

**Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический
университет**

ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

**Методические указания к изучению дисциплины
«Электротехника и электроника»**

УФА 2009

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра теоретических основ электротехники

ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Методические указания к изучению дисциплины
«Электротехника и электроника»

УФА 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	7
1.1. Источники электрической энергии.....	7
1.2. Методы расчета электрических цепей с одним источником питания (<i>метод эквивалентных преобразований</i>).....	7
1.3. Основные законы электрических цепей.....	9
1.4. Методы анализа цепей с несколькими источниками питания.....	10
2. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА.....	11
3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ.....	14
4. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ.....	15
5. ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	17
5.1. Однофазный трансформатор.....	17
5.2. Трехфазные трансформаторы.....	18
6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	19
7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	20
7.1. Трехфазные асинхронные двигатели.....	20
7.2. Синхронные машины.....	22
8. ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ.....	24
9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	25
10. ЛИТЕРАТУРА.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Опорный конспект предназначен для изучения дисциплины "Электротехника и электроника" для следующих неэлектротехнических направлений подготовки бакалавров и специалистов:

- направления подготовки бакалавров: 550900 – Теплоэнергетика; 551000 – Авиа- и ракетостроение; 551600 – Материаловедение и технологии новых материалов; 551800 – Технологические машины и оборудование; 552700 – Энергомашиностроение; 553500 – Защита окружающей среды; 554300 – Гидравлическая, вакуумная и компрессорная техника;

- направления подготовки дипломированного специалиста 140100 – Теплоэнергетика; 140500 – Энергомашиностроение; 150200 – Машиностроительные технологии и оборудование; 150400 – Технологические машины и оборудование; 150500 – Материаловедение, технология материалов и покрытий; 150600 – Материаловедение и технология новых материалов; 150700 – Физическое материаловедение; 150800 – Гидравлическая, вакуумная и компрессорная техника; 160100 – Авиа- и ракетостроение; 160300 – Двигатели летательных аппаратов; 160900 – Эксплуатация и испытания авиационной и космической техники; 190700 – Организация перевозок и управление на транспорте; 200500 – Метрология, стандартизация и сертификация; 220400 – Мехатроника и робототехника; 230300 – Организационно-технические системы; 280100 – Безопасность жизнедеятельности; 280200 – Защита окружающей среды.

Методические указания являются составной частью учебно-методического комплекса (УМК) и помогают в решении основных задач изучения дисциплины, таких как формирование у студентов минимально необходимых знаний основных электротехнических законов и методов анализа электрических, магнитных и электронных цепей, принципов действия, свойств, областей применения и потенциальных возможностей основных электротехнических, электронных устройств и электроизмерительных приборов, умения экспериментальным способом и на основе паспортных и каталожных данных определять параметры и характеристики типовых электротехнических и электронных устройств.

Стандартная структура УМК дисциплины приведена на рис.1.

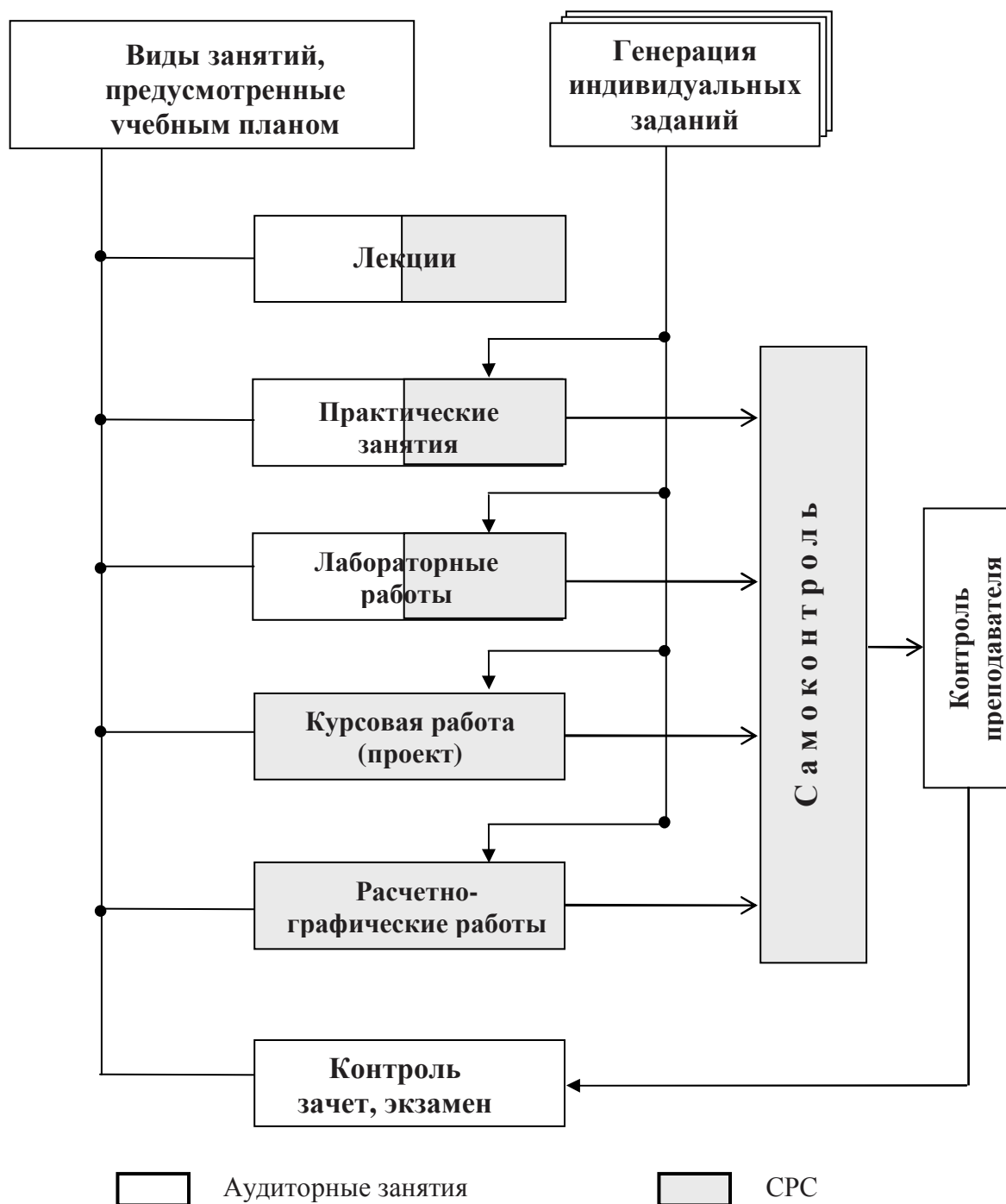


Рис.1. Укрупненная схема учебно-методического комплекса по дисциплине

В УМК введены специальные компьютерные программы, позволяющие обеспечить индивидуализацию обучения студентов и возможность проверки степени усвоения материала, как в режиме самоконтроля, так и при окончательной проверке (рис.1).

Соотношение между аудиторными занятиями и самостоятельной работой студентов (СРС) зависит от формы обучения и изображено условно.

Дисциплина "Электротехника и электроника" базируется главным образом на дисциплинах естественно-научного цикла: "Физика" (разделы "Электричество и магнетизм", "Колебания и волны"); "Высшая математика" (разделы "Дифференциальное и интегральное исчисления", "Векторный анализ", "Теория функций комплексного переменного") и "Основы информатики и вычислительной техники" (разделы "Вычислительные методы решения дифференциальных уравнений", операции с матрицами), "Материаловедение" (раздел "Электротехнические материалы"). Кроме того, данная дисциплина является основой для изучения специальных дисциплин.

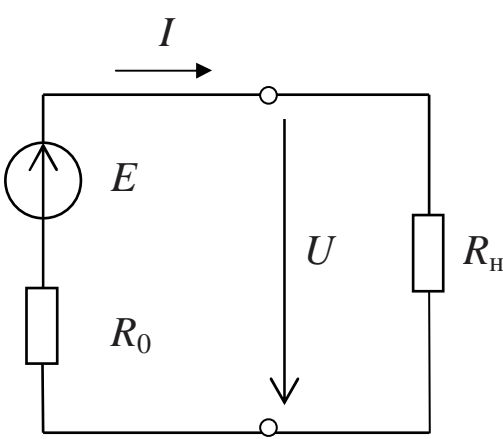
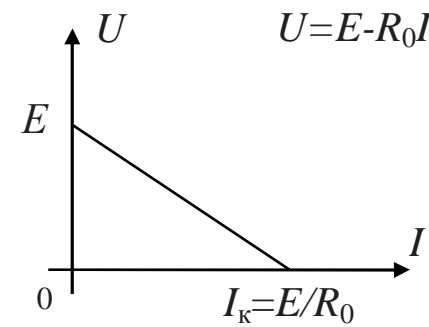
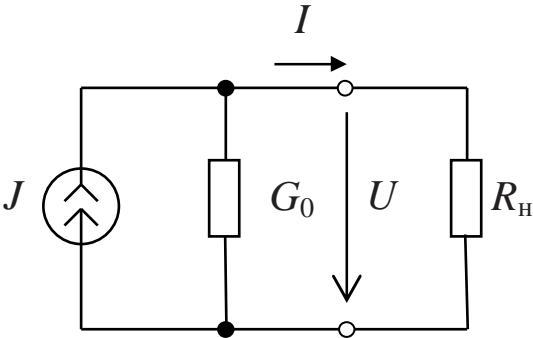
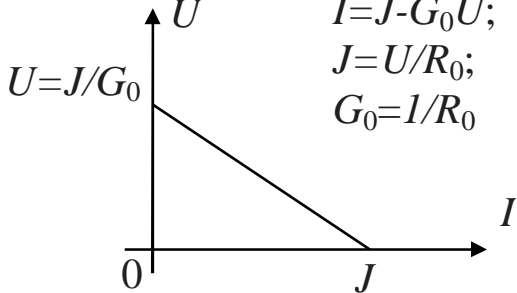
В материалах опорного конспекта изложены краткие теоретические сведения по электротехнике, которые могут быть использованы в процессе проведения всех видов занятий и в самостоятельной работе студентов при изучении следующих тем: "Методы расчета электрических цепей" (раздел 1), "Расчет цепей синусоидального однофазного и трехфазного тока" (разделы 2, 3), "Расчет магнитных цепей" (раздел 4), "Трансформаторы" (раздел 5), "Машины постоянного тока" (раздел 6), "Машины переменного тока" (раздел 7), "Электропривод и аппаратура управления" (раздел 8) и "Электрические измерения" (раздел 9).

Опорный конспект предназначен для более эффективного усвоения лекционного материала, а также для подготовки к лабораторно-практическим занятиям, зачетам и экзаменам.

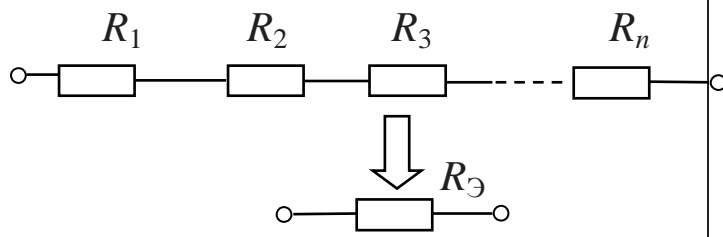
Опорный конспект охватывает весь объем материала раздела "Электротехника", предусмотренного примерной программой дисциплины "Общая электротехника и электроника", рекомендуемой Минобразованием России для направлений подготовки (специальностей) в области техники и технологии.

1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

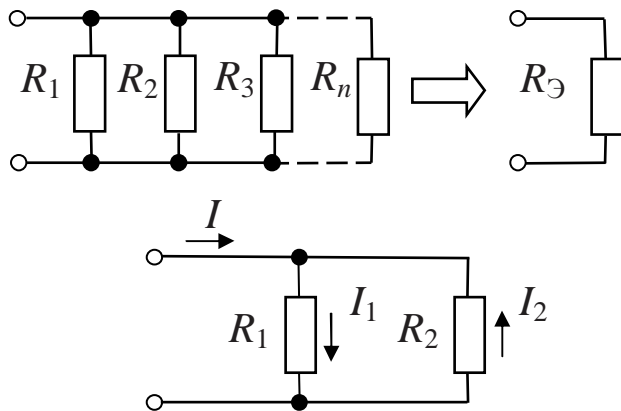
1.1. Источники электрической энергии

<p>Источник ЭДС</p> 	<p>Внешняя (вольтамперная характеристика)</p> $U = E - R_0 I$  $P_E = E \cdot I \text{ [Вт]}$
<p>Источник тока</p> 	<p>Внешняя (вольтамперная характеристика)</p> $I = J - G_0 U;$ $J = U/R_0;$ $G_0 = 1/R_0$  $P_J = U \cdot I \text{ [Вт]}$

1.2. Методы расчета электрических цепей с одним источником питания (метод эквивалентных преобразований)

<p>Последовательное соединение</p> 	$R_{\text{Э}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n;$ $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \dots = \frac{U_n}{R_n}$
--	---

Параллельное соединение



$$\frac{1}{R_{\text{Э}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

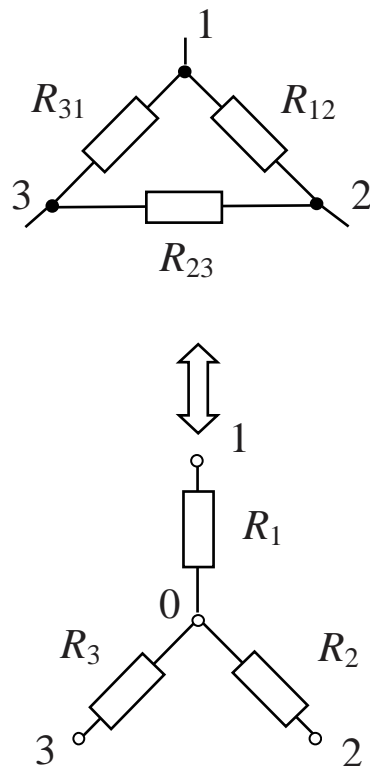
В частном случае параллельного соединения двух сопротивлений

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$$

формулы разброса:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I;$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I.$$



Сопротивления лучей эквивалентной звезды

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}};$$

$$R_3 = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

В частном случае равенства сопротивлений треугольника:

$$R_{\text{Y}} = \frac{R_{\Delta}}{3}.$$

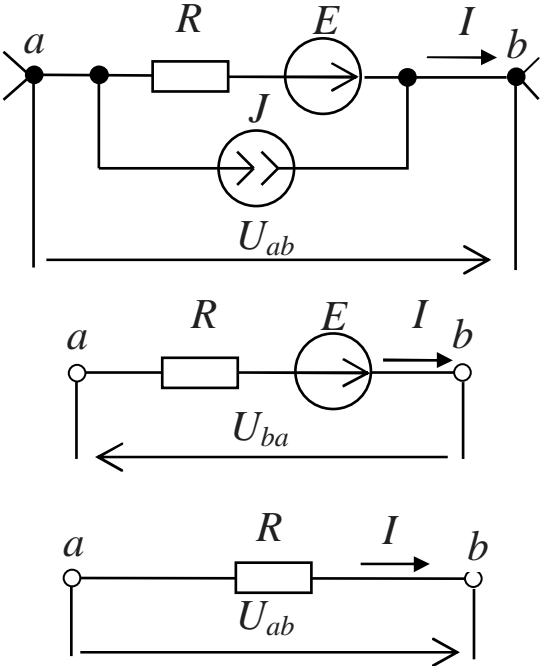
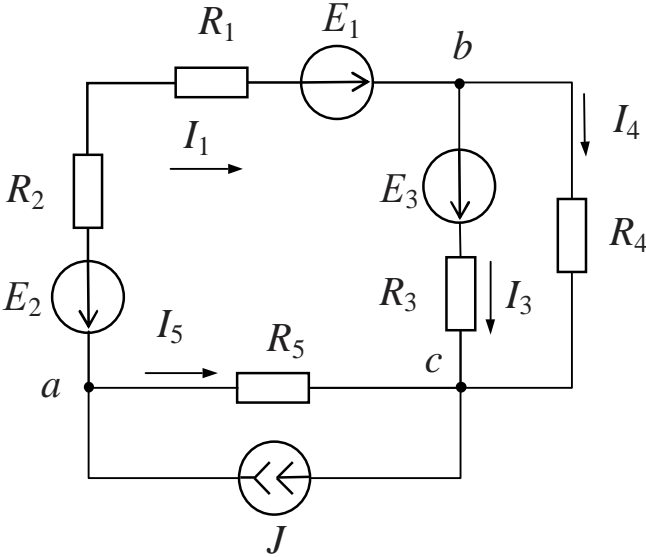
Формулы обратного преобразования:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3};$$

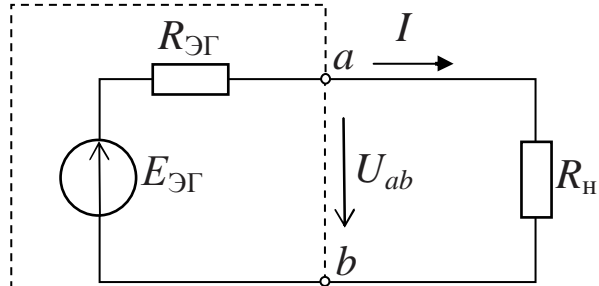
$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1};$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2}$$

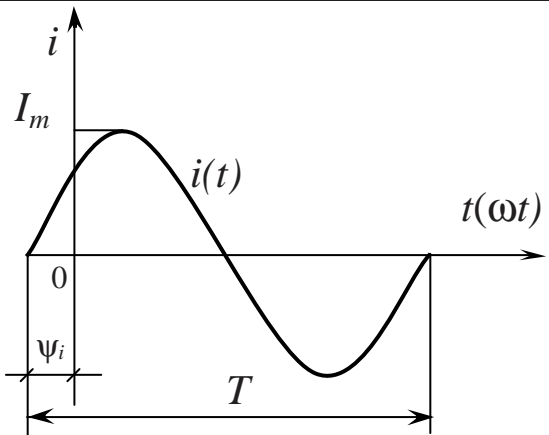
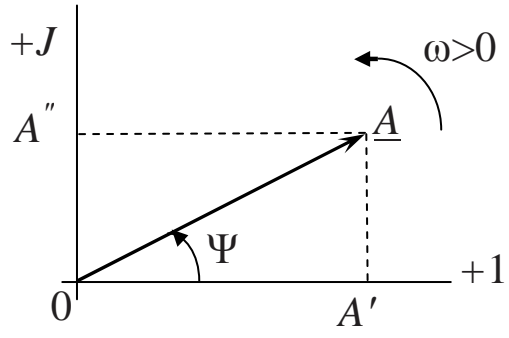
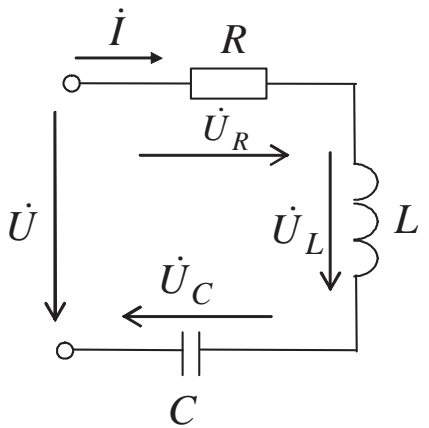
1.3. Основные законы электрических цепей

<p>Закон Ома</p> 	$I = \frac{U_{ab} + E}{R} + J;$ $I = \frac{E - U_{ba}}{R};$ $I = \frac{U_{ab}}{R}$
<p>Законы Кирхгофа</p> 	<ol style="list-style-type: none"> $\sum_{k=1}^n I_k = 0;$ для узла a: $J - I_1 - I_5 = 0;$ для узла c: $I_3 + I_4 + I_5 - J = 0;$ $\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{l=1}^m R_l I_l;$ для контура abc: $R_1 I_1 + R_2 I_1 + R_3 I_3 - R_5 I_5 =$ $= E_1 - E_2 + E_3$
<p>Баланс мощностей</p> $\sum_{i=1}^m P_{\text{ист}i} = \sum_{j=1}^n P_{\text{прием}j},$ <p>где $\sum P_{\text{ист}i} = \sum (\pm E_i \cdot I_i) + \sum (\pm U_i J_i);$ $\sum P_{\text{прием}j} = \sum R_j I_j^2$</p>	

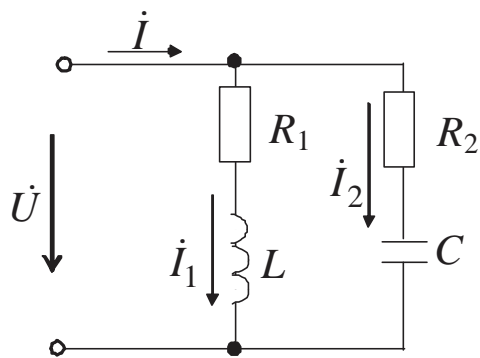
1.4. Методы анализа цепей с несколькими источниками питания

<p>1. Метод контурных токов (Максвелла)</p> 	<p>I контур: $(R_1 + R_2 + R_5)I_{11} - R_2I_{22} - R_5I_{33} = E_1 + E_2;$ II контур: $-R_2I_{11} + (R_2 + R_3 + R_6)I_{22} - R_6I_{33} = -E_2 + E_3;$ III контур: $-R_5I_{11} - R_6I_{22} + (R_4 + R_5 + R_6)I_{33} = E_4$</p>
<p>2. Метод межзвучного напряжения</p>  <p>При отсутствии источников тока</p> $U_{ab} = \frac{\pm \sum_{k=1}^n G_k E_k}{\sum_{j=1}^m G_j}$	$U_{ab} = \frac{\pm \sum_{k=1}^n G_k E_k \pm \sum_{i=1}^n J_i}{\sum_{j=1}^m G_j},$ <p>j - общее число ветвей; k - число ветвей с источниками ЭДС E; i - число ветвей с источниками тока J; где $G = \frac{1}{R}$ - проводимость ветви.</p>
<p>3. Метод эквивалентного источника</p> 	$I = \frac{E_{ЭГ}}{R_{Н} + R_{ЭГ}},$ <p>где $E_{ЭГ} = U_{abxx}$; $R_{ЭГ}$ входное сопротивление пассивной цепи относительно зажимов «a» и «b» исходной схемы.</p>

2. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

	<p>Мгновенное значение</p> $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$ <p>где $\omega = 2\pi f$, рад/с; $f = \frac{1}{T}$, Гц.</p> <p>Действующее значение</p> $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$
	$\underline{A} = A' + jA''; \underline{A} = A e^{j\psi};$ $\underline{A} = A \cos \psi + jA \sin \psi,$ <p>где $j = \sqrt{-1} = e^{+j\frac{\pi}{2}}$ - мнимая единица;</p> $A = \sqrt{(A')^2 + (A'')^2};$ $\psi = \arctg \frac{A''}{A'}; A' = A \cos \psi;$ $A'' = A \sin \psi; e^{\pm j\psi} = \cos \psi \pm j \sin \psi.$
<p>Последовательное соединение R, L, C элементов</p> 	$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + j(X_L - X_C) = Z e^{j\varphi},$ <p>где $X_L = \omega L, X_C = \frac{1}{\omega C},$</p> $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$ $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$ <p>Условие резонанса напряжений: $\varphi = 0 \Rightarrow X = 0;$</p> $Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U}.$

Параллельное соединение R , L , C элементов



$$\underline{Y} = \frac{\dot{i}}{\dot{U}} = G - jB = G - j(B_L - B_C) =$$

$$= Y \cdot e^{-j\varphi}.$$

Условие резонанса токов:

$$\varphi = 0 \Rightarrow B = B_L - B_C = 0;$$

$$B_L = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2}; \quad B_C = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2};$$

$$Q = \frac{I_C}{I} = \frac{I_L}{I}.$$

Переход от последовательной схемы к эквивалентной параллельной схеме замещения и обратно:

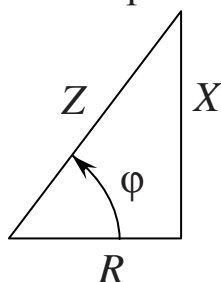
$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2}, \quad B = \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{X}{Z^2},$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{1}{Z};$$

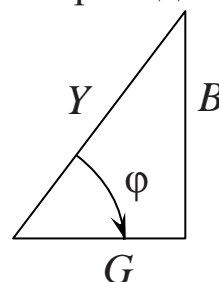
$$R = \frac{G}{G^2 + B^2} = \frac{G}{Y^2}, \quad X = \frac{B}{G^2 + B^2} = \frac{B}{Y^2},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B^2}} = \frac{1}{Y}.$$

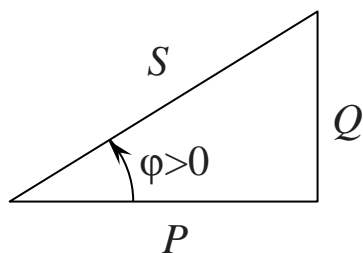
Треугольник сопротивлений



Треугольник проводимостей



Треугольник мощностей



Активная, реактивная и полная мощности:

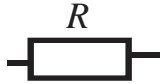


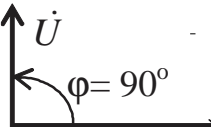

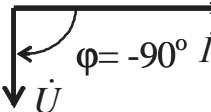

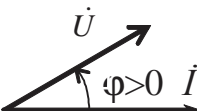

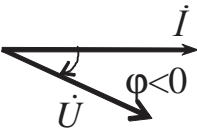
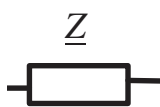
$$P = UI \cos \varphi; \quad Q = UI \sin \varphi;$$

$$S = UI; \quad P^2 + Q^2 = S^2;$$

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P \pm jQ.$$

Пассивные элементы электрической цепи

Таблица 3.1

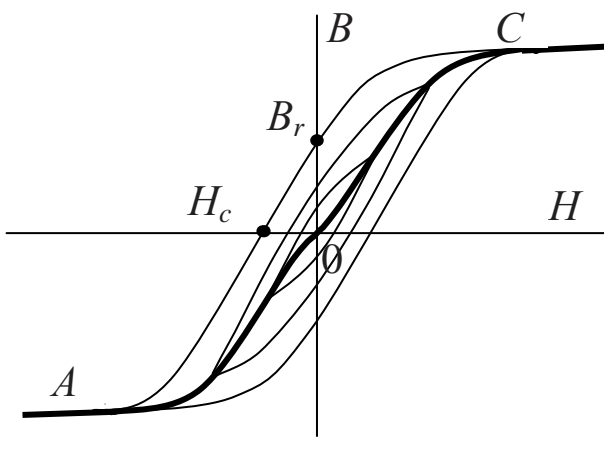
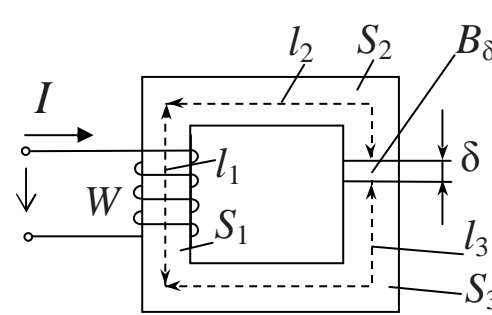
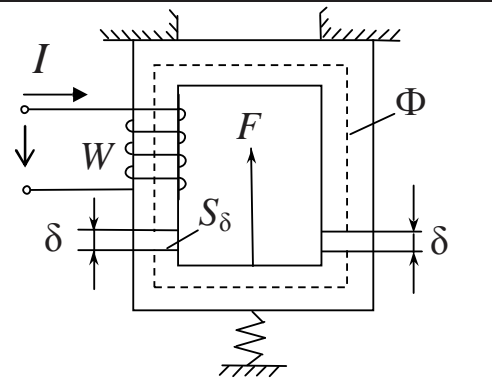
Элементы схем замещения		Запись закона Ома	Полное комплексное сопротивление, Ом	Модуль полного комплексного сопротивления, Ом	Аргумент полного комплексного сопротивления	Упрощенная векторная диаграмма
Название	Обозначение					
Идеальный резистивный элемент		$i = \dot{U}_R / R$ $\dot{U}_R = R i$	R	R	0	
Идеальный индуктивный элемент		$i = \dot{U}_L / (jX_L),$ $\dot{U}_L = jX_L i$	$jX_L = j\omega L =$ $= \omega L e^{j90^\circ}$	$X_L = \omega L$	90°	
Идеальный емкостный элемент		$i = \dot{U}_C / (-jX_C),$ $\dot{U}_C = -jX_C i$	$-jX_C = -j / (\omega C) =$ $= [1 / (\omega C)] e^{-j90^\circ}$	$X_C = 1 / (\omega C)$	-90°	
Реальная индуктивная катушка		$i = \dot{U} / \underline{Z}$	$\underline{Z} = R + jX_L$	$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$	
Последовательное соединение резистивного и идеального емкостного элементов		$i = \dot{U} / \underline{Z}$	$\underline{Z} = R - jX_C$	$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$	$\varphi = \arctg \frac{-X_C}{R}$	
Обобщенный элемент		$i = \dot{U} / \underline{Z}$	$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$	$Z =$ $= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$	

3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

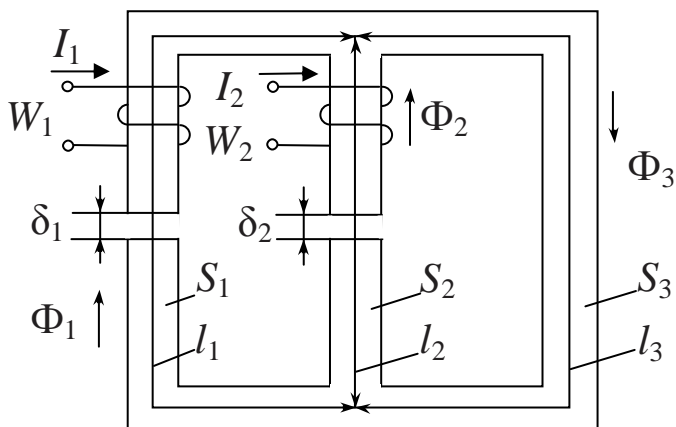
Таблица 3.1

Напряжения	Токи	Векторная диаграмма напряжений	Схема изображения приемников	
			практическая	замещенная
Звезда с нейтральным проводом				
$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_\phi e^{j0}, \\ \dot{U}_B &= U_\phi e^{-j120}, \\ \dot{U}_C &= U_\phi e^{j120}, \\ U_{\text{Л}} &= \sqrt{3}U_\phi \end{aligned}$	$\begin{aligned} I_\phi &= I_{\text{Л}}, \\ I_\phi &= U_\phi / Z_\phi \end{aligned}$			
Звезда без нейтрального провода				
$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}_{nN} &= \frac{Y_a \dot{U}_A + Y_b \dot{U}_B + Y_c \dot{U}_C}{Y_a + Y_b + Y_c} \end{aligned}$	$\begin{aligned} I_\phi &= I_{\text{Л}}, \\ I_\phi &= U_\phi / Z_\phi \end{aligned}$			
Треугольник				
$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= U_{\text{Л}} e^{j30^\circ}, \\ \dot{U}_{BC} &= U_{\text{Л}} e^{j-90^\circ}, \\ \dot{U}_{CA} &= U_{\text{Л}} e^{j150^\circ}, \\ U_{\text{Л}} &= U_\phi \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{i}_A &= \dot{i}_{ab} - \dot{i}_{ca} \\ \dot{i}_B &= \dot{i}_{bc} - \dot{i}_{ab} \\ \dot{i}_C &= \dot{i}_{ca} - \dot{i}_{bc} \end{aligned}$			

4. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Кривая намагничивания и петли гистерезиса	
	$B = \mu \mu_0 H = \mu_a H,$ <p>AOC – кривая намагничивания, B_r – остаточная индукция, H_c – коэрцитивная сила</p> $\Phi = \int_S B ds,$ <p>где ds – элемент поверхности S</p>
Законы Кирхгофа для магнитных цепей	
$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0, \quad \sum IW = \sum H_k l_k = \sum U_{mk} = \sum \Phi_i R_{mk}$	
<p>Расчет неразветвленной неоднородной магнитной цепи</p>	<p><i>Прямая задача:</i></p> $B_k = \frac{\Phi}{S_k}, \quad H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}, \quad \sum H_k l_k + H_\delta \delta = IW.$ <p><i>Обратная задача:</i></p> <p>задаются несколькими значениями магнитной индукции в каком-то сечении и определяют значения МДС (F_i). Строится зависимость $\Phi = f(\sum H_k l_k)$ и по ней при заданном значении IW определяется искомый поток Φ.</p>
	<p>Тяговое усилие, приходящееся на один воздушный зазор</p> $F_1 = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} S_\delta$
	

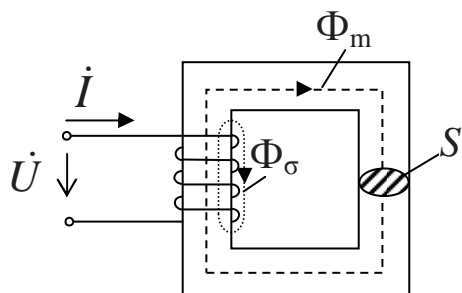
Расчет разветвленной магнитной цепи



1. По первому закону Кирхгофа для магнитной цепи: $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$,
2. для контура, образованного первой и второй ветвями $H_1 l_1 + H_{\delta 1} \delta_1 - H_2 l_2 - H_{\delta 2} \delta_2 = I_1 W_1 - I_2 W_2$,
3. для внешнего контура $H_1 l_1 + H_{\delta 1} \delta_1 + H_3 l_3 = I_1 W_1$

Магнитные цепи с переменными МДС

Электромагнитная схема



$$\Phi = \Phi_m + \Phi_{\delta},$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 w f \Phi_m,$$

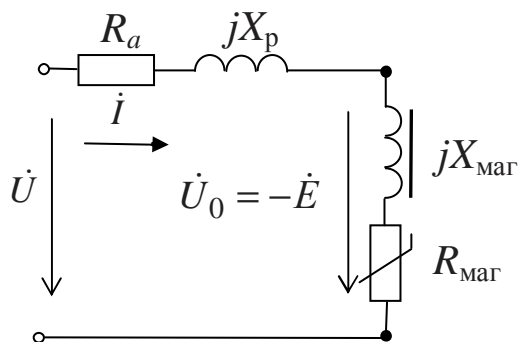
$$u = -e - e_p + R_a i = R i + L_p \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{dt},$$

$$\dot{U} = R_a \dot{I} + j\omega L_p \dot{I} - \dot{E} =$$

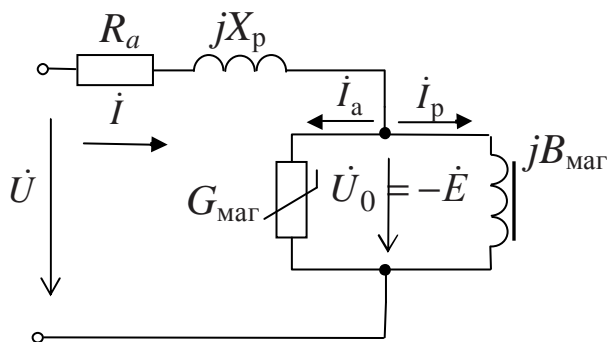
$$= (R_a + jX_p) \dot{I} + \dot{U}_0$$

Эквивалентные схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником

Последовательная



Параллельная

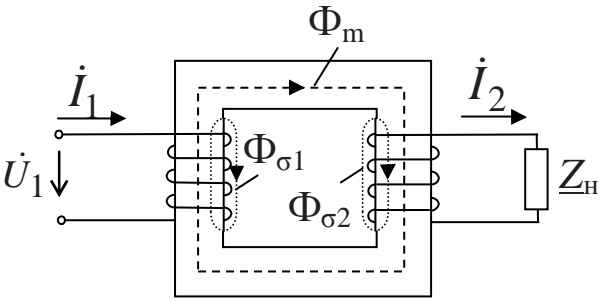
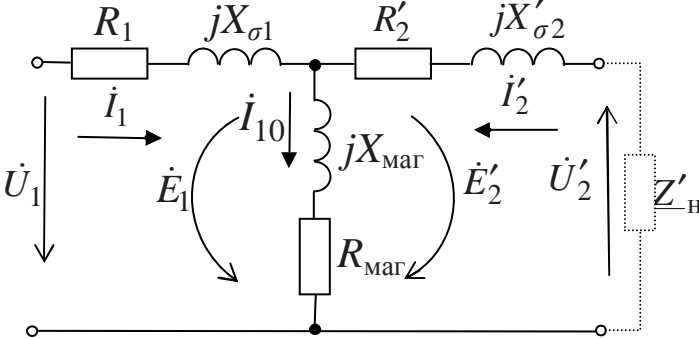


$$R_{\text{маг}} = P_{\text{ст}} / I^2, G_{\text{маг}} = P_{\text{ст}} / U_0^2, X_{\text{маг}} = Q_{\text{H}} / I^2, B_{\text{маг}} = Q_{\text{H}} / U_0^2,$$

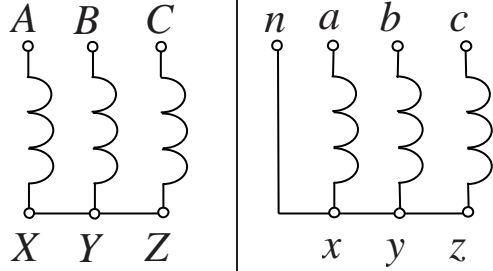
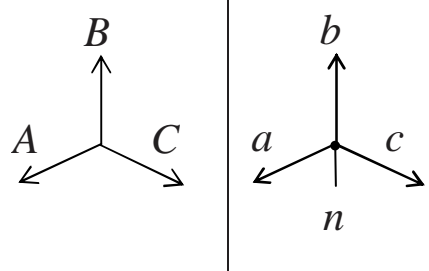
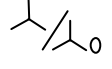
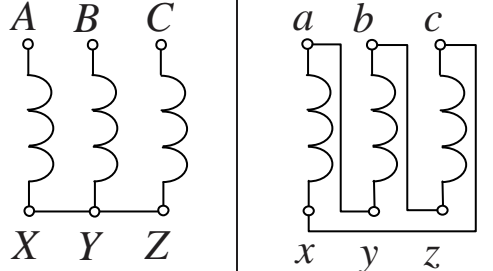
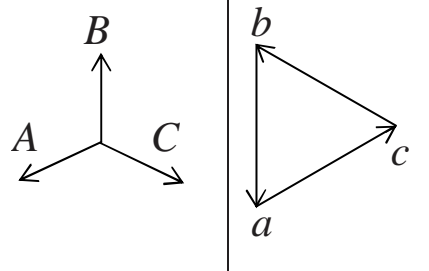
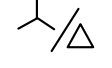
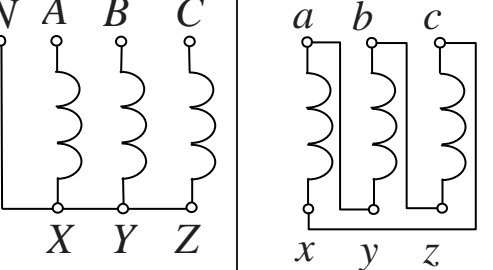
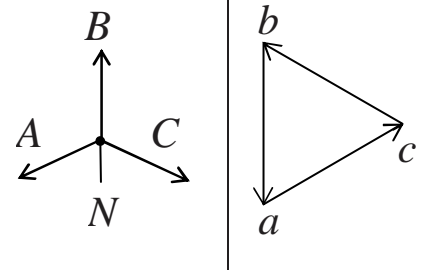
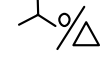
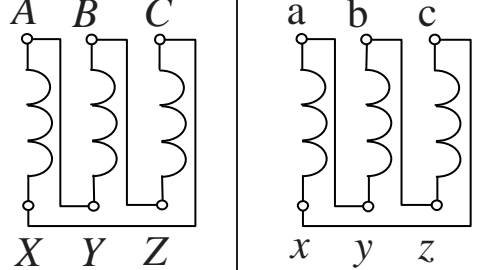
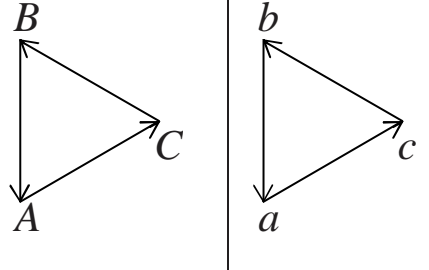

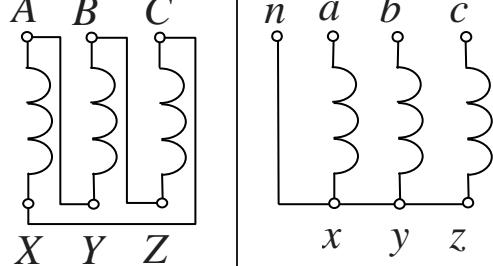
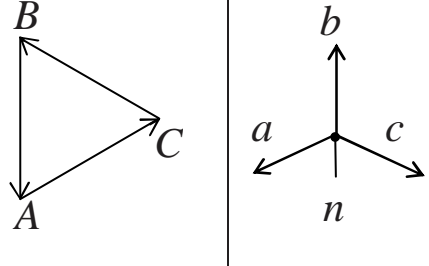
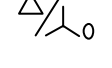
$$Z_{\text{ЭК}} = U/I, R_{\text{ЭК}} = P/I^2 = (P_{\text{ст}}/I^2) + R_a, X_{\text{ЭК}} = X_p + X_{\text{маг}} = \sqrt{Z_{\text{ЭК}}^2 - R_{\text{ЭК}}^2}$$

5. ТРАНСФОРМАТОРЫ

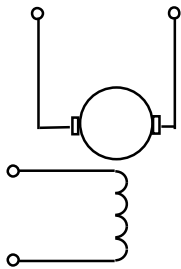
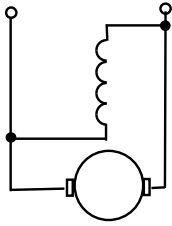
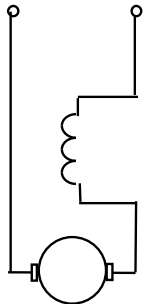
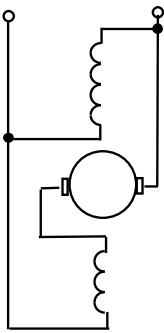
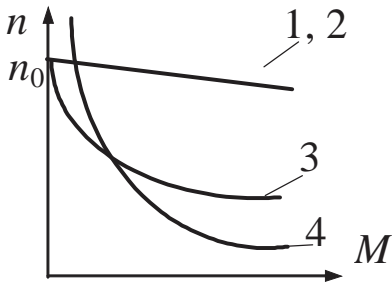
5.1. Однофазный трансформатор

<p>Электромагнитная схема</p> 	$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m,$ $E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m,$ $\Phi_m = \frac{U_1}{(4,44 f w_1)}$ $= \frac{U_2}{(4,44 f w_2)},$ $\Phi = B \cdot S;$ $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$
<p>Схема замещения трансформатора</p>  <p>Уравнения электрического состояния нагруженного трансформатора:</p> $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_{\sigma 1} \dot{I}_1;$ $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + R_2 \dot{I}_2 + jX_{\sigma 2} \dot{I}_2.$	<p>Уравнение магнитного состояния трансформатора:</p> $\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \cdot \frac{w_2}{w_1}.$ <p>Параметры ветви намагничивания:</p> $Z_x = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{10}}; R_{\text{маг}} = Z_x \cos \varphi_x;$ $P_x = I_{10} U_1 \cos \varphi_1.$ <p>Параметры продольной ветви:</p> $P_k = I_{1\text{НОМ}} U_k \cos \varphi_k = R_k I_{1\text{НОМ}}^2;$ $Z_k = \frac{U_k}{I_{1\text{НОМ}}}; R_k = Z_k \cos \varphi_k.$
<p>Внешняя характеристика и КПД трансформатора:</p> $\Delta u_2 = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2);$ $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{p_{\Sigma 1} + p_{\Sigma 2} + p_x}{P_2 + p_{\Sigma 1} + p_{\Sigma 2} + p_x}; \quad \eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_x},$ <p>где $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}}$; $\beta_{\eta \rightarrow \text{max}} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}}$.</p>	

5.2. Трехфазные трансформаторы

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				
				
				
				
				

6. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Независимое возбуждение	2. Параллельное возбуждение
	
3. Последовательное возбуждение	4. Смешанное возбуждение
	
<p>Механические характеристики двигателей постоянного тока</p> 	<p>1- независимого возбуждения, 2- параллельного возбуждения, 3- смешанного возбуждения, 4- последовательно возбуждения</p>
$P_{эм} = EI_{я}, \quad E = c_E \Phi n = \frac{pN}{60a}, \quad M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{я} = c_M \Phi I_{я},$	
<p>Режим генератора: $U = E - I_{я}R_{я}, \quad P_2 = UI.$</p> <p>Режим двигателя: $U = E + I_{я}R_{я}, \quad P_1 = UI.$</p>	
$n_x = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{яном}R_{я}}, \quad M = 9,55 \frac{P_2}{n}.$	
$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1};$	
$\sum p = p_{э} + p_{эв} + p_{мх} + p_{эщ} + p_{магн} + p_{д}.$	
$I = I_{я} + I_{в};$	

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_E \Phi n}{R_{\text{я}}}; \quad I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{во}}} = \frac{U}{R_{\text{в}} + R_{\text{р}}}$$

$$R_{\text{р}} = \frac{U}{I_{\text{яном}}} - R_{\text{я}};$$

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{c_E \Phi} = \frac{U - IR_{\text{я}}}{c_E \Phi};$$

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2};$$

$$c_M = 9,55 c_E;$$

Кратность пускового тока: $K_I = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}};$

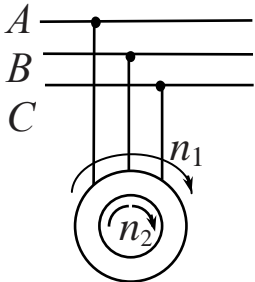
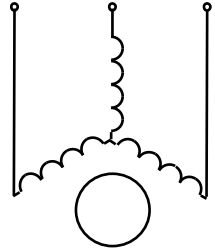
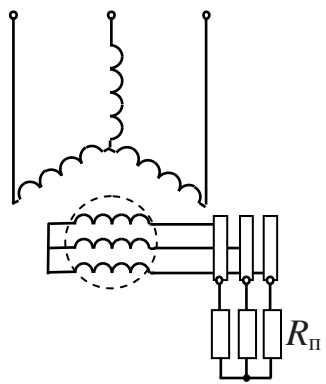
кратность пускового момента: $K_M = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}.$

$$p_{\text{х}} = p_{\text{э}} \text{ или } \sum RI_{\text{ном}}^2 = P_{\text{х}} + U_{\text{в}} I_{\text{в}};$$

$$I = \sqrt{\frac{P_{\text{х}} + I_{\text{в}} U_{\text{в}}}{R_{\text{я}}}}$$

7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7.1. Трехфазные асинхронные двигатели

 <p>n_1-частота вращения магнитного поля; n_2-частота вращения ротора</p>	<p>с короткозамкнутым ротором</p> 	<p>с фазным ротором</p> 
<p>Скольжение, частота вращения:</p>		

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%; \quad s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1});$$

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}; \quad n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s), \quad n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Частота тока и ЭДС, наводимая магнитным полем статора в проводниках статора и ротора:

$$f_2 = sf_1 = s \frac{pn_1}{60}; \quad E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m k_{01};$$

$$E_2 = 4,44 f_2 w_2 \Phi_m k_{02}; \quad E_{2s} = sE_2.$$

Мощности, КПД и вращающий момент:

$$P = 3I_{1\phi} U_{1\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi;$$

$$Q = 3I_{1\phi} U_{1\phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + \sum p)};$$

$$P_{\text{ЭМ}} = P_1 - \Delta p_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi - (P_{1\text{э}} + P_{1\text{м}}) = \omega_1 M = \frac{P_{2\text{э}}}{s},$$

$$P_2 = P_1 - \sum p = P_1 - (p_{1\text{э}} + p_{1\text{м}} + p_{2\text{э}} + p_{2\text{м}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}}),$$

$$P_2 = \eta P_1, \quad P_2 = P_{\text{ЭМ}}(1-s) = M\omega_2, \quad P_2 = Mn_2 / 9,55;$$

$$M = 9,55 P_2 / n_2, \quad M = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\omega_1},$$

$$M = C_M I_{2s} \Phi_m \cos \varphi_2, \quad M = C_1 U_1^2, \quad M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega} = \frac{9,55 P_1}{n_1}.$$

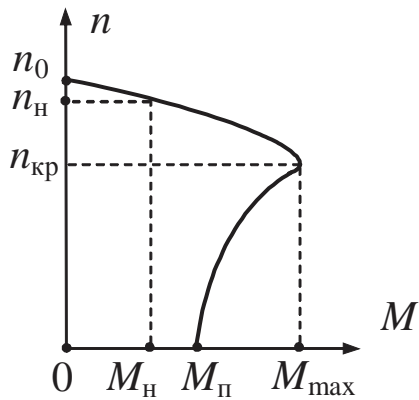
Зависимость момента от скольжения:

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

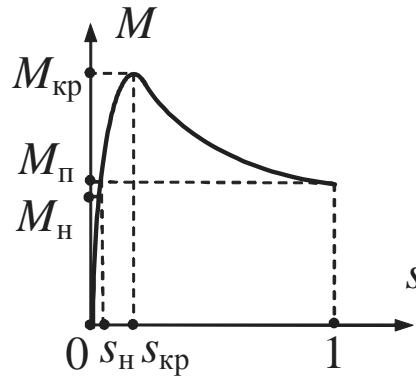
Кратность пускового тока, пускового момента и максимального момента:

$$k_I = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{НОМ}}}, \quad k_M = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad \lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$$

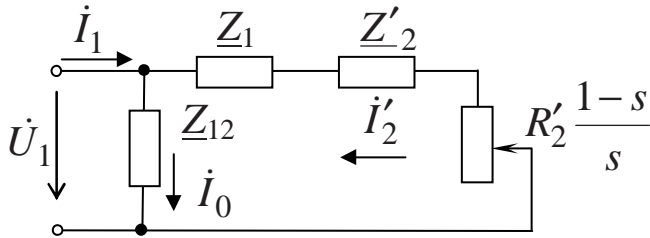
Механическая характеристика



Характеристика «Момент-скольжение»



Г-образная схема замещения асинхронного двигателя



$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

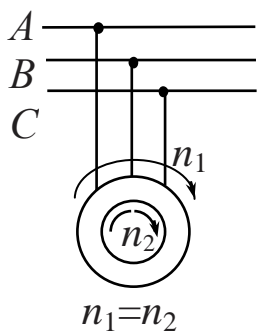
$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$R_2 = \frac{M_{\text{НОМ}}(n_1 - n_2)}{9,55m_2 I_{2\text{НОМ}}^2}, \quad X_{2s} = X_2 s$$

Коэффициент приведения

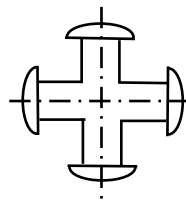
$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{01} w_1}{k_{02} w_2}$$

7.2. Синхронные машины

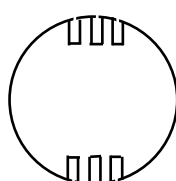


n_1 -частота вращения магнитного поля;
 n_2 -частота вращения ротора

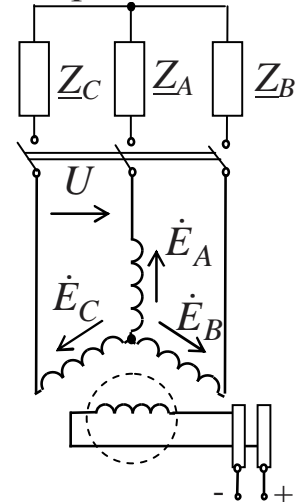
Ротор явнополюсный



Ротор неявнополюсный



Синхронная машина



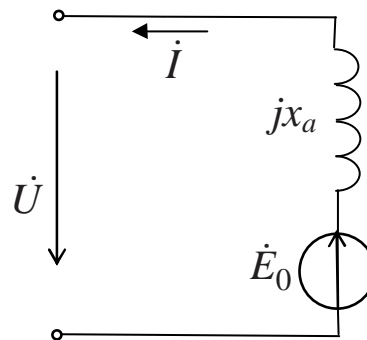
Синхронный генератор

Уравнение электрического состояния фазы статора

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jx_a \dot{I}$$

где $x_a = x_{рас} + x_c$ - индуктивное сопротивление фазной обмотки статора

Схема замещения синхронного генератора



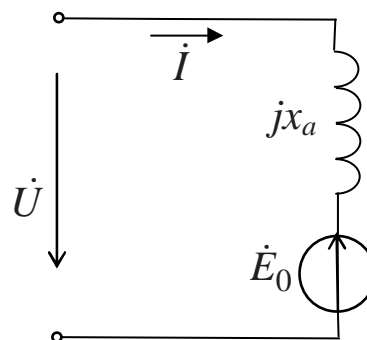
Синхронный двигатель

Уравнение электрического состояния фазы синхронного двигателя

$$\dot{E}_0 = \dot{U} - jx_a \dot{I},$$

где $\dot{E}_0 = j\omega\psi_0$, $x_a = x_{рас} + x_c$

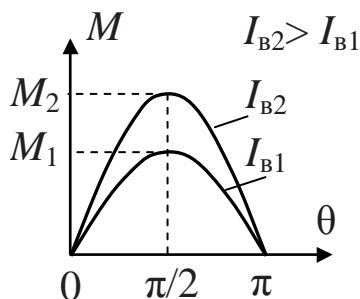
Схема замещения синхронного двигателя



Угловая характеристика синхронного двигателя

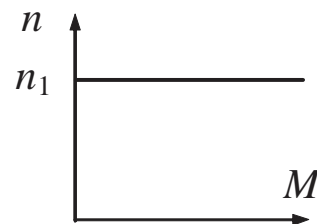
$$M = \frac{3E_0U}{x_a\Omega_0},$$

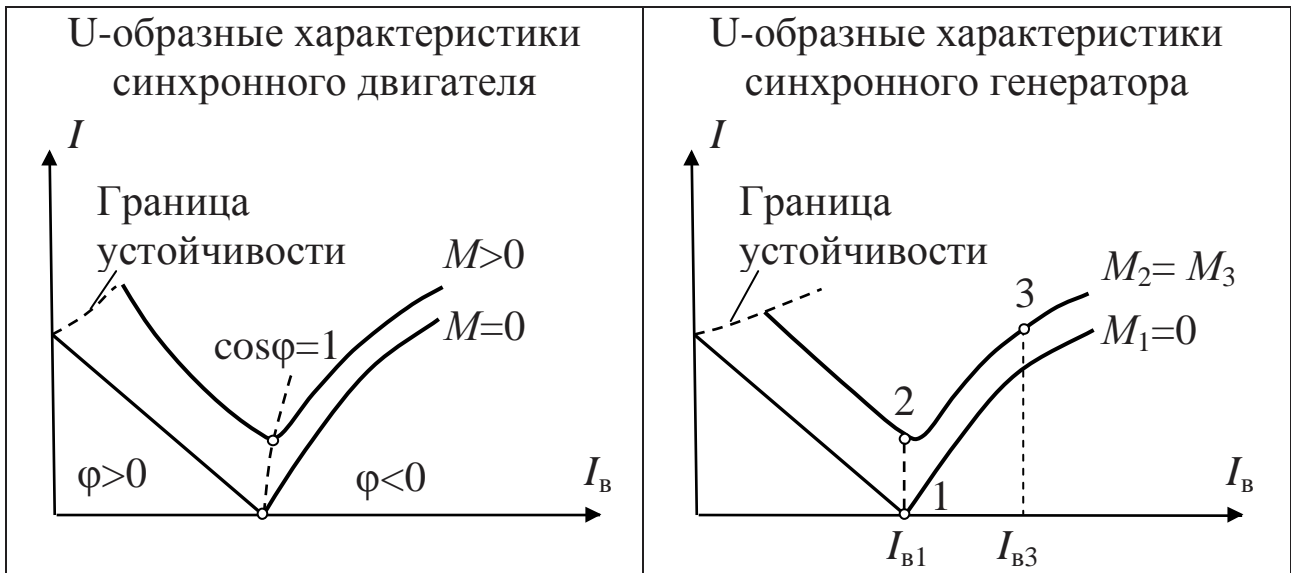
где $\Omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$



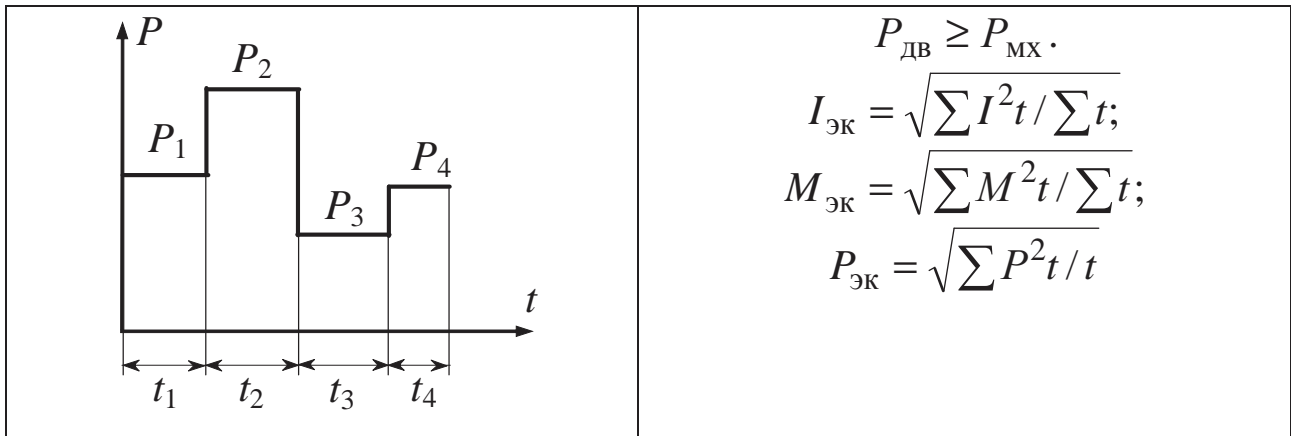
в диапазоне $0 < \theta < \pi/2$ – устойчивая работа двигателя;
в диапазоне $\pi/2 < \theta < \pi$ – неустойчивая работа двигателя

Механическая характеристика синхронного двигателя





8. ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ



$$M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{НОМ}} = \lambda \frac{9,55 P_{2\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}};$$

$$M_{\text{max}} = 0,81 \lambda M_{\text{НОМ}} = 0,81 \lambda \frac{9,55 P_{2\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}};$$

$$P_{\text{СТ}} = P_{\text{ЭК}} \sqrt{\text{ПВ}_1 / \text{ПВ}_{\text{СТ}}},$$

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{t_p}{t_n},$$

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100\% = \frac{t_p}{t_n} 100\%;$$

$$P_{\text{ЭК}} = P_{\text{МХ}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{СТ}}}$$

9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Погрешность измерений

Абсолютная погрешность Δ – разность между измеренным \bar{X} и действительным X значениями измеряемой величины.

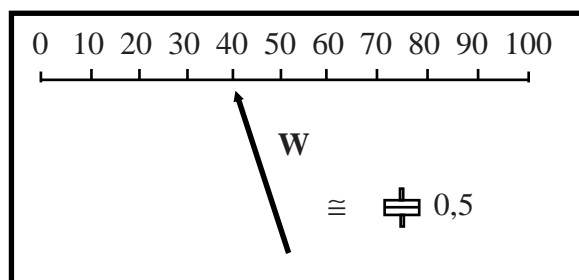
Относительная погрешность δ – отношение абсолютной погрешности Δ к действительному значению X , выраженное в процентах.

Приведенная погрешность γ – отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению X_N (часто верхний предел диапазона измерения) прибора, выраженное в процентах. Согласно ГОСТ 16263-70 *инструментальными погрешностями* называют такие, которые присущи данному средству измерения, т.е. могут быть определены при его испытаниях.

Основная инструментальная погрешность определяется по классу точности K средства измерения.

Дополнительная погрешность возникает в результате влияния на показания прибора различных внешних факторов.

Ваттметр электродинамической системы с классом точности 0,5




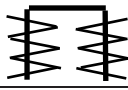
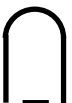

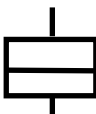
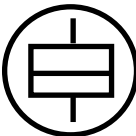


$$\Delta = \bar{X} - X, \quad \gamma = \pm \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%,$$

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} \cdot 100\%, \quad \delta = K \cdot \frac{X_N}{X},$$

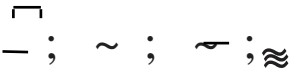



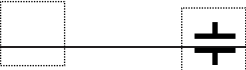
$$X = \bar{X} \cdot \left(1 \pm \frac{\delta}{100} \right)$$

Согласно ГОСТ 8.401-80, если погрешность средств измерения носит аддитивный характер, то класс точности задается пределом приведенной погрешности

Условные знаки и краткая характеристика электроизмерительных приборов

Условный знак системы	Наименование прибора	Род тока и частота	Тип прибора
	Электромагнитный прибор	Постоянный и переменный токи $10-10^4$ Гц	Амперметры, вольтметры
	Электромагнитный логометр	(действующее значение)	Фазометры, фарадометры
	Магнитоэлектрический прибор	Постоянный ток, пульсирующий ток	Амперметры, вольтметры, гальванометры
	Магнитоэлектрический логометр	(среднее значение)	Омметры, частотометры инфранизкой частоты 0,1-1,5 Гц
	Электродинамический прибор	Постоянный и переменный токи $10^{-2}-10^4$ Гц (действующее значение)	Амперметры, вольтметры, ваттметры
	Ферродинамический прибор	Постоянный и переменный токи $10-10^3$ Гц (действующее значение)	Амперметры, вольтметры, ваттметры
	Электростатический прибор	Постоянное и переменное напряжения $10-10^3$ Гц	Вольтметры
	Прибор выпрямительной системы	Постоянный и переменный токи (действующее значение)	Амперметры, вольтметры

Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Условное графическое обозначение	Содержание условного обозначения
A, B (V), W, Ω , Hz, φ , $\cos\varphi$, F, H	Наименование единицы измеряемой величины
0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0	Класс точности прибора
; \perp ; $\angle 60$	Рабочее положение шкалы прибора
	Прибор предназначен для работы: в цепи постоянного тока; в цепи переменного тока; в цепи постоянного и переменного токов; в цепи трехфазного тока
	Измерительная цепь прибора изолирована от корпуса и испытана напряжением
	Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте или инструкции по эксплуатации прибора
500 Hz ; 45 - 500 Hz	Прибор работает нормально: при частоте 500 Гц; при частотах от 45 до 500 Гц
	Прибор защищен от внешних магнитных полей
	Прибор защищен от влияния электрических полей

10. ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С. Курс электротехники: учеб. для вузов/ А. С. Касаткин, М. В. Немцов.-9-е изд., стер.-М.: Высш. шк., 2007.-542 с.
2. Иванов И. И., Соловьев Г.И., Равдоник В.С. Электротехника: Учебник. 4-е изд., стер.- СПб.: Лань, 2006.- 496с.
3. Беневоленский С.Б., Марченко А.Л. Основы электротехники. Учебное пособие для втузов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2006. – 568с.
4. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.А.Жаворонков, А.В.Кузин. – М.: «Академия», 2005. – 400с.
5. Кононенко В.В., Мишкович В.И. и др./Под. ред. Кононенко В.В. Практикум по электротехнике и электронике: Учеб. пособие для вузов – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 384с.
6. Иванов И.И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи: Учеб. пособие/ И.И. Иванов, А.Ф. Лукин, Г.И. Соловьев.-2-е изд., испр.-СПб.:Лань,2002.-192 с.
7. Рекус Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: Учеб. Пособие для неэлектротех. спец. вузов/ Г.Г. Рекус, А.И. Белоусов; Ред. Л.В. Честная,-2-е изд., перераб. –М.: Высш. шк., 2001. –416 с.
8. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учеб. пособие для вузов/ И. И. Алиев.-4-е изд., доп.- Ростов н/Д: Феникс, 2003.-480 с.
9. Электрические и магнитные цепи: практикум по дисциплине «Электротехника и электроника» /Р.В.Ахмадеев, И.В.Вавилова, П.А.Грахов, Т.М.Крымская.- Уфа: УГАТУ, 2007.- 78с.
10. Электротехника и электроника. Часть 1. Электрические и магнитные цепи: Учебный комплект по дисциплине «Электротехника и электроника». Учебное электронное издание / Р.В. Ахмадеев, И.В. Вавилова, П.А. Грахов. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 268 с.

Составители: Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов,
Т. М. Крымская, Р. Г. Фаррахов

УДК 621.3(07)

ББК 31.2(я7)

Э45

Рецензенты: доцент кафедры ТОЭ УГАТУ Крайнова Т.М.,
профессор кафедры ЭМ УГАТУ Рогинская Л.Э.

Опорный конспект по электротехнике: Методические указания к изучению дисциплины «Электротехника и электроника» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: Р.В. Ахмадеев, И.В. Вавилова, П.А. Грахов, Т.М. Крымская, Р.Г. Фаррахов. – Уфа, 2009. – 28 с.

Опорный конспект содержит краткие теоретические сведения по методам расчета электрических цепей, расчету цепей синусоидального однофазного и трехфазного тока, расчету магнитных цепей, трансформаторам, машинам постоянного тока, машинам переменного тока, электроприводу и аппаратуре управления и электрическим измерениям.

Соответствует Государственному образовательному стандарту и типовой учебной программе по дисциплине «Электротехника и электроника» для студентов следующих направлений подготовки и специальностей: 550900; 551600; 551800; 552700; 553500; 554300; 140100; 140500; 150200; 150400; 150500; 150600; 150700; 150800; 160100; 160300; 160900; 190700; 200500; 220400; 230300; 280100; 280200.

Рекомендуется студентам вышеперечисленных направлений подготовки и специальностей при изучении дисциплины «Электротехника и электроника».

Табл.2. Ил. 1. Библиогр.: 10 назв.

© Уфимский государственный авиационный
технический университет, 2009