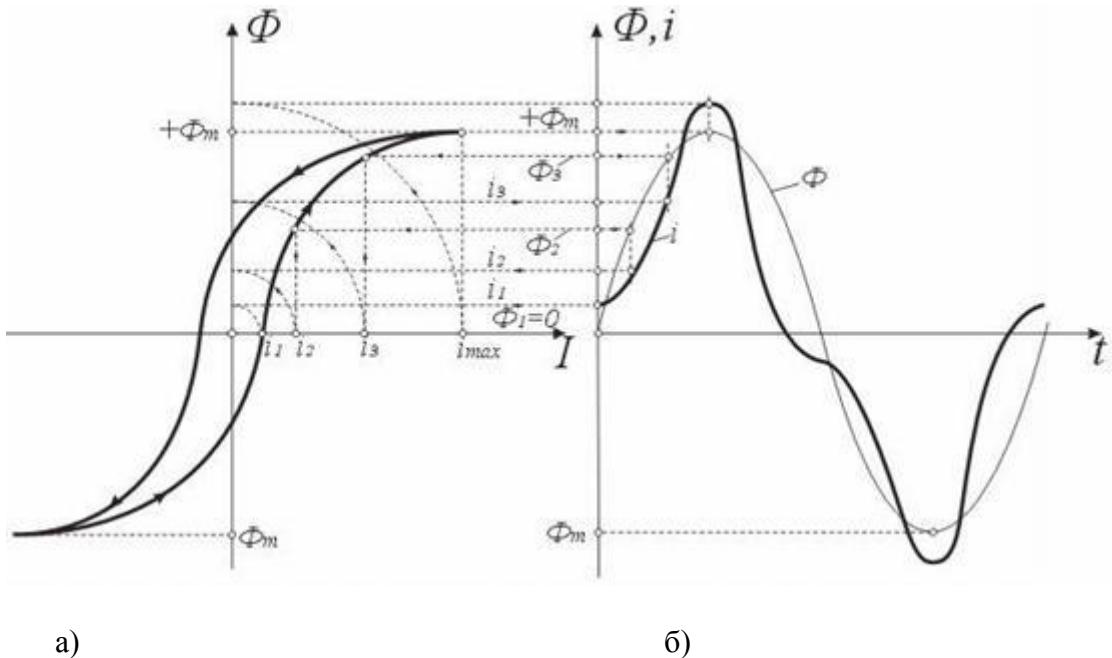
$$E_m = 2 \pi f W \Phi_m,$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f W \Phi_m = 4,44 f W \Phi_m.$$

При этом индуцируемая ЭДС E отстает от магнитного потока на четверть периода.

Выражение для действующей индуцированной ЭДС $E = 4,44 f W \Phi_m$ часто используется при анализе работы и в практических расчетах и называется трансформаторной ЭДС.

Процесс намагничивания и размагничивания стального сердечника протекает по несовпадающим ветвям петли гистерезиса. График зависимости $\Phi(i)$ при циклическом перемагничивании (рис. 4.9 а) имеет такую же форму, как и петля гистерезиса $B(H)$. На рис. 4.9 б изображен график синусоидального изменения магнитного потока во времени $\Phi(t)$.



Кривая перемагничивания (а) и кривые $\Phi(t)$ и $\Phi(i)$ для катушки со стальным сердечником

Располагая кривыми $\Phi(i)$ и $\Phi(t)$, построим кривую намагничивающего тока $i(t)$.

Полученная кривая намагничивающего тока $i(t)$ является несинусоидальной периодической функцией. Для упрощения анализа и расчета цепей переменного тока, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, несинусоидальный намагничивающий ток заменяют эквивалентным синусоидальным, опираясь на равенство действующих значений. Для построения расчетной схемы замещения катушки с сердечником запишем уравнение

$$u = -e + L_p di / dt + Ri ,$$

где: R – сопротивление обмотки;

L_p – индуктивность рассеяния.

Полное комплексное сопротивление запишется

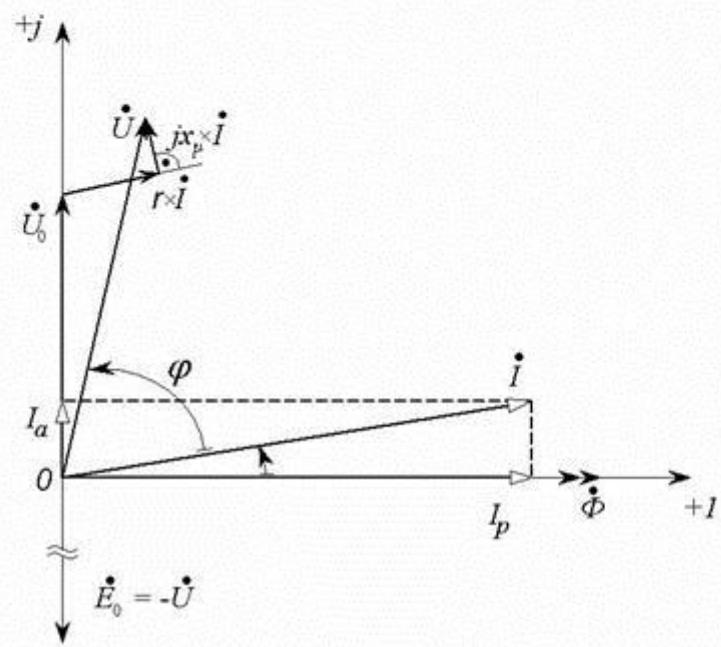
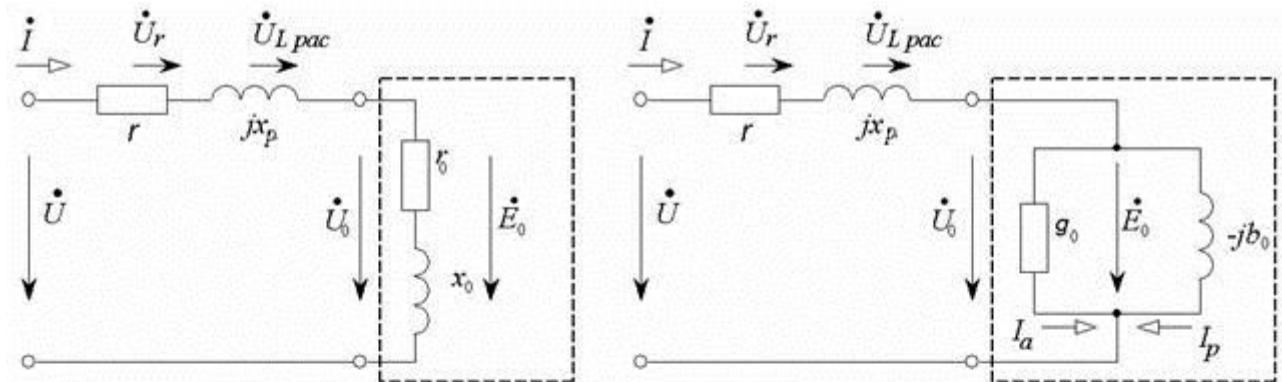
$$\underline{Z} = R_o + i (x_p + x_o) ,$$

где: R_o – активное сопротивление, обусловлено потерями на вихревые токи и гистерезис; x_o – индуктивное сопротивление, определяет мощность, необходимую на создание основного магнитного потока;

R – сопротивление обмотки катушки;

x_p – индуктивное сопротивление, определяет мощность потока рассеяния;
 R_o и x_o – нелинейные сопротивления.

Векторная диаграмма и а) последовательная, б) параллельная схемы замещения изображены на рисунке



Векторная диаграмма и соответствующие ей а) последовательная и б) параллельная схемы замещения

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

6.1 Лабораторная работа 1 (ЛР 1) «Исследование цепи постоянного тока с последовательным и параллельным включением элементов»

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

1. Уяснить принципы графического изображения электрической цепи.
2. Научиться собирать электрические цепи.
3. Освоить методы расчета простых электрических цепей.
4. Научиться включать в цепь электроизмерительные приборы, выбирать и устанавливать пределы измерений и производить измерения

6.2 Лабораторная работа 2 (ЛР 2) «Исследование законов Кирхгофа и метода наложения в сложной электрической цепи постоянного тока.»

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

Экспериментально проверить справедливость законов Кирхгофа.

Экспериментально проверить справедливость принципа наложения.

Освоить расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов.

6.3 Лабораторная работа 3 (ЛР 3) «Исследование прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов»

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Изучить свойства и характеристики диодов и стабилитронов.

6.4 Лабораторная работа 4 (ЛР 4) «Усилитель постоянного тока»

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Изучить схемы и характеристики усилителей постоянного тока.

6.5 Лабораторная работа 5 (ЛР 5) «Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя при работе со сглаживающими фильтрами»

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Изучение принципа работы однофазных однополупериодной и двухполупериодных схем неуправляемых и управляемых выпрямителей; исследование основных характеристик выпрямителей.

6.6 Лабораторная работа 6 (ЛР 6) «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с коротко замкнутым ротором.
2. Исследовать работу электродвигателя в нормальном и аварийных режимах.
3. Научиться маркировать выводы трехфазного асинхронного электродвигателя.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

6.1 Практическое занятие 1(ПЗ 1) “ Расчет трансформаторов ”

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие вопросы.

1. Расчет мощности вторичных обмоток трансформатора
2. Определение расчетной мощности трансформатора
3. Выбор конструкции трансформатора
4. Определение расчетного габаритного параметра трансформатора
5. Выбор типоразмера магнитопровода
6. Расчет количества витков трансформатора
7. Расчет действующего значения тока холостого хода первичной обмотки трансформатора
8. Расчет конструкции трансформатора