


БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»


**СОГЛАСОВАНО**

Заведующий кафедрой  
«Электроснабжение»

  
\_\_\_\_\_ В.Б. Козловская  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

**СОГЛАСОВАНО**

Декан энергетического факультета

  
\_\_\_\_\_ Е.Г. Пономаренко  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ  
ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»**

**для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»**

Составитель: Калечиц В.Н.

Рассмотрен и утвержден на заседании совета энергетического факультета  
25.04.2019 г. Протокол №9

Минск 2019

## Содержание ЭУМК

	<b>Теоретический раздел</b>	5
1	Краткий конспект лекций по учебной дисциплине «Электрические машины»	
	<b>Практический раздел</b>	99
2	Задачи для практических занятий	
	<b>Контроль знаний</b>	109
3	Вопросы к зачету по дисциплине «Электрические машины»	
	<b>Вспомогательный раздел</b>	112
4	Учебная программа учреждения высшего образования по учебной дисциплине «Электрические машины» для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт».	

## Пояснительная записка

**Учебно-методический комплекс (УМК)** по учебной дисциплине «Электрические машины» составлен на основе образовательного стандарта ОСВО 1-37 01 05 для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» в соответствии со статьей 94 Кодекса Республики Беларусь об образовании, которые определяют структуру учебно-методического комплекса, порядок его создания на уровне высшего образования в учреждениях высшего образования.

**Цели УМК** - повышение качества образования путем систематизации теоретических знаний и практических умений за счет научно-методического обеспечения, основанного на результатах фундаментальных и прикладных научных исследований; обеспечение студента полным комплектом учебных и учебно-методических материалов, позволяющим в большей степени самостоятельно овладевать знаниями.

УМК по дисциплине «Электрические машины» выполнен в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 7.83-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Электронные издания. Основные виды и выходные сведения», введенного в действие на территории Республики Беларусь постановлением Комитета по стандартизации, метрологии и сертификации при Совете Министров Республики Беларусь от 22 августа 2002 г. N 37.

В УМК объединяются структурные элементы научно-методического обеспечения образования. Научно-методическое обеспечение образования осуществляется в целях обеспечения получения образования, повышения его качества и основывается на результатах фундаментальных и прикладных научных исследований в сфере образования.

УМК предназначен для реализации требований образовательных программ и образовательных стандартов высшего образования и создается по учебной дисциплине.

**УМК включает разделы:** теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный:

1. Теоретический раздел УМК содержит материалы для теоретического изучения учебной дисциплины в объеме, установленном учебным планом по специальности.
2. Практический раздел УМК содержит материалы для проведения практических занятий.
3. Раздел контроля знаний УМК содержит материалы итоговой аттестации, позволяющие определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации образовательных программ высшего образования.

4. Вспомогательный раздел УМК содержит учебную программу, перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины.

**Рекомендации по организации работы с УМК**

- студентам выдается практически весь материал;
- по мере поступления новых материалов УМК может быть доукомплектован в рабочем порядке после установленных правилами согласований.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**  
учебно-методического комплекса  
по дисциплине «**Электрические машины**»  
для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

**КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**  
**«Электрические машины»**  
**для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»**

Составитель: Калечиц В.Н.

2019

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## Лекция 1.1. Трансформаторы. Основные сведения. Элементы конструкции

Трансформатор - это электромагнитный аппарат для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения той же частоты.

Основные элементы конструкции трансформатора: сердечник (магнитопровод) и обмотки, которые помещаются в бак и закрываются крышкой, а также вспомогательные устройства

- Обмотки:
  - первичная и вторичная,
  - высшего, низшего и среднего напряжения,
  - концентрические (однослойные и многослойные, цилиндрические винтовые, спиральные)
  - дисковые чередующиеся.

Требования к обмоткам: экономичность по затратам и КПД, необходимый тепловой режим, механическая (динамическая) прочность, устойчивость к перенапряжениям. Материалы: медь или алюминий с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией

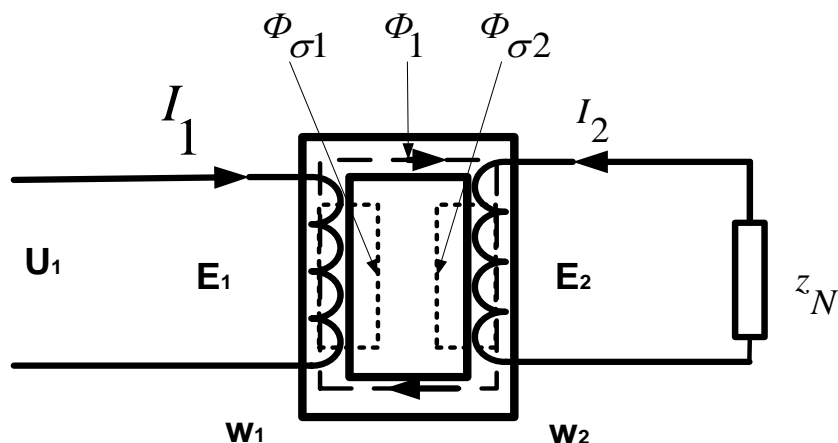


Рис.1.1. Устройство и принцип действия трансформатора

- Трансформаторы:
  - понижающие и повышающие,
  - двухобмоточные и трехобмоточные,
  - сухие и масляные,
  - однофазные и трехфазные.
- Основные типы трансформаторов:
  - силовые,

- силовые специального назначения,
- индукционные регуляторы,
- автотрансформаторы,
- измерительные трансформаторы тока и напряжения,
- испытательные трансформаторы.

Материал магнитопроводов: электротехническая сталь, магнитодиэлектрики.

- Номинальные величины. Номинальный режим- это режим для которого данный трансформатор спроектирован. Он характеризуется номинальной мощностью, кВ·А, номинальными первичными и вторичными напряжениями, кВ, и номинальными токами, А, номинальной частотой, Гц.
- Синусоидальность напряжения и тока
- Симметричность трехфазной системы напряжений и токов
- Сердечники трансформаторов: стержневые и броневые. Шихтовка встык и впереплет, материал- листовая электротехническая сталь,
- Обмотки

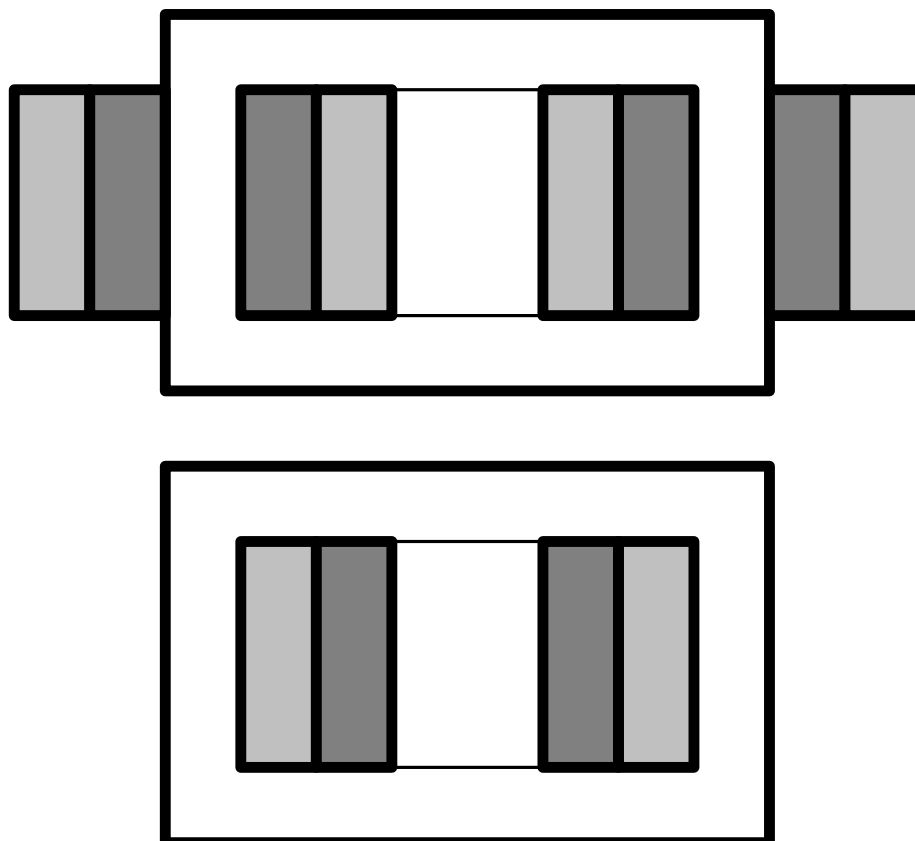


Рис.1.2. Сердечники и обмотки трансформаторов



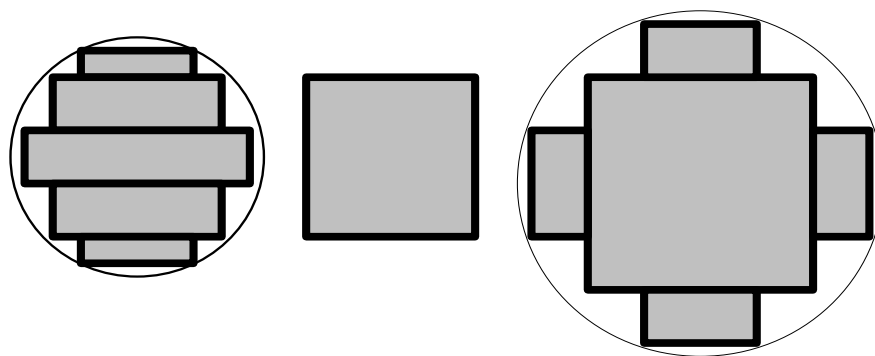


Рис.1.3. Сердечники трансформаторов

- **Баки масляных трансформаторов:**

- гладкие (до 20 кВ·А),
- трубчатые (до 1800 кВ·А),
- с пристроенными радиаторами- охладителями (до 10000 кВ·А),
- с принудительной циркуляцией масла и обдувом (более 10000 кВ·А).

- **Крышка бака:**

- выводные изоляторы обмоток высшего и низшего напряжения,
- маслорасширитель (более 100 кВ·А),
- выхлопная труба (более 1000 кВ·А),
- газовое реле,
- переключатель числа витков обмотки с приводом,
- кран для заливки масла.

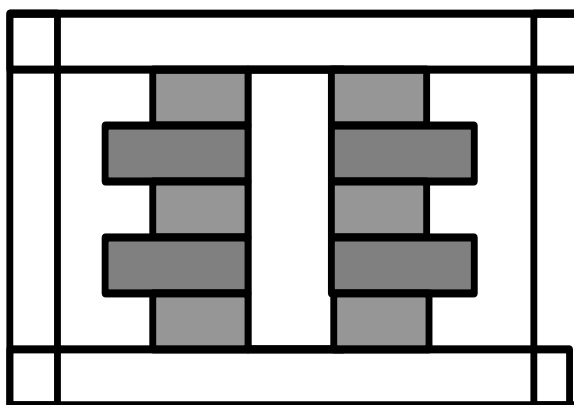


Рис.1.4. Дисковая чередующаяся обмотка.

- Трансформаторное масло- для охлаждения и изоляции: электрическая прочность 20-35 кВ/мм , температура вспышки 135°С, горюче, взрывоопасно, гигроскопично. Заменитель – совтол.

## Лекция 1.2. Электромагнитные процессы при работе трансформатора

- Принцип действия - закон электромагнитной индукции.
- Уравнение МДС (2 закон Кирхгофа для магнитной цепи)

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1$$

- Магнитные потоки и ЭДС обмоток

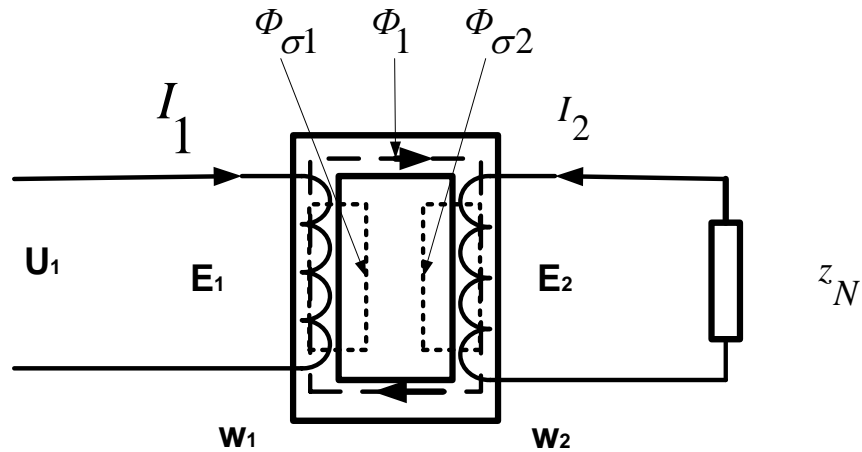


Рис.1.5. Физическая схема трансформатора

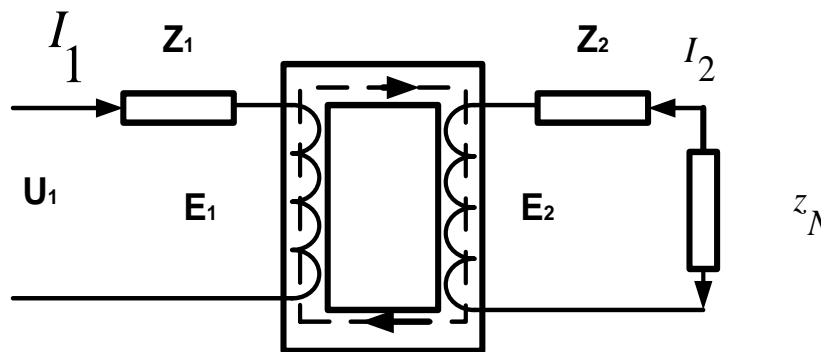


Рис.1.6. Физическая схема замещения трансформатора

$$\Phi_1 \Rightarrow e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$\Phi_1 \Rightarrow e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$\Phi_{\sigma 1} \Rightarrow e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$$

$$\Phi_{\sigma 2} \Rightarrow e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$$

- Уравнения напряжений обмоток на основании 2 закона Кирхгофа

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 r_1$$

$$e_2 + e_{\sigma 2} - i_2 r_2 = u_2$$

- Уравнения МДС и напряжений обмоток в комплексной форме

$$\overset{\bullet}{I_1} w_1 + \overset{\bullet}{I_2} w_2 = \overset{\bullet}{I_0} w_1$$

$$\overset{\bullet}{U_1} + \overset{\bullet}{E_1} + \overset{\bullet}{E_{\sigma 1}} = \overset{\bullet}{I_1} r_1$$

$$\overset{\bullet}{E_2} + \overset{\bullet}{E_{\sigma 2}} - \overset{\bullet}{I_2} r_2 = \overset{\bullet}{U_2}$$

- ЭДС обмоток

$$E_1 = 4.44 f_1 w_1 \Phi_1$$

$$E_2 = 4.44 f_2 w_2 \Phi_1$$

$$\overset{\bullet}{E_{\sigma 1}} = -j \overset{\bullet}{I_1} x_1$$

$$\overset{\bullet}{E_{\sigma 2}} = -j \overset{\bullet}{I_2} x_2$$

- Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток

$$x_1 = 2\pi f_1 L_{\sigma 1}$$

$$x_2 = 2\pi f_1 L_{\sigma 2}$$

- Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

- Приведенный трансформатор. Приведенный ток и приведенная ЭДС

$$E_1 = E_2' = k E_2$$

$$I_2' = \frac{E_2 I_2}{E_2'} = \frac{I_2}{k}$$

Приведенные сопротивления вторичной обмотки из условия неизменности потерь при приведении

$$r_2' = r_2 k^2, \quad x_2' = x_2 k^2$$

- Окончательно уравнения МДС и напряжений обмоток приведенного трансформатора в комплексной форме

$$\overset{\bullet}{I_1} + \overset{\bullet}{I_2'} = \overset{\bullet}{I_0}$$

$$U_1 = -E_1 + I_1 z_1$$

$$E_2' = +I_2' z_2 + U_2'$$

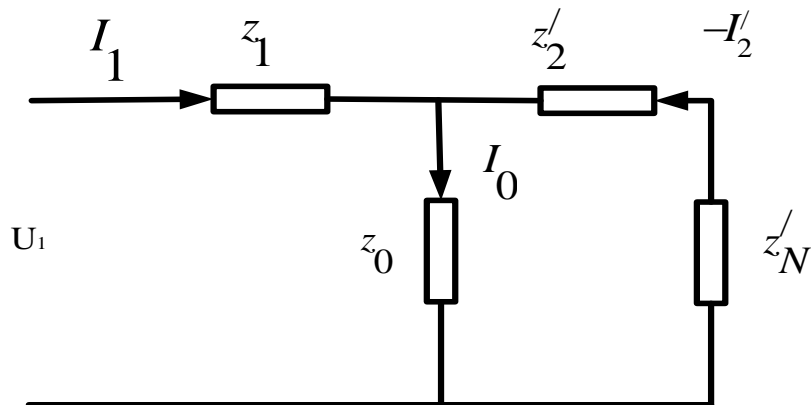


Рис.1.7. Т-образная схема замещения трансформатора

$$z_0 = r_0 + jx_0 \quad r_0 = \frac{P_{CT}}{3I_0^2} \quad x_0 = 2\pi fM$$

Ток холостого хода и напряжение короткого замыкания трансформатора  
 $I_0 = (1...3)\% I_H$ ,  $U_k = (5...10)U_t$ .

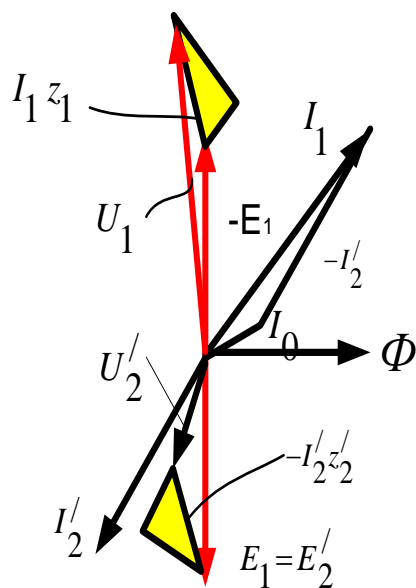


Рис.1.8. Векторная диаграмма трансформатора

## Лекция 1.3. Процессы в трансформаторе при холостом ходе и коротком замыкании

### Холостой ход однофазного трансформатора

- Эквивалентная схема режима холостого хода

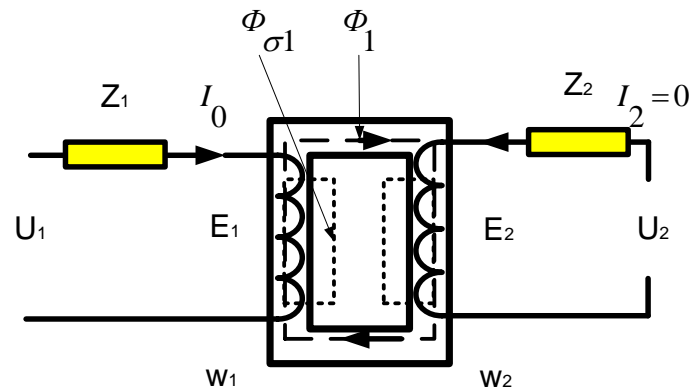


Рис.1.9. Холостой ход трансформатора

- Простейший трансформатор-это трансформатор без потерь, в котором

$$r_1=0, \quad x_1=0, \quad \Delta P=0$$

Напряжение, ЭДС и магнитный поток

$$-e_1 = u_1 = \sqrt{2}E_1 \cdot \sin \omega t,$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

$$\Phi = \int \frac{\sqrt{2}E_1 \sin \omega t}{w_1} dt = -\frac{\sqrt{2}E_1 \cos \omega t}{\omega w_1} = -\frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi f w_1} \cos \omega t = -\Phi_M \cos \omega t,$$

$$\Phi_M = \frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi f w_1},$$

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_M$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_M$$

При синусоидальном изменении подводимого напряжения магнитный поток простейшего, а также и реального трансформатора, синусоидален, а кривая намагничивающего тока несинусоидальна и содержит явно выраженные 3-ю и кратные ей гармоники. Несинусоидальную кривую намагничивающего тока заменяют эквивалентной синусоидой, действующее значение которой равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений высших гармоник намагничивающего тока. Эквивалентный намагничивающий ток представляют в виде вектора, который отстает в простейшем трансформаторе на 90 градусов от приложенного напряжения. Реальный трансформатор для покрытия потерь в стали потребляет еще и

активную составляющую тока холостого хода, которая совпадает по фазе с питающим напряжением. Полный ток холостого хода равен

$$I_0 = \sqrt{I_{0\mu}^2 + I_{0A}^2}$$

Потери холостого хода состоят из потерь в меди первичной обмотки, которыми в расчете пренебрегают, и потерь в стали на перемагничивание (гистерезис) и на вихревые токи, основных и добавочных. Добавочные потери в стали составляют 15...20% основных потерь и учитываются введением соответствующего коэффициента. Потери холостого хода и основные потери в стали могут быть определены как

$$P_0 = (1,15 \dots 1,2) \Delta P_C$$

$$\Delta P_C = \Delta P_h B_*^2 f_*^2 + \Delta P_f B_*^2 f_*^2$$

$$\Delta P_C = p_y G_C B_*^2 f_*^{1,3}$$

### Испытательный режим короткого замыкания однофазного трансформатора

- Опыт короткого замыкания проводят при напряжении короткого замыкания  $U_K = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot U_H$ , где  $u_{K\%}$  - параметр трансформатора-напряжение короткого замыкания в % от номинального, которому при работе в режиме короткого замыкания соответствуют токи в обмотках, равные номинальным токам.

- Уравнения

$$\overset{\bullet}{U}_{1K} = -\overset{\bullet}{E}_{1K} + \overset{\bullet}{I}_1 \overset{\bullet}{Z}_K,$$

$$\overset{\bullet}{I}_1 = -\overset{\bullet}{I}'_2,$$

$$\overset{\bullet}{U}'_{2K} = 0, \quad \overset{\bullet}{E}_{1K} = \overset{\bullet}{E}'_{2K}$$

- Схема замещения

- Мощность короткого замыкания равна потерям в обмотках при номинальном токе  $P_K = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2$ . Потери в стали малы.

- Векторная диаграмма

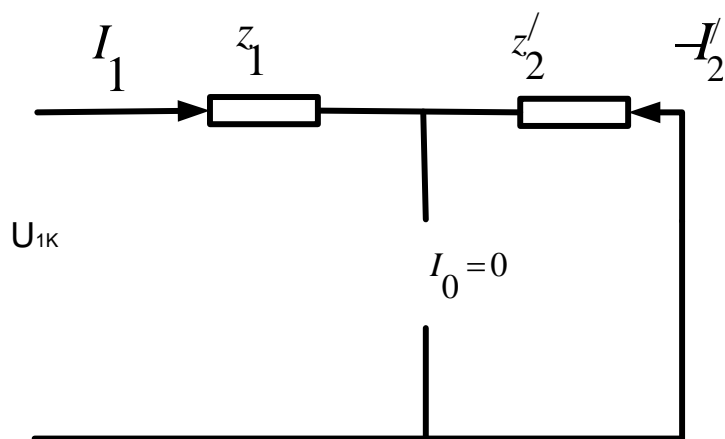


Рис.1.10. Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Параметры схемы замещения определяют для одной фазы на основании:

- 1) **опыта холостого хода** при номинальном напряжении (пренебрегая потерями в первичной обмотке, измеряя подведенную мощность, фазный ток холостого хода и фазные напряжения, первичное и вторичное)

$$z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}, \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1H}}{U_{20}}$$

- 2) **и опыта короткого замыкания** при номинальном токе (пренебрегая потерями в стали, измеряя первичное фазное напряжение, равное напряжению короткого замыкания, фазные токи в обмотках и потребляемую мощность, которая равна мощности короткого замыкания (сумме потерь в первичной и вторичной обмотках при номинальном токе)).

$$z_K = \frac{U_K}{I_H}, \quad r_K = \frac{P_K}{3I_H^2}, \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}, \quad r_1 \approx r_2' = \frac{r_K}{2}, \quad x_1 \approx x_2' = \frac{x_K}{2},$$

Для трехфазного трансформатора все величины относятся к одной фазе.

## Лекция 1.4. Трансформация трехфазных токов

**Магнитные системы трехфазных трансформаторов:** независимая, связанная и почти независимая

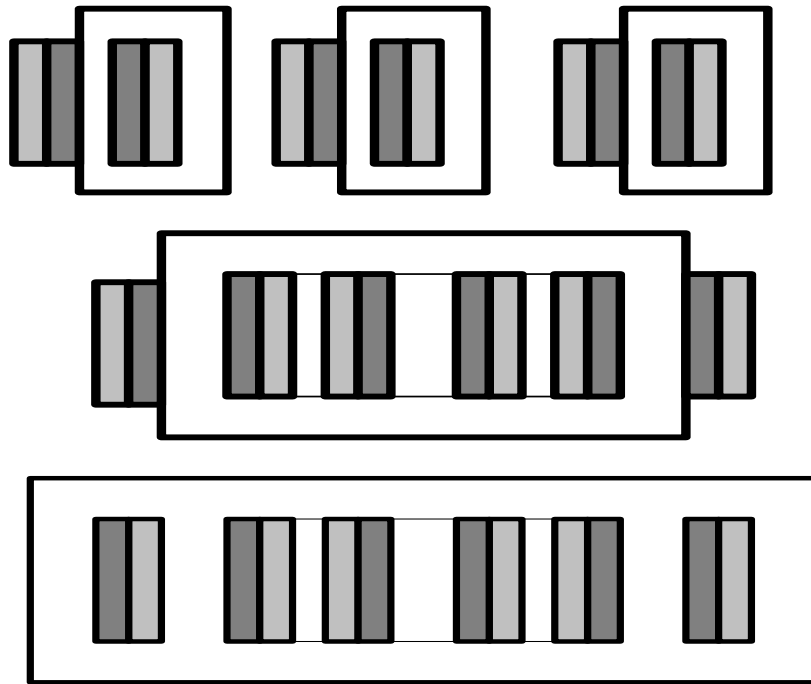


Рис.1.11 Магнитные системы трехфазных трансформаторов

**Схемы соединения трансформаторов:**

Y, Δ, Z

**ЭДС трехфазной обмотки.**

$$e_A = E_{M1} \sin \omega t + E_{M3} \sin 3\omega t + E_{M5} \sin 5\omega t,$$

$$\begin{aligned} e_B &= E_{M1} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{M3} \sin 3(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{M5} \sin 5(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = \\ &= E_{M1} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{M3} \sin 3\omega t + E_{M5} \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_C &= E_{M1} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + E_{M3} \sin 3(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + E_{M5} \sin 5(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = \\ &= E_{M1} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + E_{M3} \sin 3\omega t + E_{M5} \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned}$$



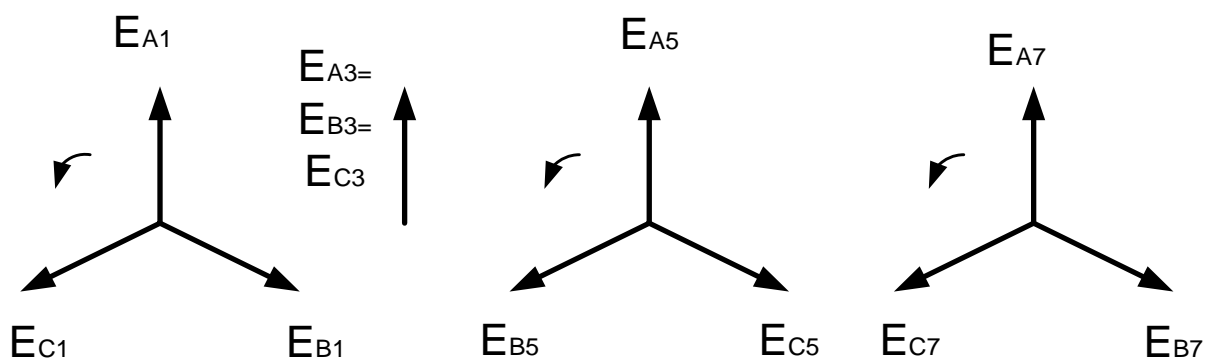


Рис.1.12. Высшие гармоники фазных ЭДС.

### Гармонический состав ЭДС при соединении обмоток Y, Δ, Z

#### При соединении Y:

- 3 и кратные ей гармоники фазных ЭДС совпадают по фазе, направлены навстречу друг другу и в линейных ЭДС отсутствуют.
- Гармоники порядка  $\nu = 3c + 1 = 1, 7, 13, \dots$  образуют симметричные системы векторов прямой последовательности. Гармоники порядка  $\nu = 3c - 1 = 5, 11, 17, \dots$  образуют симметричные системы векторов обратной последовательности. Для них справедливы соотношения:

$$E_{PH} = \sqrt{E_{PH1}^2 + E_{PH3}^2 + E_{PH5}^2 + \dots + E_{PH7}^2 + \dots}$$

$$E_L = \sqrt{E_{L1}^2 + E_{L5}^2 + E_{L7}^2 + \dots}$$

$$P_V = 3E_{PHV} I_{PHV} \cos \varphi_{PHV} = \sqrt{3} E_{LV} I_{LV} \cos \varphi_{LV}$$

$$E_{LV} = \sqrt{3} E_{PHV}$$

$$I_{LV} = I_{PHV}$$

#### При соединении Δ:

- 3 и кратные ей гармоники фазных ЭДС совпадают по фазе, действуют в одном направлении и создают 3 и кратные ей гармоники тока. В линейных ЭДС они отсутствуют, т.к. целиком используются на преодоление падения напряжения от этих гармоник.
- Гармоники порядка  $\nu = 3c + 1 = 1, 7, 13, \dots$  и  $\nu = 3c - 1 = 5, 11, 17, \dots$  образуют симметричные системы векторов прямой и обратной последовательности. Для них справедливы те же соотношения, что и при соединении Y, но:

$$E_{LV} = E_{PHV}$$

$$I_{LV} = \sqrt{3} I_{PHV}$$

**Группы соединения (векторная группа).** Группа соединения - это угол сдвига линейных ЭДС первичной и вторичной обмоток, выраженный в часах. Группа соединения зависит от схемы соединения обмоток, направления намотки и маркировки зажимов.

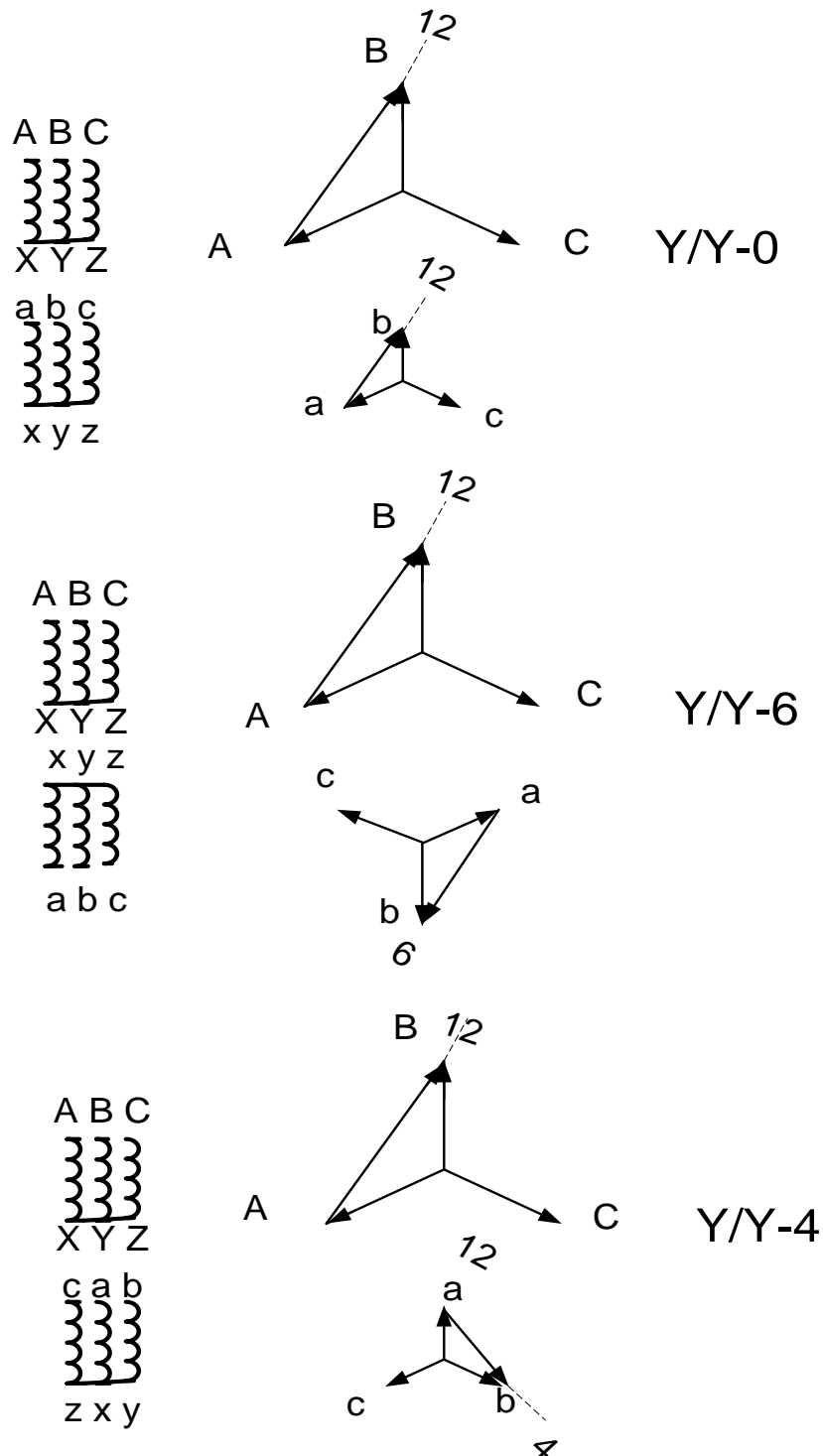


Рис.1.13.Определение групп соединения

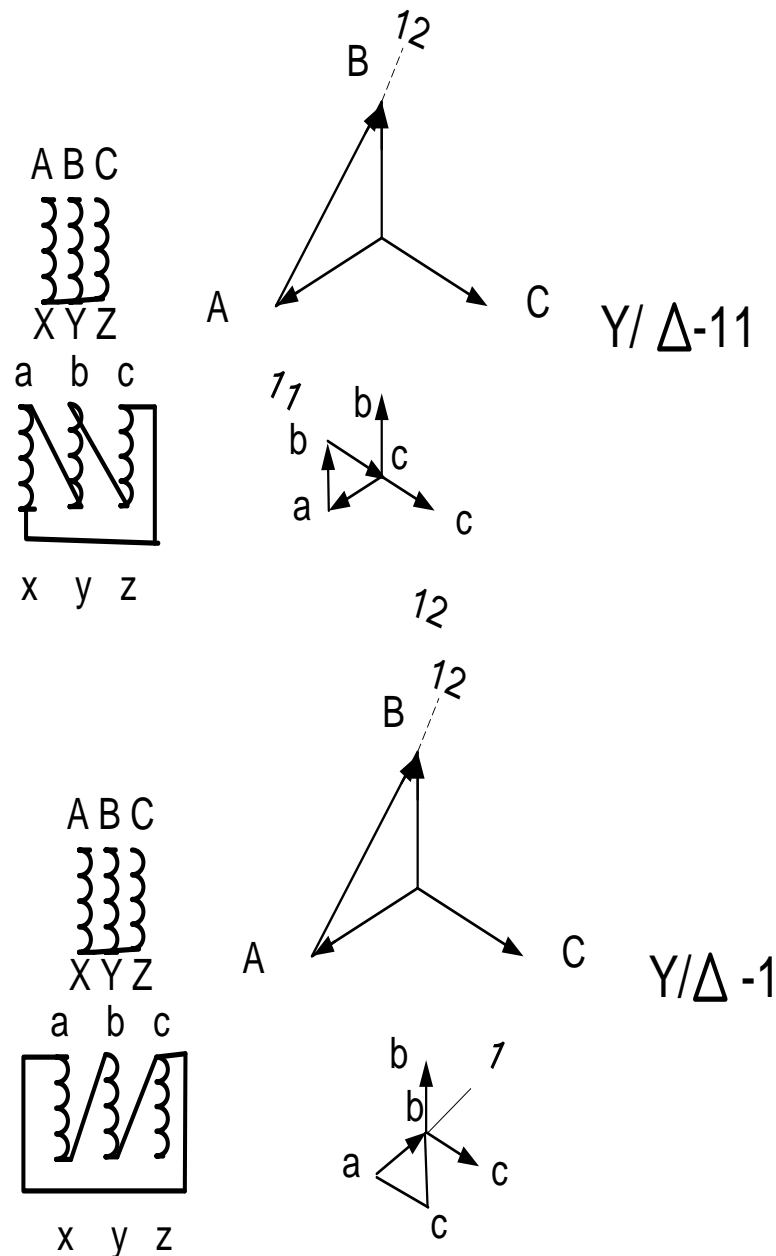


Рис.1.14. Определение групп соединения

Всего может быть 12 групп. ГОСТ допускает только группы:  $Y/Y_0-0$ ,  $Y/\Delta-11$ ,  $Y_0/\Delta-11$ , а также группы  $\Delta/Y_0-11$  и  $Y/Z-11$ .

Группы  $Y/Y_0-0$ ,  $\Delta/Y_0-11$  применяются для питания смешанной (силовой и осветительной) нагрузки при мощности трансформаторов до 1800 кВА, при высшем напряжении до 35 кВ, низшем напряжении до 0,4 кВ.

Группа  $Y/\Delta-11$  применяется при мощности трансформаторов до 5600 кВА, при высшем напряжении до 35 кВ, низшем напряжении более 0,4 кВ.

Группа  $Y_0/\Delta-11$  применяется при мощности трансформаторов более 3200 кВА, при высшем напряжении более 35 кВ, низшем напряжении не менее 3,3 кВ.

## Лекция 1.5. Эксплуатационные характеристики

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$$

$$\dot{E}'_2 = +\dot{I}'_2 z_2 + \dot{U}'_2$$

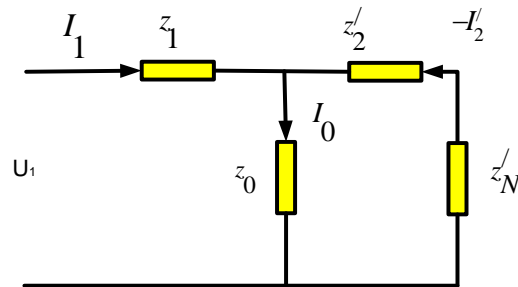


Рис.1.15. Т-образная схема замещения трансформатора

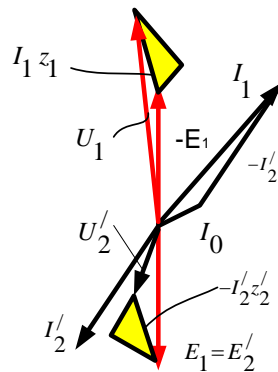


Рис.1.16. Векторная диаграмма трансформатора

**Изменение напряжения трансформатора** – это выраженная в % или о.е. от номинального напряжения, арифметическая разность между номинальным напряжением вторичной обмотки  $U_{20}$  и напряжением  $U_2$  при номинальной нагрузке.

$$\Delta U_* = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}$$

$$\Delta U_* \approx k_H \cdot (u_{KA*} \cdot \cos \varphi + u_{KP*} \cdot \sin \varphi)$$

### Потери и КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{2H} \cdot k_{HG}}{P_{2H} \cdot k_{HG} + P_0 + P_K \cdot k_{HG}^2}$$

Полезная активная мощность

$$P_{2H} = S_H \cdot \cos \varphi_H$$

## Лекция 1.6. Параллельная работа трансформаторов

Назначение параллельного включения:

- трансформация больших мощностей при ограниченной мощности единичного трансформатора,
- повышение надежности электроснабжения,
- снижение мощности резерва,
- возможность выбора оптимального числа работающих трансформаторов в зависимости от нагрузки.

Условия параллельной работы:

- равенство коэффициентов трансформации при одинаковых первичных и вторичных номинальных напряжениях

$$U_{11} = U_{12} = U_{13} = \dots$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = \dots$$

- одинаковые группы соединения,
- равенство напряжений короткого замыкания

$$u_{K1\%} = u_{K2\%} = u_{K3\%} = \dots$$

При выполнении условий векторные диаграммы трансформаторов совпадают и токи складываются арифметически. Нагрузка распределяется пропорционально их номинальной мощности, отсутствуют уравнивающие токи. При включении на параллельную работу трансформаторы должны быть сфазированы. Порядок фазировки изучается в лаборатории.

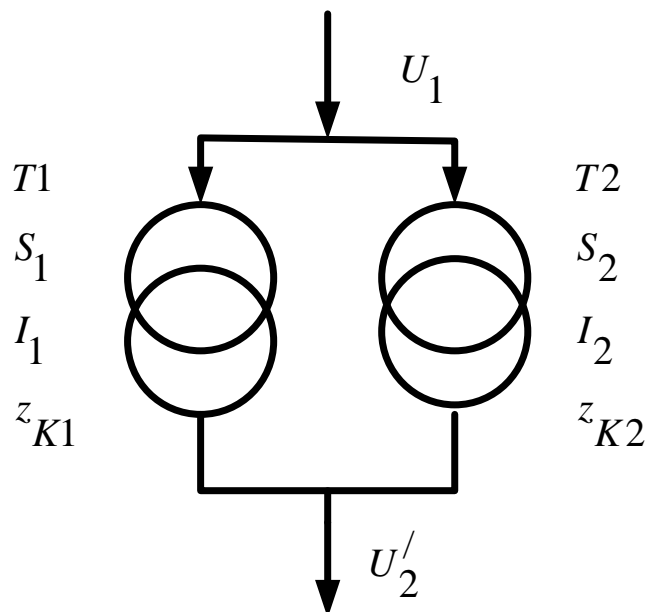


Рис.1.17. Схема замещения параллельно работающих трансформаторов

**Параллельная работа трансформаторов при различных коэффициентах трансформации при соблюдении двух других условий сопровождается**

возникновением уравнивающего тока. Трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации имеет большую ЭДС вторичной обмотки. Возникает разностная ЭДС, которая и создает в обмотках трансформаторов уравнивающие токи. При большой разнице в коэффициентах трансформации величина уравнивающих токов может превысить номинальный ток трансформаторов и сделать их параллельную работу невозможной. ГОСТ допускает параллельную работу трансформаторов с коэффициентами трансформации, отличающимися не более, чем на 0,5%, а при коэффициенте трансформации, меньшем 3 – до 1%.

$$\dot{I}_{Y1} = -\dot{I}_{Y2} = \frac{\dot{\Delta E}}{Z_{K1} + Z_{K2}}$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_{21} - \dot{I}_{Y1} Z_{K1} = \dot{E}_{22} - \dot{I}_{Y2} Z_{K2}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{Y1} + \dot{I}_{НГ1}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{Y2} + \dot{I}_{НГ2}$$

При нагрузке трансформаторов уравнивающие токи складываются с токами нагрузки и вызывают при чисто активной или активно-индуктивной нагрузке перегрузку трансформатора с меньшим коэффициентом трансформации и недогрузку трансформатора с большим коэффициентом трансформации.

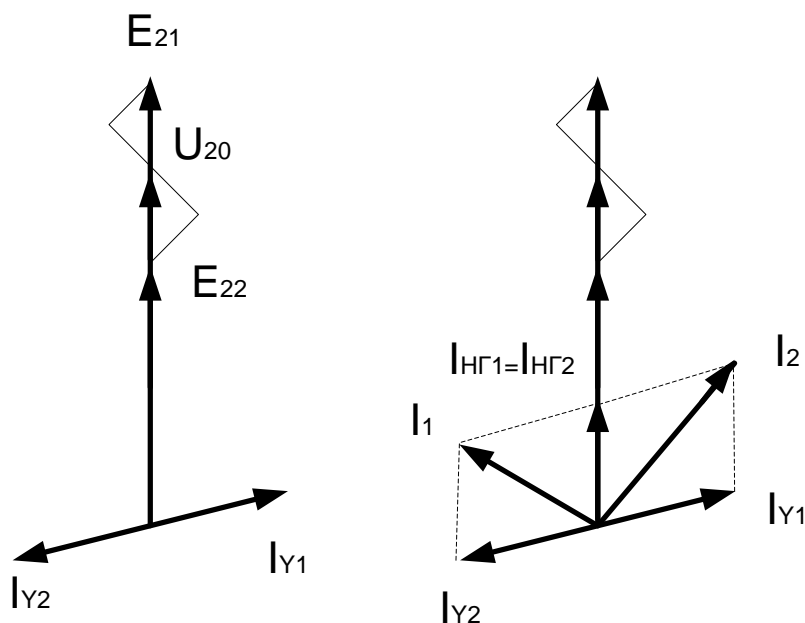


Рис.1.18. Векторные диаграммы параллельно включенных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации при холостом ходе и нагрузке

**Параллельная работа трансформаторов** при различных группах соединения при соблюдении двух других условий также сопровождается возникновением уравнивающего тока, который даже при ближайших группах, например 0 и 11, равен току короткого замыкания трансформатора

$$\dot{I}_{Y1} = -\dot{I}_{Y2} = \frac{\dot{\Delta E}}{Z_{K1} + Z_{K2}} = \frac{2 \cdot \dot{E}_2' \cdot \sin 15^\circ}{Z_{K1} + Z_{K2}}$$

$$I_Y = \frac{2 \cdot U_{H1} \sin 15^\circ}{2 \cdot u_{K1*} \cdot \frac{U_{H1}}{I_{H1}}} = \frac{I_{H1} \cdot 0,52}{u_{K1*}} = \frac{I_{H1} \cdot 0,52}{0,05} = 10 I_{H1}$$

Поэтому параллельная работа трансформаторов с различными группами соединения не допускается.

**Параллельная работа трансформаторов** при различных напряжениях короткого замыкания при соблюдении двух других условий не сопровождается возникновением уравнивающего тока, но нагрузка между трансформаторами распределяется обратно пропорционально их внутренним сопротивлениям, то есть пропорционально номинальной мощности и обратно пропорционально напряжению короткого замыкания.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{Z_{K2}}{Z_{K1}} = \frac{U_{H2} \cdot I_{H1}}{I_{H2} \cdot U_{H1}} \cdot \frac{u_{K2*}}{u_{K1*}} = \frac{S_{H1}}{S_{H2}} \cdot \frac{u_{K2*}}{u_{K1*}}$$

Допускается параллельная работа трансформаторов, отличающихся величиной напряжения короткого замыкания не более, чем на 10% от среднего значения  $u_{K*}$ , а по номинальной мощности – не более, чем в 3 раза.

## Лекция 1.7.Трехобмоточные трансформаторы. Автотрансформаторы

Трехобмоточные трансформаторы выпускаются трехфазными и однофазными. ГОСТ допускает группы соединения  $Y_0/Y_0/\Delta-0-11$  и  $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$

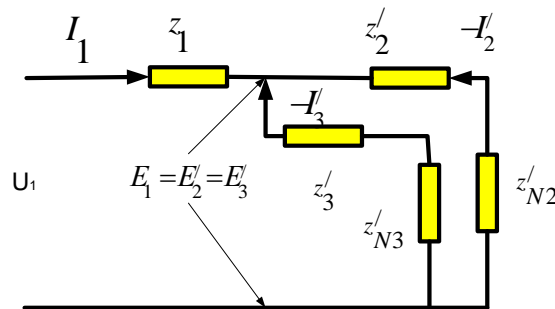


Рис.1.19.Схема замещения трехобмоточного трансформатора

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0 \approx 0$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$$

$$-\dot{U}'_2 = -\dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 z'_2$$

$$-\dot{U}'_3 = -\dot{E}'_3 + \dot{I}'_3 z'_3$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = \dot{E}'_3 = -\dot{I}_0 z_0$$

Параметры трехобмоточного трансформатора определяются из трех опытов КЗ и трех опытов ХХ. На основании опытов составляется система уравнений для определения параметров трансформатора. Трансформатор характеризуется тремя значениями коэффициента трансформации, тремя значениями тока ХХ, тремя значениями мощности ХХ, тремя значениями мощности КЗ, тремя значениями напряжения КЗ.

### Автотрансформаторы

Автотрансформатор отличается от обычного трансформатора наличием электрической связи между обмотками.

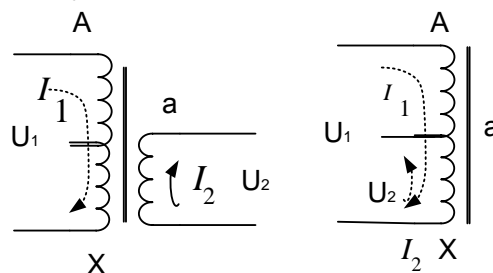


Рис.1.20.Схема понижающего трансформатора и автотрансформатора



Соотношение между токами обмоток автотрансформатора установим на основании известных соотношений

$$k_A = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_{AX}}{w_{aX}} = \frac{w_1}{w_2}$$

$$I_1 \dot{w}_1 + I_2 \dot{w}_2 = I_0 \dot{w}_1 \approx 0$$

$$\dot{I}_1 = -\frac{\dot{I}_2}{k_A}$$

$$\dot{I}_{aX} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_2}{k_A} + \dot{I}_2 = \dot{I}_2 \left(1 - \frac{1}{k_A}\right)$$

Ток в общей части обмотки автотрансформатора меньше тока вторичной обмотки обычного трансформатора в  $\left(1 - \frac{1}{k_A}\right)$  раз. Полная (внешняя или

проходная) мощность от первичной обмотки ко вторичной в автотрансформаторе передается электромагнитным (электромагнитная, внутренняя, расчетная мощность) и электрическим (электрическая

мощность) путями<sup>^</sup>  $S_{EM} = U_{Aa} \cdot I_1 = (U_1 - U_2) \cdot I_1 = U_1 I_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) = S \left(1 - \frac{1}{k_A}\right)$

$$S = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

$$S_{EL} = S - S_{EM} = S \frac{1}{k_A}$$

Размеры автотрансформатора зависят только от мощности, передаваемой электромагнитным путем. Поскольку ток на общем участке обмотки Aa

меньше тока вторичной обмотки обычного трансформатора в  $\left(1 - \frac{1}{k_A}\right)$  раз, во

столько же раз меньше сечение и расход меди. Поэтому автотрансформатор имеет меньшие размеры и стоимость, чем обычный трансформатор. Сопротивление автотрансформатора, однако, меньше, и это является причиной увеличения ТКЗ. Автотрансформатор отличается большим расходом электроизоляционных материалов.

## Лекция 2.1. Принцип действия и устройство асинхронных машин. Обмотки электрических машин переменного тока

**Режимы работы:** двигатель, генератор, электромагнитный тормоз.

**Элементы конструкции:**

- Корпус алюминиевый или стальной, лапы или фланец для крепления, ребра для охлаждения, осевой вентилятор, болт заземления, рым-болт, клеммная коробка.
- Статор – шихтованный из электротехнической стали магнитопровод, запрессован в корпус, 3-фазная обмотка статора из медного провода с изоляцией, уложенная в пазах статора, присоединена к зажимам клеммной коробки
- Ротор – шихтованный магнитопровод-сердечник, 3-фазная обмотка из медного провода с изоляцией в пазах ротора, контактные кольца, щетки (машина с фазным ротором) или литая алюминиевая короткозамкнутая обмотка, стержни, короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками (машина с короткозамкнутым ротором типа “беличья клетка”)
- Вал, подшипники, подшипниковые щиты, подшипниковые крышки, уплотнения, смазка.

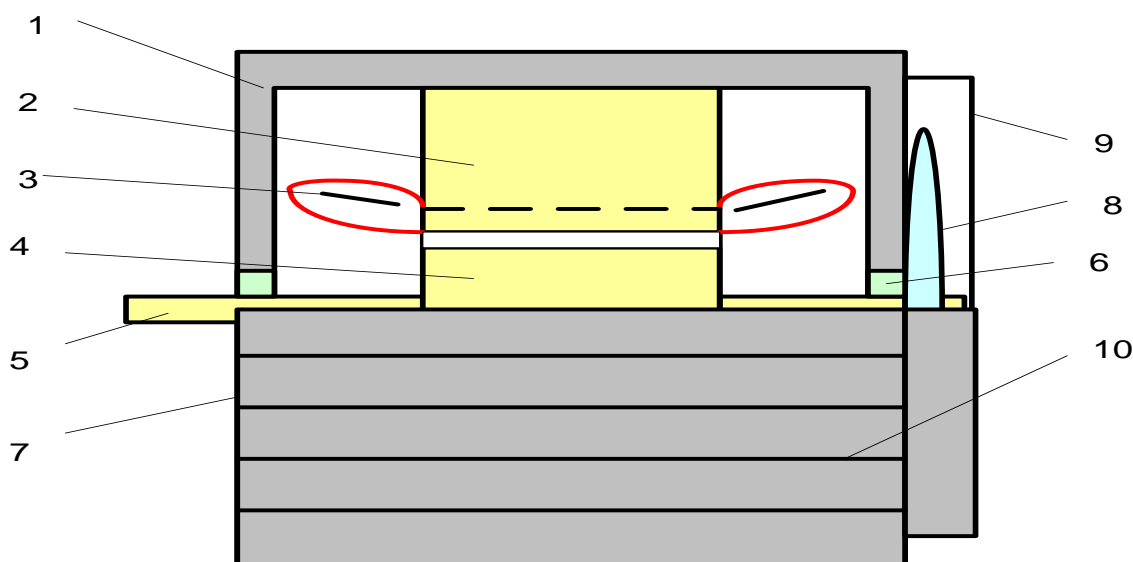


Рис.2.1. Конструкция асинхронного двигателя

**Основные соотношения:**

- Симметричная трехфазная система токов симметричной трехфазной обмотки статора создает вращающееся магнитное поле с МДС

$$F_1 = \frac{3}{2} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{o1}}{p} I_1 \sin(\omega t \pm \alpha)$$

Частота вращения поля

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \text{ рад / с или } n_1 = \frac{60f}{p}, \text{ об / мин}$$

- ЭДС обмоток статора и ротора (при вращении)

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{o1} \Phi_1$$

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 k_{o2} \Phi_1$$

где  $k_{o1} = k_{y1} k_{p1}$  - обмоточный коэффициент

- Ток ротора

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}}$$

- Вращающий момент

$$M = C \Phi_1 I_2 \cos \Psi$$

- Частота вращения ротора

$$\omega = \omega_1 (1-s) \quad n = n_1 (1-s)$$

- Высшие гармоники ЭДС статора и ротора

$$E_1 = \sum_{v=1,3,5\dots} 4,44 f_v w_v k_{ov} \Phi_v = 4,44 f_1 w_1 k_{o1} \Phi_1 \sqrt{1 + \sum_{v=3,5\dots} k_{ov}^2 \cdot k_{Bv}^2}$$

- Высшие гармоники МДС и потока однофазной и трехфазной обмоток

$$F_A = \sum_{v=1,3,5\dots} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{ov}}{pv} I_1 \cos \omega t \cdot \cos v\alpha$$

$$F = \sum_{v=6k\pm 1} \frac{3}{2} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{ov}}{pv} I_1 \cos(\omega t \pm v\alpha)$$

$3k$  - отсутствует

Частота вращения полей высших гармоник

$$\omega_v = \frac{2\pi f}{pv} \quad n_v = \frac{60f}{pv}$$

$$k_{ov} = k_{yv} k_{pv}$$

### Обмотки машин переменного тока

**Обмотки** двухслойные: петлевые и волновые.

**Обмотки** однослойные: эвольвентная, «в развалку», «цепная», концентрическая.

## Лекция 2.2. ЭДС обмоток машин переменного тока

ЭДС машины создается обмоткой, в которой отдельные проводники соединяются в витки, витки – в катушки, катушки – в катушечные группы, а катушечные группы составляют фазную обмотку. ЭДС характеризуется величиной, частотой и формой кривой.

ЭДС проводника, движущегося в магнитном поле, или расположенного в движущемся поле

$$e_X = B_X \cdot l \cdot V,$$

где:  $B_X$  - индукция в некоторой точке воздушного зазора  $x$ ,  $l$ -длина

проводника,  $V$ -линейная скорость движения проводника в магнитном поле или поля относительно неподвижного проводника.

Действующее значение ЭДС при синусоидальном распределении индукции в воздушном зазоре (1-я гармоника ЭДС проводника)

$$E_{IP1} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} B_{CP1} \cdot l \cdot V = 1,11 B_{CP1} \cdot l \cdot V = 1,11 B_{CP1} \cdot l \cdot \frac{\pi D \cdot n}{2p} \cdot 2p = 2,22 \Phi_1 \cdot f_1,$$

ЭДС высших нечетных гармоник ЭДС (четные гармоники отсутствуют)

$$E_{IPv} = 2,22 \Phi_v \cdot f_v,$$

$$E_{IP} = E_{IP1} \sqrt{1 + \sum \left[ \frac{E_{IPv}}{E_{IP1}} \right]^2}$$

ЭДС витка с полным (диаметральным) шагом

ЭДС витка с укороченным шагом

$$E_{B1} = 2E_{IP1} \cdot \cos \frac{\pi - \pi \cdot \frac{y}{\tau}}{2} = 2E_{IP1} \sin \frac{\pi y}{2 \tau} = 2E_{IP1} \cdot k_{y1},$$

$$E_{Bv} = 2E_{IPv} \cdot k_{yv}$$

$$k_{y1} = \sin \frac{\pi y}{2 \tau}, \quad k_{yv} = \sin v \frac{\pi y}{2 \tau},$$

ЭДС катушки

$$E_{K1} = E_{B1} \cdot w_K, \quad E_{Kv} = E_{Bv} \cdot w_K$$

Коэффициент укорочения 1-ой гармоники обмоток с укороченным шагом меньше 1. Коэффициент укорочения высших гармоник значительно меньше коэффициента укорочения 1-ой гармоники. ЭДС двухслойных обмоток с укороченным шагом меньше, чем ЭДС обмоток с полным (диаметральным) шагом, но обмотки с укороченным шагом создают лучшую форму кривых ЭДС, подавляя высшие гармоники.

### Лекция 2.3. Электромагнитные процессы в трехфазной асинхронной машине при неподвижном роторе

Рассматриваются процессы в асинхронной машине:

- при неподвижном роторе,
- при вращающемся роторе,
- режимы работы,
- вращающие моменты и мощности,
- механические и рабочие характеристики.

При неподвижном роторе асинхронная машина является трансформатором

- с вращающимся (а не пульсирующим) магнитным потоком,
- с магнитной системой, содержащей воздушный зазор,
- с распределенными (а не сосредоточенными) обмотками статора и ротора,
- с различными числами фаз статора и ротора.

Схема замещения, векторная диаграмма и уравнения напряжений и токов не отличаются от обычного трансформатора

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1, \\ \dot{E}_2' &= \dot{I}_2' \cdot Z_2' + \dot{I}_2' \cdot Z_{н2}', \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0, \end{aligned}$$

где:  $\dot{U}_1$  – фазное напряжение, В,

$\dot{E}_1, \dot{E}_2'$  – ЭДС статора и приведенная ЭДС ротора, В

$\dot{I}_1, \dot{I}_2', \dot{I}_0$  – ток статора, приведенный ток ротора, ток холостого хода, А,

$Z_1, Z_2', Z_{н2}'$  – полное сопротивление обмотки статора, приведенное полное сопротивление ротора, приведенное сопротивление нагрузки, Ом,  
 $s$  – скольжение, о.е.

ЭДС обмоток, соответственно, равны

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.44 f_1 w_1 k_{o1} \Phi_1 \\ E_{2s} &= 4.44 f_2 w_2 k_{o2} \Phi_1 \end{aligned}$$

Коэффициент трансформации по ЭДС и приведенная ЭДС ротора

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}}$$

$$E_2' = k_e E_2 = E_1$$

Ток холостого хода и напряжение короткого замыкания такого трансформатора составляют  $I_0 = 20...50\% I_H$ ,  $U_k = 15...25\% U_H$

Уравнения МДС и токов с учетом коэффициента трансформации по току

$$\frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{o1}}{p} \dot{I}_1 + \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \frac{w_2 k_{o2}}{p} \dot{I}_2 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{o1}}{p} \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 / k_i$$

$$k_i = \frac{m_1 w_1 k_{o1}}{m_2 w_2 k_{o2}}$$

Приведенные сопротивления ротора  $r_2' = r_2 k_e k_i$   $x_2' = x_2 k_e k_i$

Основные режимы работы асинхронного двигателя при неподвижном заторможенном роторе:

- Индукционный регулятор,
- Сдвоенный индукционный регулятор,
- Фазорегулятор.

## Лекция 2.4. Электромагнитные процессы в трехфазной асинхронной машине при вращающемся роторе

### Уравнения ЭДС и МДС.

Асинхронная машина при вращающемся роторе – это универсальный трансформатор, который преобразует напряжение, ток, число фаз, частоту и род энергии.

Уравнение напряжений первичной обмотки (статора) такого трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 Z_1,$$

Частота ЭДС и ЭДС вращающегося ротора

$$f_2 = p(n_1 - n) = \frac{p \cdot (n_1 - n) \cdot n_1}{n_1} = f_1 s$$

$$E_{2s} = 4.44 f_2 w_2 k_{o2} \Phi_1 = 4.44 f_1 s w_2 k_{o2} \Phi_1 = E_2 s$$

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = s x_2$$

$$r_{2s} \approx r_2$$

Аналогично и для приведенных величин

$$E'_{2s} = s E'_2 \quad r'_{2s} = r'_2 \quad x'_{2s} = s x'_2$$

ЭДС рассеяния ротора

$$E'_{\sigma 2s} = -j I'_2 x'_{2s} = -j I'_2 x'_2 \cdot s = E'_{\sigma 2} s$$

Уравнение э.д.с. ротора:

$$E'_{2s} + E'_{\sigma 2s} = I'_2 r'_2$$

$$E'_{2s} = j I'_2 x'_{2s} + I'_2 r'_2$$

$$E'_{2s} = I'_2 Z'_{2s},$$

где

$$Z'_{2s} = r'_2 + j x'_{2s}$$

Скорость вращения МДС ротора относительно ротора  $n_2 = \frac{f_2}{p}$ , а

относительно неподвижного статора

$$n_2 + n = \frac{f_2}{p} + n_1(1-s) = \frac{f_1 s}{p} + \frac{f_1(1-s)}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1$$

Т.е. основная гармоника м.д.с. ротора вращается в пространстве с той же скоростью и в том же направлении, что и м.д.с. статора и они неподвижны друг относительно друга

Неподвижные друг относительно друга МДС  $F_1$  и  $F_2$  создают общую вращающуюся волну м.д.с.  $F_0$

$$F_1 + F_2 = F_0$$

$$I_1 + I_2' = I_0$$

Скорость вращения МДС ротора складывается из скорости вращения самого ротора  $n$  и скорости вращения МДС относительно ротора  $n_2$ . В генераторном режиме  $n_2$  имеет отрицательное значение, т.е. МДС ротора вращается навстречу вращению ротора.

$$I_2 = \frac{E_2 s}{r_2 + jx_2 s} = \frac{E_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2}$$

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + r_2 \frac{1-s}{s}$$

При этом неизменными остаются величины: угла  $\psi_2$ , токов  $I_1$  и  $I_2$  и мощности.

Мощность, выделяемая в добавочном сопротивлении  $r_2 \frac{1-s}{s}$  при протекании тока  $I_2$ , представляет собой механическую мощность. Это позволяет анализировать вместо вращающегося ротора – неподвижный с добавочным сопротивлением  $r_2 \frac{1-s}{s}$ , потребляемая которым мощность равна механической мощности, развиваемой вращающимся ротором.



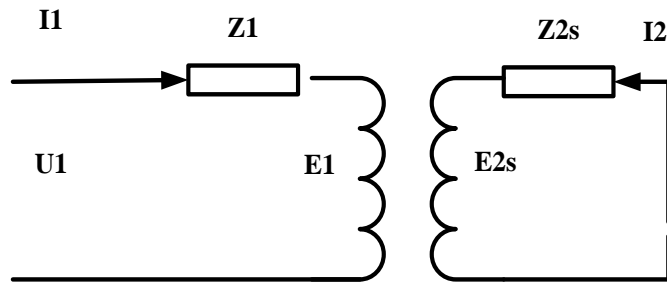


Рис. 2.2. Действительная физически существующая схема замещения асинхронной машины

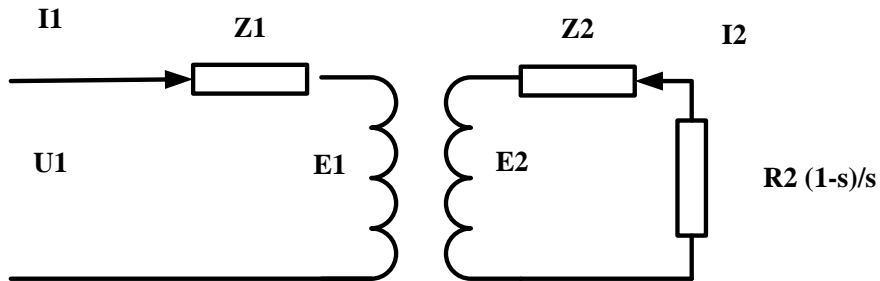


Рис.2.3.Схема замещения асинхронной машины приведенная к неподвижному ротору.

$$E'_2 = E_2 k_e \quad I'_2 = I_2 \frac{1}{k_i} \quad r'_2 = r_2 k_e k_i \quad x'_2 = x_2 k_e k_i$$

✓ **Г-образная схема замещения**, рис.2.5. Параметры Г-образной схемы замещения:

ток главной цепи  $-I'_2 = I_1 - I_0$ ,

ток статора, одинаковый для Г-образной и Т-образной схем,

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z'_{2s} Z_0}{Z'_{2s} + Z_0}}$$

ток намагничивающего контура

$$I_0 = \frac{U_1}{Z_1 + Z_0} = \frac{U_1}{sZ_0} = \frac{U_1}{Z_0 //}$$

$$\sigma_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0}$$

$$\dot{I}_2^{//} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 \sigma_1 + Z_2' \sigma_1} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1^{//} + Z_2^{//}}$$

Параметры Г-образной схемы замещения

$$Z_0^{//} = Z_0 \sigma_1, \quad Z_1^{//} = Z_1 \sigma_1, \quad Z_2^{//} = Z_2' \sigma_1, \quad R_2^{//} \frac{1-s}{s} = r_2' \sigma_1 \frac{1-s}{s}$$

Коэффициент  $\sigma_1$  изменяет параметры главной и намагничивающей цепей и токи по величине и по фазе и не зависит от скольжения.

В приближенных расчетах пренебрегают величиной  $\frac{r_1}{x_0}$  и считают

$$\sigma_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_0}, \text{ что составляет } \sigma_1 \approx 1.04 - 1.08.$$

В приближенной Г-образной схеме замещения вместо комплексного коэффициента  $\sigma_1$  используют  $\sigma_1$  - вещественный, а в отдельных случаях не учитывают коэффициент  $\sigma_1$ , полагая  $\sigma_1 = 1$

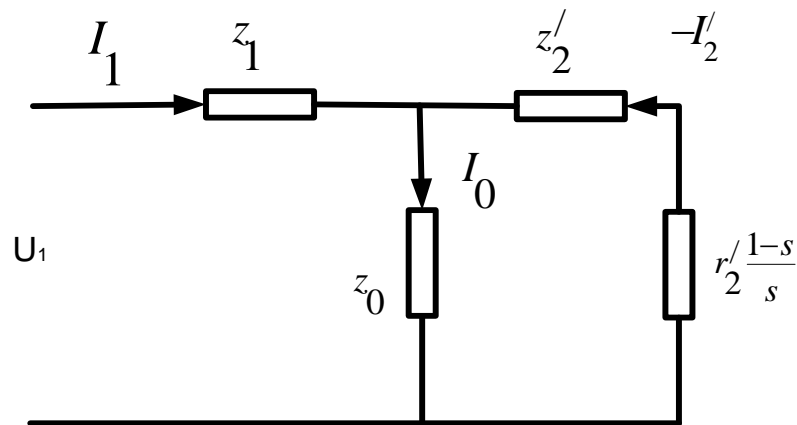


Рис.2.4.Схема замещения асинхронной машины как трансформатора

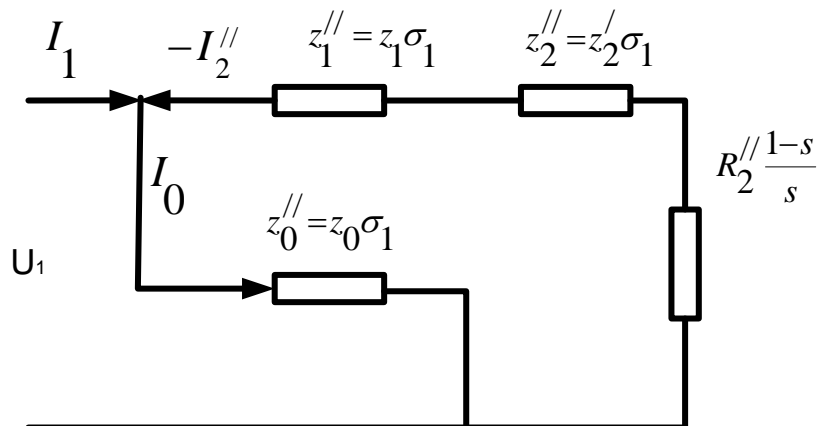


Рис.2.5. Г-образная схема замещения асинхронной машины

## Лекция 2.5. Режимы работы асинхронной машины

Двигательный режим, генераторный режим, режим электромагнитного тормоза.

- **Двигательный режим.** Уравнения. Схема замещения. Векторная диаграмма. Диаграмма преобразования мощности. Потери и КПД

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1,$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \cdot Z'_2 + \dot{I}'_2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1-s}{s},$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0,$$

$\dot{I}_1, \dot{I}'_2, \dot{I}_0$  – ток статора, приведенный ток ротора и ток холостого хода (ток намагничивающего контура),

где:  $\dot{U}_1$  – фазное напряжение, В,

$\dot{E}_1, \dot{E}'_2$  – ЭДС статора и приведенная ЭДС ротора,

$Z_1, Z'_2, R'_2$  – полные комплексные сопротивления статора и ротора, активное сопротивление ротора, Ом,

$s$  – скольжение, о.е.

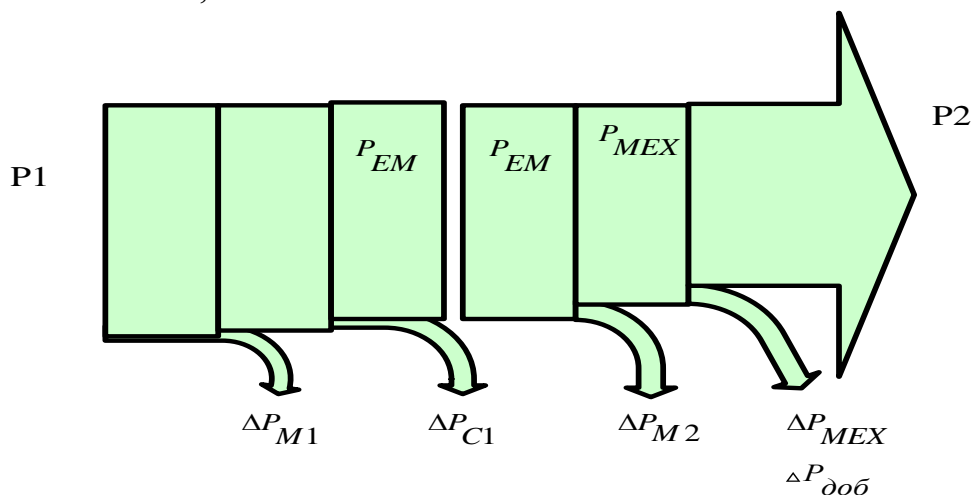


Рис.2.6. Диаграмма преобразования мощности в двигателе

На основании диаграммы преобразования мощности легко устанавливаются соотношения между подведенной и полезной мощностью, КПД, а также соотношение между электромагнитной и механической мощностью

$$\Delta P_{M2} = P_{ЭМ} - P_{МEX} = M \omega_1 - M \omega = M \omega_1 s$$

• **Генераторный режим.** Для перевода работающего асинхронного двигателя в генераторный режим вначале при постоянном напряжении и частоте питающего напряжения разгружают двигатель, снижая момент нагрузки на валу до 0. Ток  $I_1$  уменьшается до величины тока холостого хода, а вектор тока совмещается с током холостого хода  $I_1 = I_0$ . Затем с помощью приводного двигателя ускоряют ротор так, что  $n > n_1$ . Магнитный поток и ток холостого хода не изменяются. Это режим идеального холостого хода. Мощность для покрытия потерь  $\Delta P_{M1}$  и  $\Delta P_{C1}$  поступает из сети, для покрытия механических и добавочных потерь  $\Delta P_{MECH}$  поступает от первичного двигателя.

После этого ротор ускоряют до  $n > n_1$  и скольжение становится отрицательным. Магнитный поток и ток холостого хода при не изменяются. Это генераторный режим. Изменяется направление вращения ротора относительно основного магнитного потока. Изменяется знак ЭДС  $E_{2s}$

Если ток ротора в двигательном режиме разложить по осям и принять, что обе его составляющие имеют положительные значения, то при переходе в генераторный режим при отрицательном скольжении активная составляющая меняет знак:

$$I_{2a} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} \cdot \cos \psi = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} \cdot \frac{r_2}{Z_{2s}} < 0 \quad I_{2p} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} \cdot \sin \psi = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} \cdot \frac{x_{2s}}{Z_{2s}} > 0$$

а вектор тока ротора смещается из 3-го квадранта во 2-ой. С учетом этого векторная диаграмма генератора имеет вид рис. 2.7.

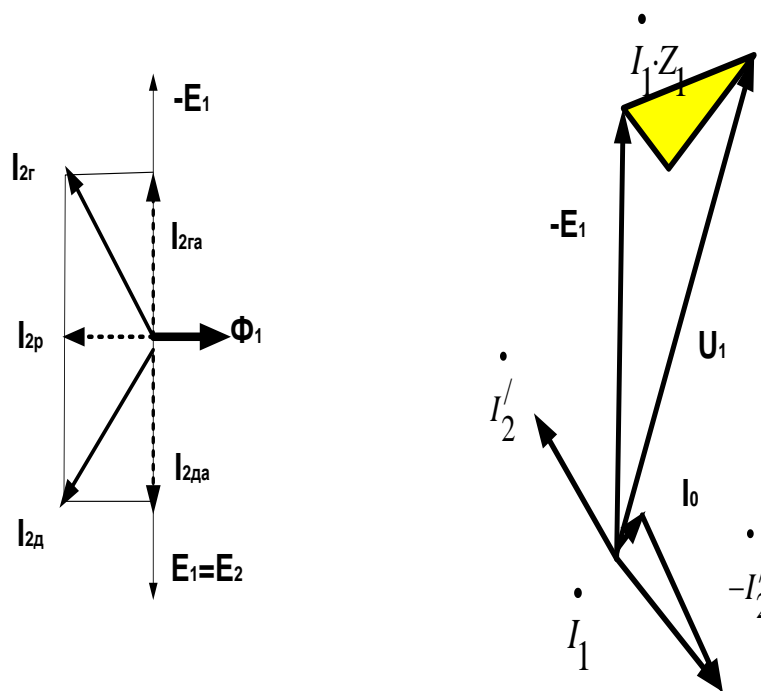


Рис.2.7. Векторная диаграмма асинхронного генератора

## Лекция 2.6. Вращающий момент, механические и рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Уравнение моментов асинхронного двигателя в установившемся режиме:

$$M = M_0 + M_C$$

где:  $M = \frac{\Delta P_{M2}}{\omega_1 s}$  - электромагнитный момент, развиваемый двигателем,

$M_0 = \frac{\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}}{\omega}$  - момент потерь холостого хода,

$M_C = \frac{P_2}{\omega}$  - момент нагрузки на валу двигателя,

$P_{\text{мех}} = M \omega$  - механическая мощность,

$P_{\text{эм}} = M \omega_1$  - электромагнитная мощность

Потери в обмотке ротора

$$\Delta P_{M2} = P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = M(\omega_1 - \omega) \frac{\omega_1}{\omega_1} = M \omega_1 s$$

### • Вращающий момент и механическая характеристика

На основании Г-образной схемы замещения асинхронной машины и соотношений потерь в обмотке ротора

$$\Delta P_{M2} = M \omega_1 s, \quad \Delta P_{M2} = m_1 I_2'^2 r_2' = m_1 I_2'^2 R_2'$$

и тока ротора

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad \omega_1 = 2\pi \frac{f_1}{p}$$

определяется зависимость вращающего электромагнитного момента от скольжения и частоты вращения

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_1 \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( X_1 + X_2' \right)^2 \right]}$$

Эта зависимость представляет собой механическую характеристику двигателя. Она приведена на рис.2.8. На графике видны характерные точки: критический (максимальный или опрокидывающий) момент и скольжение, пусковой момент и скольжение, точка холостого хода, номинальная точка соответствующая номинальному моменту и скольжению (номинальной частоте вращения).

Критический (максимальный или опрокидывающий) момент и скольжение  $s_k$  определяются из условия  $\frac{dM}{ds}=0$

$$s_k = \pm \frac{R_2''}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \approx \pm \frac{R_2''}{X_k}$$

$$M_k = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]} \approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 [\pm R_1 + X_k]}$$

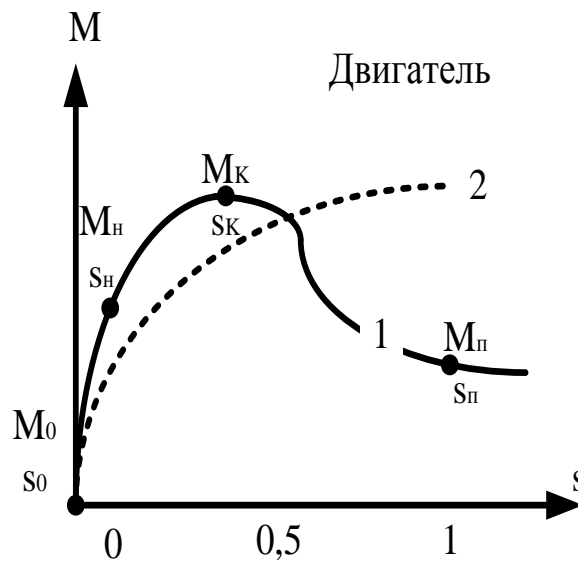
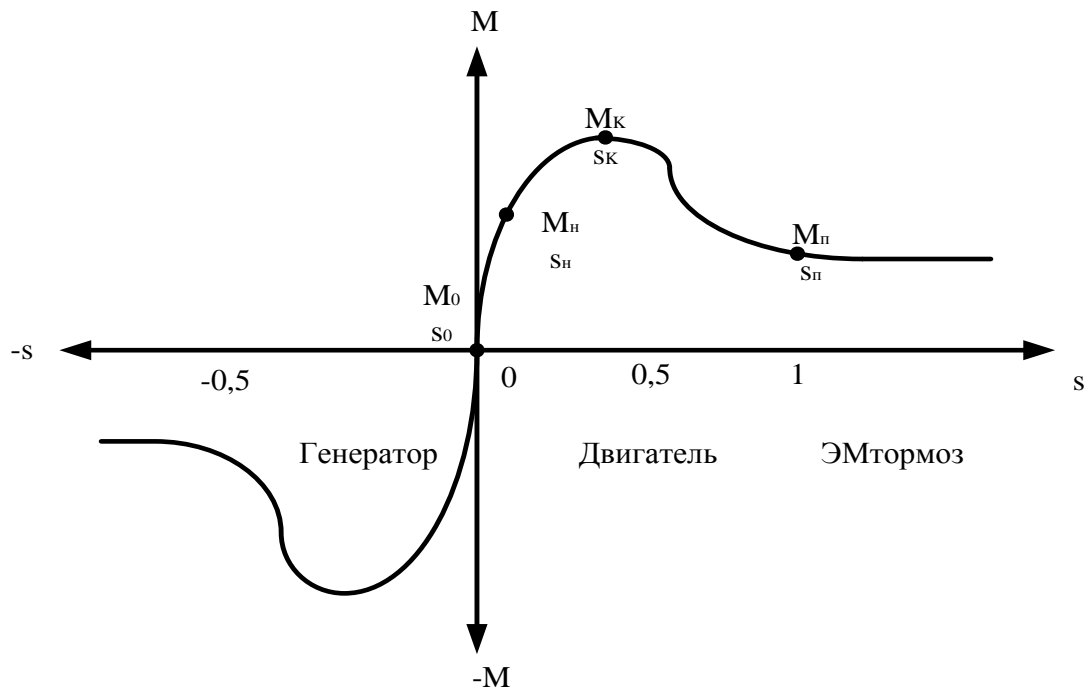


Рис. 2.8. Механические характеристики асинхронной машины

Выводы:  $M_k \cong U_1^2$ ,  $M_k \neq f(R_2'')$ ,  $s_k \cong \frac{R_2''}{X_k}$ ,  $M_k \cong \frac{1}{X_k}$   $k_M = \frac{M_k}{M_H}$

Пусковой момент при скольжении  $s=1$

$$M_{II} = \frac{m_1 U_1^2 R_2''}{\omega_1 [R_k^2 + X_k^2]}$$

$$M_{II} \cong R_2'' = R_{2p}'' + R_{2доб}''$$

Из условия максимума пускового момента  $\frac{dM_S}{dR_2''} = 0$  полное сопротивление

цепи ротора должна быть  $R_2'' = \sqrt{R_1^2 + X_k^2}$

Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях  $R_2''$

Расчет механических характеристик по номинальным данным

**Формула Клосса** представляет собой выражение механической характеристики асинхронного двигателя в относительных единицах.

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2''} s_k \right)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \frac{R_1}{R_2''} s_k} \quad \text{или} \quad \frac{M}{M_k} \approx \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

**Рабочие характеристики** – это зависимости КПД,  $\cos \varphi$ , скольжения, вращающего момента от мощности на валу двигателя

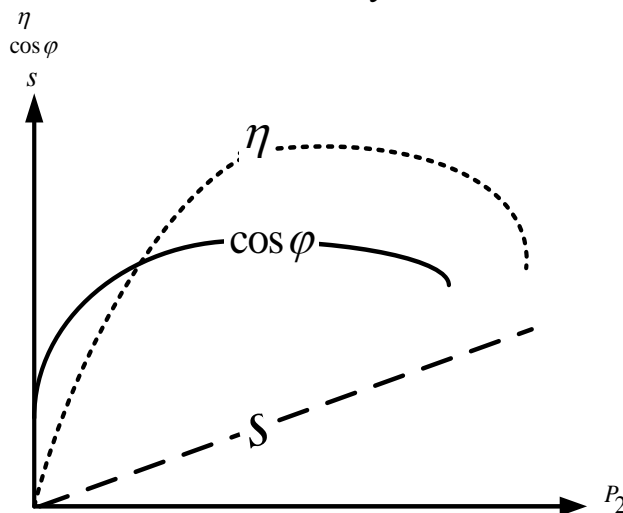


Рис. 2.9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

## Лекция 2.7. Пуск асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель характеризуется большим пусковым током и малым пусковым моментом. При пуске при скольжении  $s=1$  ток ротора, вращающий момент и  $\cos\psi_{2\Pi}$  соответственно равны:

$$I_2'' = \frac{E_2''}{\frac{R_2''}{s} + jX_2''}$$

$$M_{\Pi} = k \cdot \Phi_1 \cdot I_{2\Pi} \cos\psi_{2\Pi}$$

$$\cos\psi_{2\Pi} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_2 \cdot s)^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_2)^2}}$$

### Пуск короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Возможен прямой пуск или пуск при пониженном напряжении (реакторный, автотрансформаторный, пуск с переключением обмоток с треугольника в звезду), а также частотный пуск двигателя при питании его от автономного преобразователя частоты.

При включении асинхронного двигателя пусковой ток намного превышает номинальный  $I_{\Pi} = (5-7)I_N$ , а пусковой момент невелик  $M_{\Pi} = (0,8-1,2)M_N$

**Прямой пуск** возможен при выполнении условий:

$$I_{\Pi} < I_{\text{СДОП}} \text{ и } M_{\Pi} > M_C$$

Пуск при пониженном напряжении следует применять, если  $I_{\text{СДОП}} < I_{\Pi}$ .

Коэффициент снижения напряжения  $K = \frac{I_{\text{СДОП}}}{I_{\Pi}} = \frac{I'_{\Pi}}{I_{\Pi}}$ , где  $K < 1$ .

### Реакторный пуск

$$U_1' = K \cdot U_1 \quad M_{\Pi} \equiv U_1^2 \quad M'_{\Pi} = M_{\Pi} \cdot K^2 \quad I'_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot K$$

После окончания пуска пусковой реактор закорачивается.

**Автотрансформаторный пуск** при применении автотрансформатора с коэффициентом трансформации

$$K_A = \frac{U_{1A}}{U_{2A}} \quad I'_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot K = I_{\Pi} \cdot \frac{1}{K_A^2} = I_{\text{СДОП}} \quad I'_{\Pi} = K \cdot I_{\Pi} \quad M'_{\Pi} = K \cdot M_{\Pi}$$

После окончания пуска пусковой автотрансформатор выводится

**Пуск с переключением с треугольника на звезду** возможен, если двигатель нормально работает при соединении в треугольник. Фазное напряжение при



переключении на звезду снижается в  $\sqrt{3}$  раз, а сопротивление увеличивается в  $\sqrt{3}$  раз:  $U_{\phi Y} = U_{\phi \Delta} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad z_{\phi Y} = z_{\phi \Delta} \sqrt{3},$

$$\frac{I_{ПY}}{I_{П\Delta}} = \frac{1}{3}, \quad \frac{M_{ПY}}{M_{П\Delta}} = \frac{U_{1Y}^2}{U_{1\Delta}^2} = \frac{1}{3}$$

**Частотный пуск** с плавным повышением частоты и напряжения может быть выполнен при включении двигателя через статический или электромашинный преобразователь частоты

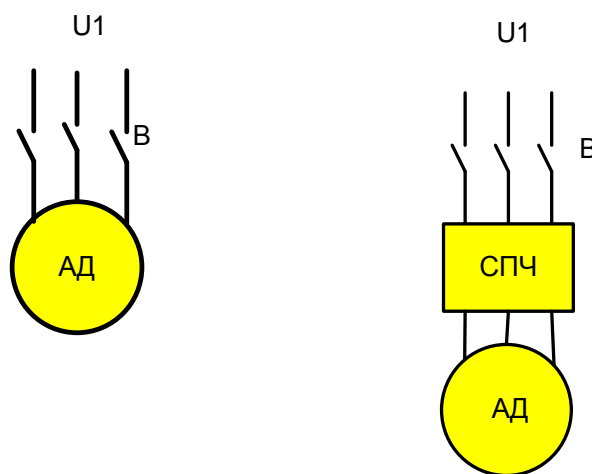


Рис.2.10. Прямой и частотный пуск асинхронного двигателя

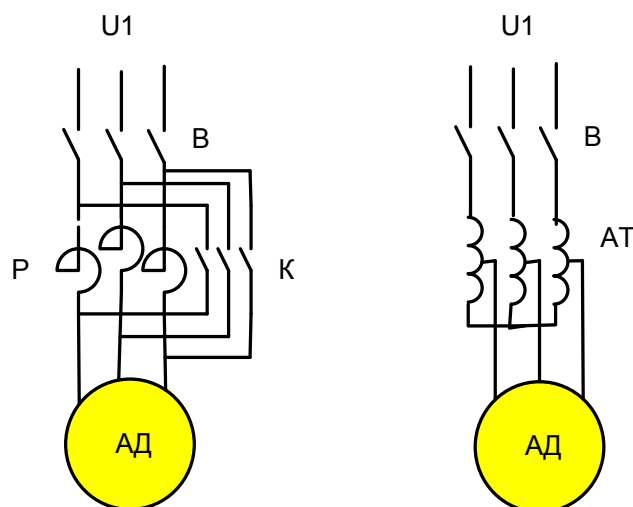


Рис.2.11. Пуск асинхронного двигателя при пониженном напряжении (реакторный и автотрансформаторный)

## Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Для уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором включают пусковой реостат, состоящий из нескольких ступеней сопротивления. Схема включения реостата аналогична включению регулировочного реостата. Сопротивления ступеней пускового реостата и момент их переключения должны обеспечить поддержание пускового момента в процессе разгона в некоторых пределах от максимального до минимального значения.

Для расчета используется упрощенная формула Клосса

$$\frac{M}{M_K} \approx \frac{2}{\frac{s_K + s}{s} \frac{s}{s_K}}$$

Откуда путем решения квадратного уравнения по известным величинам критического скольжения, критического и текущего значения моментов определяется скольжение

$$s = s_K \left( \frac{M_K}{M} \pm \sqrt{\left( \frac{M_K}{M} \right)^2 - 1} \right)$$

и зависимость критического скольжения от сопротивления

$$s_K = \pm \frac{R_2''}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \approx \pm \frac{R_2''}{X_K}$$

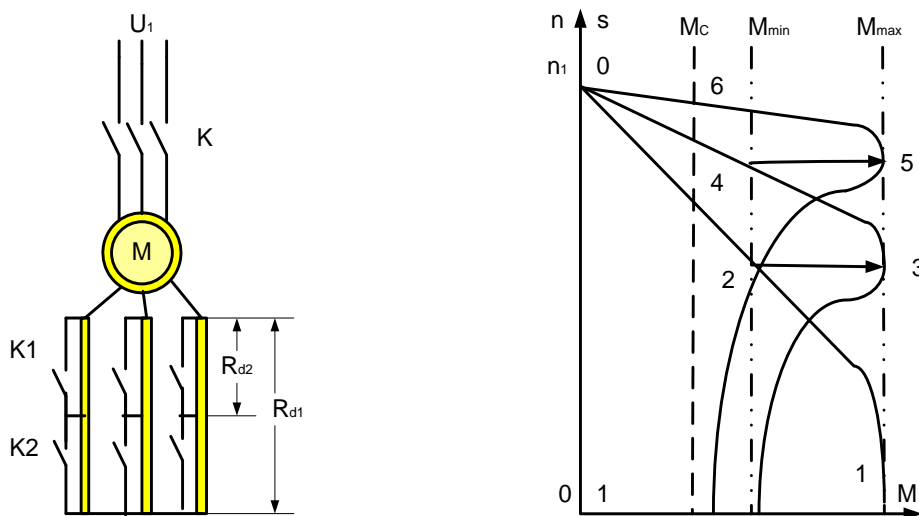


Рис.2.12. Схема включения реостата в цепь ротора и пусковые характеристики при реостатном пуске

Максимальный пусковой момент (точка 1) при неподвижном роторе при скольжении  $s_{K1} = 1$  равен критическому моменту. Он может быть получен, если в цепь ротора ввести добавочное сопротивление

$$R'_{d1} = \sqrt{R_1^2 + X_K^2} - R_2'.$$

При разгоне двигателя с этим сопротивлением в цепи ротора до скольжения  $s_2$  (точка 2) пусковой ток падает, а пусковой момент снижается до минимального значения  $M_{\min}$ . Затем закорачивается первая ступень пускового реостата при скольжении

$$s_2 = s_{K1} \left( \frac{M_K}{M_{\min}} \pm \sqrt{\left( \frac{M_K}{M_{\min}} \right)^2 - 1} \right)$$

После закорачивания 1 ступени вращающий момент опять достигает максимального значения (точка 3). Этому соответствует критическое скольжение на новой механической характеристике

$$s_{K3} = s_2 = \left( \frac{M_K}{M_{\min}} - \sqrt{\left( \frac{M_K}{M_{\min}} \right)^2 - 1} \right)$$

и добавочное сопротивление в цепи ротора

$$R'_{d2} \cong s_{K3} \cdot \sqrt{R_1^2 + X_K^2} - R_2'.$$

При разгоне двигателя с этим сопротивлением в цепи ротора до скольжения  $s_4$  (точка 4) пусковой ток опять падает, а пусковой момент снижается до минимального значения  $M_{\min}$ . Затем закорачивают вторую ступень пускового реостата при скольжении

$$s_4 = s_{K3} \left( \frac{M_K}{M_{\min}} \pm \sqrt{\left( \frac{M_K}{M_{\min}} \right)^2 - 1} \right)$$

и добавочное сопротивление в цепи ротора

$$R'_{d2} \cong s_{K3} \cdot \sqrt{R_1^2 + X_K^2} - R_2'.$$

Если скольжение равно критическому скольжению естественной механической характеристики  $s_4 = s_K$ , то эта ступень реостата последняя. Далее разгон продолжается по естественной характеристике до точки 6, соответствующей моменту нагрузки на валу  $M_C$ .

## Лекция 2.8. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Регулирование возможно: изменением числа полюсов, изменением частоты подведенного напряжения и изменением скольжения.

$$n = n_1(1-s) = \frac{f_1}{p}(1-s)$$

**Регулирование изменением числа полюсов** осуществляется в специальных многоскоростных (двух-, трех-, четырехскоростных) асинхронных двигателях, которые могут быть выполнены однообмоточными и двухобмоточными. Принцип переключения числа полюсов поясняется рисунками

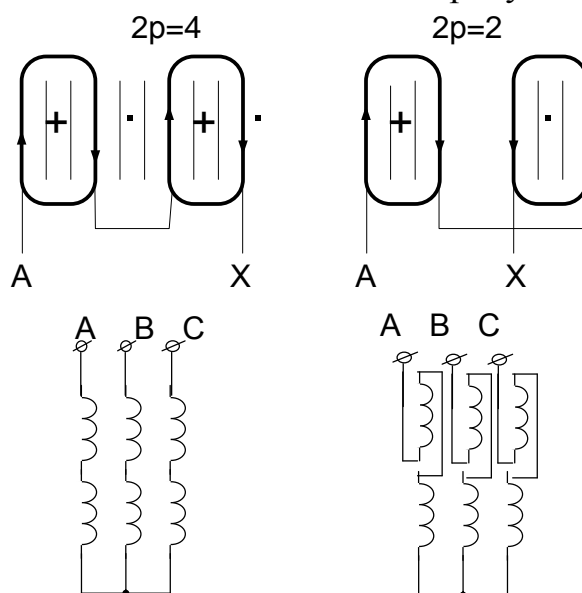


Рис.2.13. Переключение полюсов в схеме Y-Y при постоянной мощности.

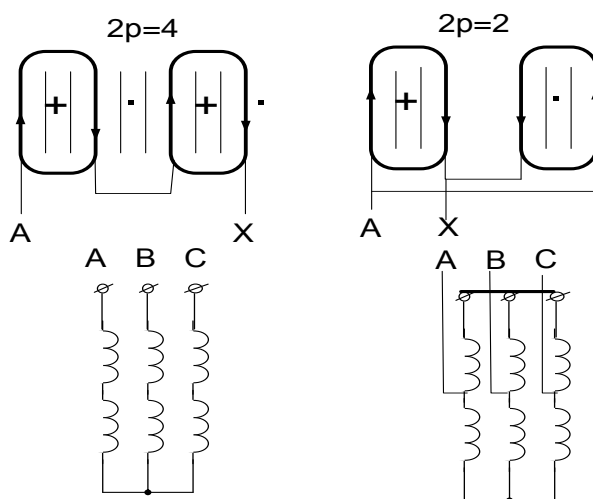


Рис. 2.14.Переключение полюсов в схеме Y-YU при постоянном моменте.

При переключении числа полюсов изменяется также напряжение  $U_{\Phi_1}$ , число витков  $W_1$ , величины электромагнитных нагрузок (индукция  $B$ , ток  $I$ , и обмоточные коэффициенты). Вращающий момент асинхронного двигателя при переключении полюсов изменяется пропорционально индукции

$$\frac{M_1}{M_2} \cong \frac{B_1}{B_2}$$

На основании выражения

$$E = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{01} \cdot \Phi_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{01} \cdot B \cdot \frac{\pi D}{2p} \cdot l$$

получаем

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1 \cdot B_1 \cdot p_2}{w_2 \cdot B_2 \cdot p_1},$$

откуда

$$\frac{M_1}{M_2} \cong \frac{B_1}{B_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{w_2}{w_1}.$$

В схеме  $Y-Y$  с переключением полюсов, например,  $2p_1 = 4$ ,  $2p_2 = 2$  переключение осуществляется при постоянной мощности (крановая нагрузка – механизм подъема)

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2}{1} \cdot \frac{1}{1} = 2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{M_1 \cdot \omega_1}{M_2 \cdot \omega_2} = 2 \cdot \frac{1}{2} = 1 \quad \text{или} \quad P_1 = P_2 = const$$

В схеме  $Y-Y\bar{Y}$  – переключение осуществляется при постоянном моменте нагрузки (механизм передвижения транспортного средства, крана)

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{1} \cdot \frac{1}{1} = 1 \quad \text{или} \quad M_1 = M_2 = const$$

Механические характеристики двухскоростного двигателя при переключении полюсов при постоянной мощности и при постоянном моменте приведены на рис.2.15.

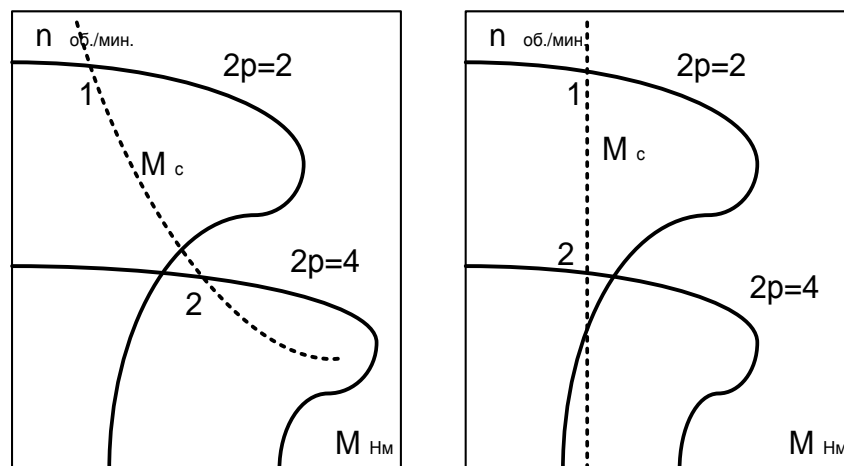


Рис. 2.15. Механические характеристики двухскоростного двигателя при переключении полюсов при постоянной мощности и при постоянном моменте.

### Регулирование изменением частоты подведенного напряжения.

При регулировании изменением частоты  $f_1$  для получения наилучших технико-экономических показателей асинхронного двигателя напряжение регулируется по закону Костенко:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \times \sqrt{\frac{M_1}{M_H}},$$

при котором поддерживается постоянным магнитный поток асинхронного двигателя, и остаются постоянными высокие энергоэкономические показатели двигателя (КПД и  $\cos$ ).

При постоянном моменте  $M = const$  этот закон принимает вид

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \quad \text{или} \quad \frac{U_1}{f_1} = const.$$

При постоянной мощности  $P = const$  закон регулирования напряжения  $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$

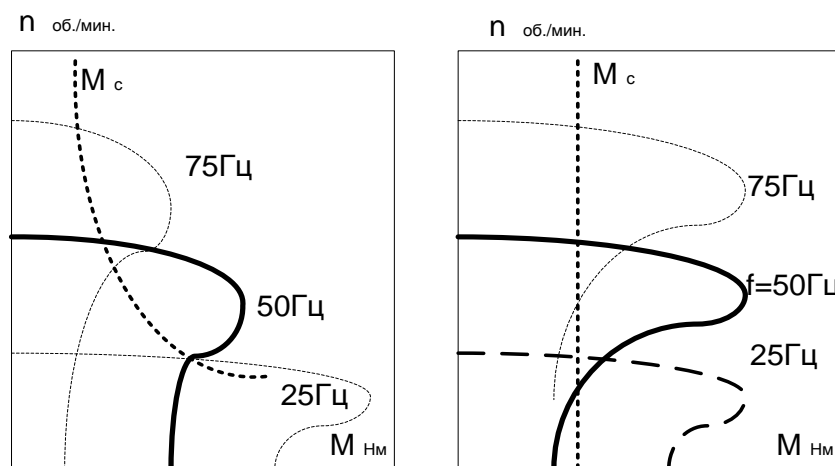


Рис.2.16. Механические характеристики двигателя при частотном регулировании при постоянной мощности и при постоянном моменте.

**Регулирование изменением скольжения** возможно изменением сопротивления цепи ротора или изменением подводимого напряжения, при котором изменяется наклон механических характеристик двигателя. Скольжение изменяется обратно пропорционально квадрату напряжения.

При регулировании изменением подведенного напряжения скольжение изменяется обратно пропорционально квадрату напряжения

$$s' = \frac{s}{u_*^2},$$

где

$$u_* = \frac{U_1}{U_{1H}}$$

При регулировании изменением активного сопротивления в цепи ротора при постоянном моменте

$$s = \frac{\Delta P_{M2}}{P_{ЭМ}} = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot (R_2' + R_{\partial}')}{M_{ЭМ} \cdot \omega_1} \equiv R_2' + R_{\partial}'.$$

Таким образом, скольжение изменяется пропорционально сопротивлению цепи ротора  $s \equiv R_2' + R_{\partial}'$  и в таком же соотношении с увеличением скольжения возрастают потери  $\Delta P_{M2} \equiv R_2' + R_{\partial}'$

скольжение и снижение частоты вращения пропорционально сопротивлению в цепи ротора. Пропорционально снижению скорости (увеличению скольжения) возрастают потери и снижается КПД. Диапазон регулирования зависит от нагрузки на валу. Скорость холостого хода двигателя (при  $M=0$ ) не регулируется.

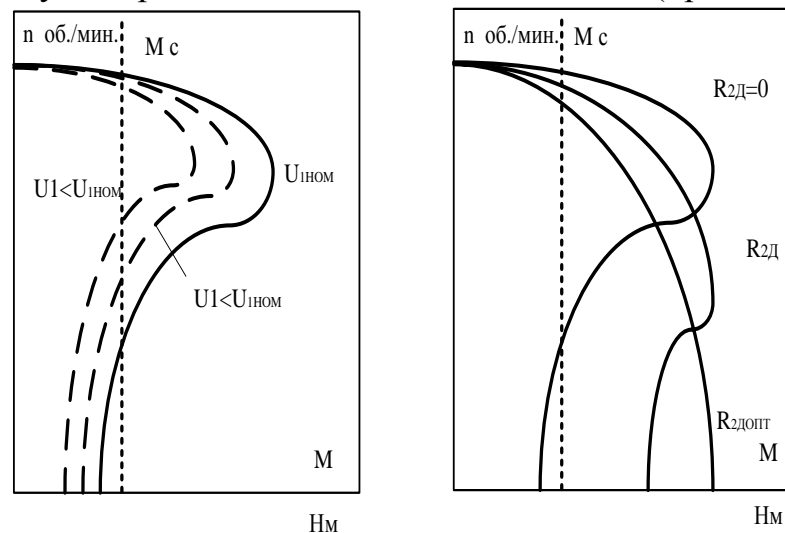


Рис.2.17. Механические характеристики двигателя при регулировании изменением скольжения

### Характеристика способов регулирования частоты вращения

Регулирование изменением числа полюсов и изменением частоты питающего напряжения осуществляется без потерь - экономично.

Регулирование изменением скольжения сопровождается увеличением потерь. Чем больше скольжение, тем больше потери. Частота вращения холостого хода не регулируется, диапазон регулирования зависит от нагрузки, возможна неустойчивая работа, регулирование - вниз от номинальной частоты.

Регулирование изменением числа полюсов – ступенчатое (2,3,4 ступени), может осуществляться только в специальных многоскоростных двигателях.

Регулирование изменением частоты питающего напряжения – плавное, в широком диапазоне, особенно совместно с системой автоматического регулирования, вверх и вниз от номинальной частоты. Источник питания регулируемый СПЧ – дорогое устройство.

### Лекция 3.1. Синхронные машины. Устройство и принцип действия. Возбуждение

Режимы работы: режим синхронного генератора, режим синхронного двигателя и режим синхронного компенсатора. Основное применение: синхронные генераторы электрических станций, крупные синхронные двигатели промышленных потребителей и синхронные компенсаторы крупных подстанций энергосистемы.

Явнополюсные и неявнополюсные конструкции синхронных машин. Неявнополюсный синхронный генератор – турбогенератор (неявнополюсный ротор)  $n=n_1=3000\text{об/мин}$ ;  $\omega=\omega_1=314\text{рад/с}$ .

Явнополюсный синхронный генератор (гидрогенератор, дизель-генератор)  $n=n_1 \leq 1500\text{об/мин}$  и  $\omega=\omega_1 \leq 157\text{рад/с}$

Турбогенераторы и гидрогенераторы.

Генераторы гидроаккумулирующих электростанций.

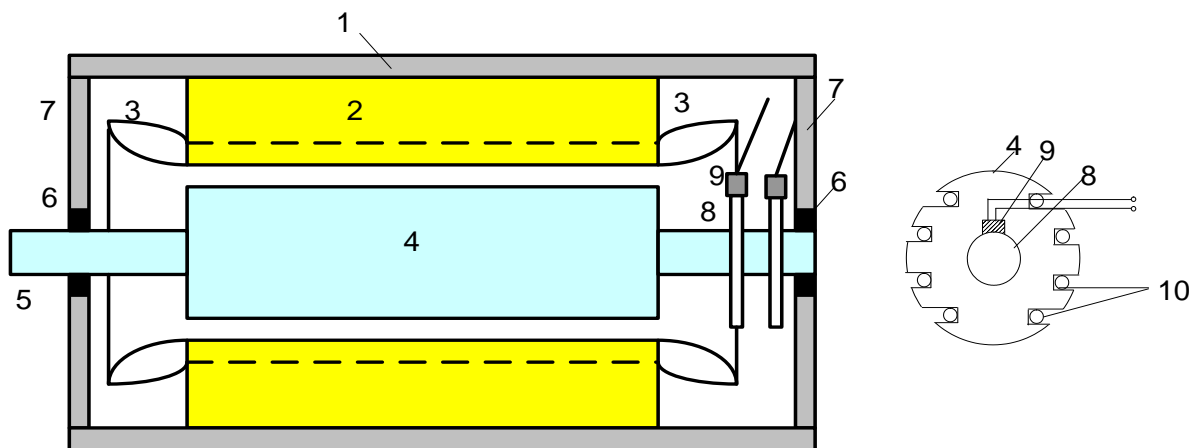


Рис. 3.1. Конструкция турбогенератора и неявнополюсного ротора: 1- корпус, 2- шихтованный магнитопровод статора, 3-трехфазная силовая обмотка статора (якоря), 4-неявнополюсный кованый ротор турбогенератора с обмоткой возбуждения постоянного тока 10 (обмотанная часть ротора, зубцы и пазы ротора, большой зубец ротора), 5-вал ротора, 6-подшипники, установленные в подшипниковых щитах 7, 8- контактные кольца ротора, 9-электрические щетки, другие элементы: возбудитель, бандажные кольца ротора, крепление обмотки статора, коробка выводов, лапы или фланец для крепления машины, успокоительная обмотка (стержни, короткозамыкающие кольца), система охлаждения



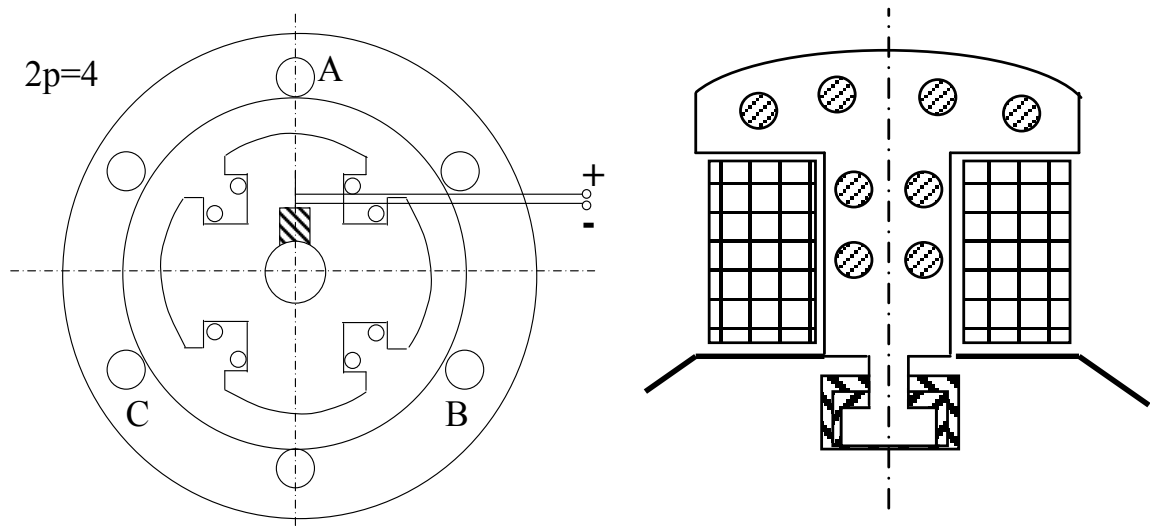


Рис. 3.2. Конструкция явнополюсного ротора (шихтованный полюсный сердечник с полюсным наконечником и Т-образным хвостовиком), обмотка возбуждения, успокоительная обмотка, стяжные шпильки, обод ротора

Рабочий процесс в синхронном генераторе при возбуждении вращающегося ротора постоянным током возбуждения:  $F_{\text{в}} \rightarrow \Phi_{\text{в}} \rightarrow E_1 \rightarrow I_1 \rightarrow F_1 \rightarrow \Phi_a$ .

МДС обмотки возбуждения на 1 полюс  $F_{\text{в}} = \frac{I_{\text{в}} \cdot w_{\text{в}}}{2}$

МДС трехфазной обмотки якоря (вращающаяся МДС реакции якоря)

$$F_1 = \frac{3 \cdot 2 \sqrt{2}}{2 \pi} \frac{w_1 k_{01}}{p} \cdot I_1 \cdot \sin(\omega t \pm \alpha)$$

Частота вращения ротора (индуктора) и частота вращения поля

$$n = n_1 = \frac{60 f_1}{p}; \quad \omega = \omega_1 = 2\pi \frac{f_1}{p}$$

ЭДС обмотки якоря от вращающегося магнитного поля  $E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{01} \Phi_1$ ,

где:  $\frac{w}{2}$  - число витков ОВ на полюс,  $w_{\text{в}}$  - число витков на пару полюсов.

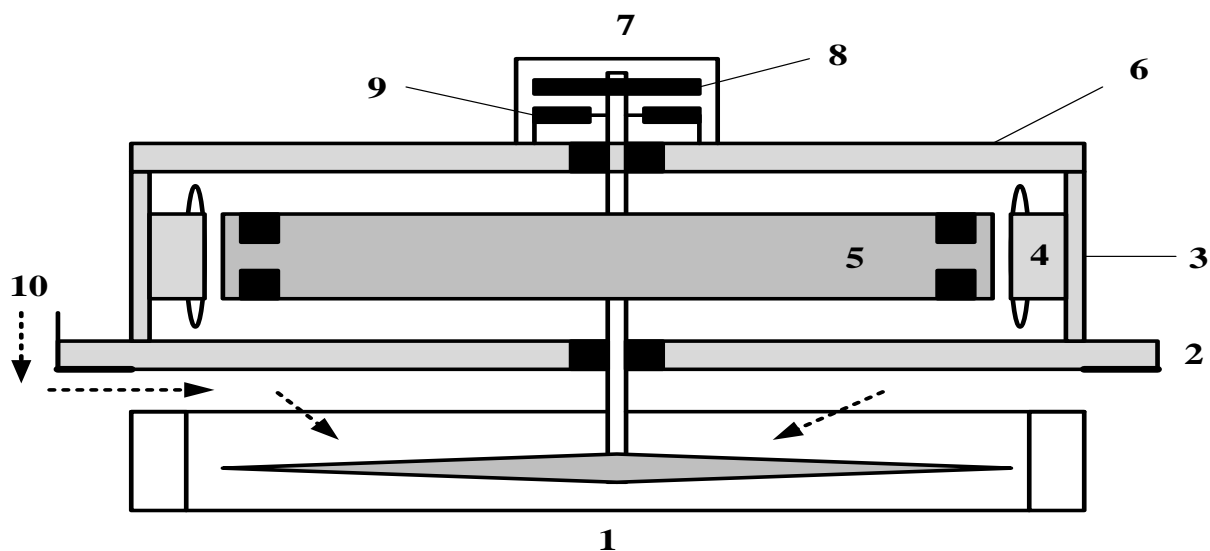


Рис. 3.3. Конструктивная схема гидроагрегата с реактивной гидротурбиной и синхронным гидрогенератором: 1 – гидротурбина, 2 – нижняя крестовина гидрогенератора с нижним направляющим подшипником, 3 – корпус гидрогенератора, 4 – статор гидрогенератора с трехфазной обмоткой якоря, 5 – ротор (индуктор) гидрогенератора с обмоткой возбуждения постоянного тока и контактными кольцами, 6 – верхняя крестовина гидрогенератора с верхним направляющим подшипником, 7 – корпус подпятника турбогенератора с масляной ванной и системой охлаждения масла, 8 – опорная пята, укрепленная на валу, 9 – подпятник, 10 – направляющий аппарат гидротурбины и рабочий поток воды.

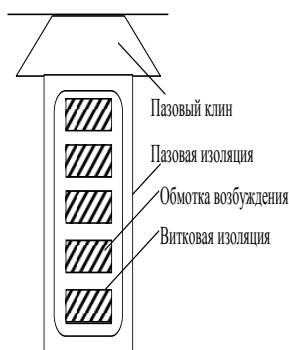


Рис. 3.4. Заполнение паза статора и ротора

**Охлаждение:** при мощности до 30 МВА применяется замкнутая система косвенного воздушного охлаждения,  
до 150 МВА - замкнутая система косвенного водородного охлаждения с избыточным давлением 0,05 атм,  
до 300 МВА- замкнутая система косвенного водородного охлаждения с избыточным давлением 3-5 атм,  
до 500 МВА- замкнутая система косвенного водородного охлаждения с избыточным давлением 3-5 атм с непосредственным внутренним охлаждением проводников статора водой или водородом,  
более 500 МВА - замкнутая система косвенного водородного охлаждения с избыточным давлением 3-5 атм с непосредственным внутренним охлаждением проводников статора и ротора водой или водородом.

## Возбуждение синхронных машин

Функции системы возбуждения: питание обмотки возбуждения постоянным током, регулирование тока возбуждения и напряжения на якоре генератора или реактивной мощности, автоматическая форсировка возбуждения АФВ при удаленных коротких замыканиях и снижении напряжения на зажимах генератора, автоматическое гашение поля АГП при внутренних коротких замыканиях.

Схемы возбуждения:

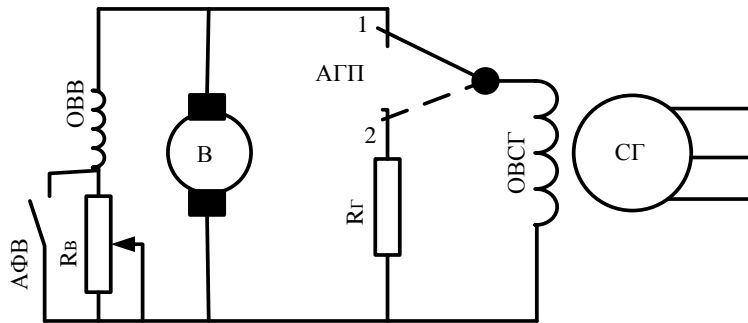


Рис. 3.5. Схема возбуждения синхронного генератора с возбудителем постоянного тока (приводной двигатель не показан)

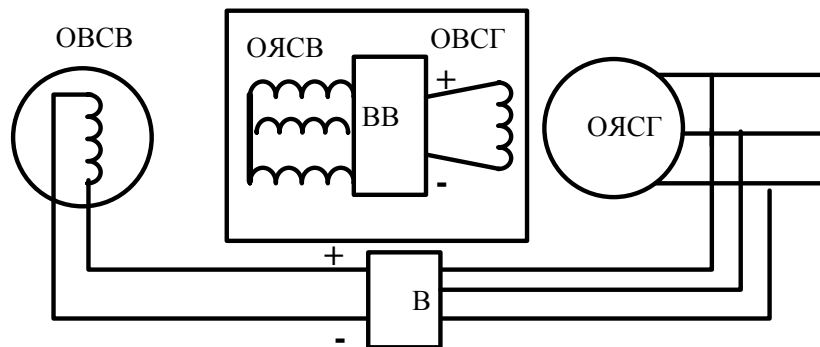


Рис.3.6. Схема бесконтактного возбуждения синхронного генератора с вращающимся выпрямителем

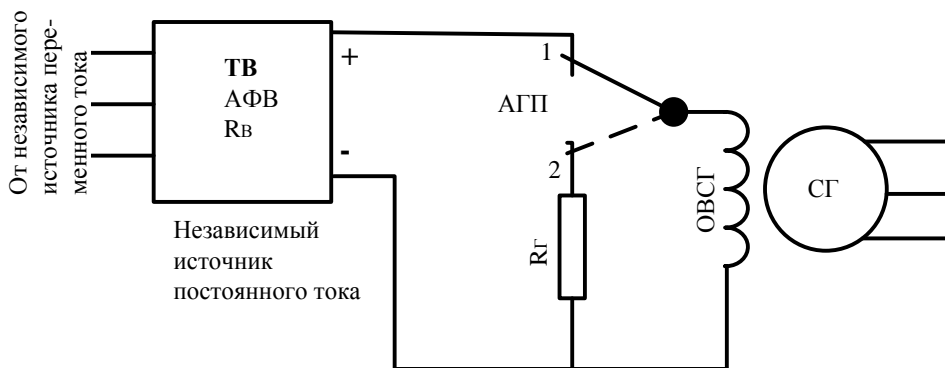


Рис. 3.7. Схема возбуждения синхронного генератора от независимого источника постоянного тока - тиристорного возбудителя

### Лекция 3.2. Электромагнитные процессы при холостом ходе и нагрузке. Реакция якоря

Магнитное поле (магнитный поток возбуждения  $\Phi_B$ ) синхронной машины при холостом ходе создается индуктором (обмоткой возбуждения) и проходит по магнитной цепи: полюсный сердечник, полюсный наконечник ротора (индуктора), воздушный зазор между статором и ротором, зубцовая зона статора, спинка (ярмо) статора, зубцовая зона статора, воздушный зазор, полюсный наконечник ротора, полюсный сердечник.

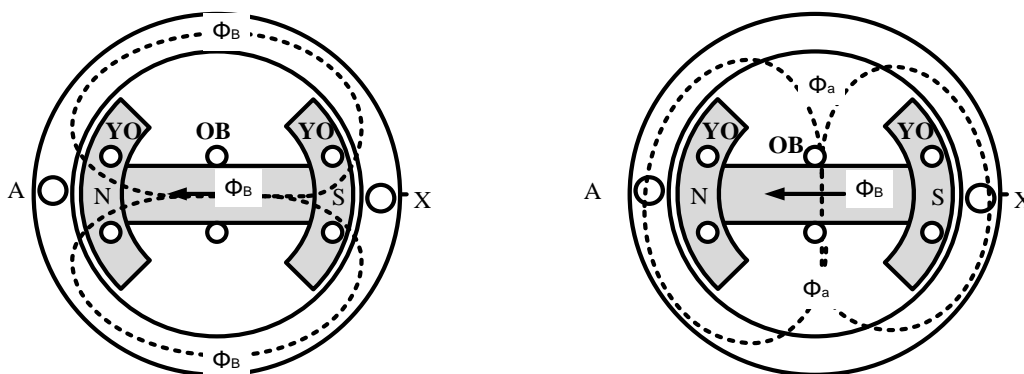


Рис.3.8. Магнитное поле синхронной машины при холостом ходе и нагрузке

Воздушный зазор синхронной машины вдоль окружности якоря - неравномерен, и магнитное сопротивление прохождению магнитного потока различно на различных участках магнитной цепи (продольная и поперечная оси машины). Поэтому индукция в зазоре распределяется несинусоидально. При расчете машины важно выделить действие основной гармоники кривой магнитного поля. Отношение амплитуды основной гармоники индукции от поля возбуждения к максимальному значению несинусоидальной кривой - это коэффициент формы поля возбуждения

$$k_B = \frac{B_{B1m}}{B_{Bm}}$$

Его величина зависит от:  $\frac{\delta}{m}$ ,  $\frac{\delta}{\tau}$ ,  $\alpha_p = \frac{b_p}{\tau}$ . При  $\frac{\delta}{m} = 1 \div 2,5$   $\alpha_p = 0,65 \div 0,75$

$$k_B = 0,95 \div 1,15$$

При неявнополюсном роторе близкая к синусоидальной форма кривой индукции достигается выбором соотношений длин обмотанной  $\alpha$  и необмотанной  $(\tau - 2\alpha)$  частей ротора. Коэффициент формы поля возбуждения

$$k_B = \frac{4 \sin \alpha}{\pi \alpha}$$

При  $\alpha = (0,33 \div 0,4)\pi$   $k_B = 0,965 \div 1,065$

При нагрузке машины трехфазная система токов статора (якоря) создает вращающееся магнитное поле **реакции якоря** (магнитный поток реакции

якоря  $\Phi_a$ ), которое вращается синхронно с ротором, взаимодействует с полем возбуждения и создает единое магнитное поле машины. Характер взаимодействия полей зависит от характера нагрузки.

При чисто активной нагрузке ЭДС и ток якоря совпадают по фазе, ЭДС и ток имеют максимальное значение в витках под серединой полюса, а МДС поля реакции якоря направлена по поперечной оси машины и является поперечной по отношению к МДС поля возбуждения.

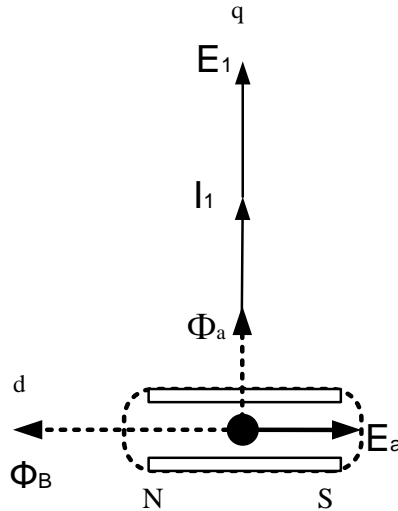


Рис.3.9. Поперечная реакция якоря при активной нагрузке генератора

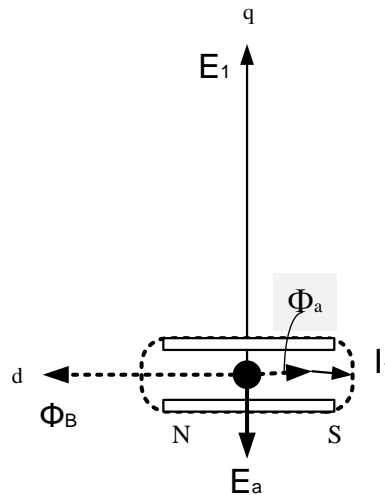


Рис.3.10. Продольная размагничивающая реакция якоря при индуктивной нагрузке генератора

При индуктивной нагрузке ток отстает от ЭДС на 90 град во времени, а МДС и магнитный поток поля реакции якоря отстает от МДС и магнитного потока поля возбуждения на 180 град в пространстве и направлена вдоль продольной оси машины в направлении, противоположном МДС поля возбуждения, т.е. размагничивает машину. Реакция якоря характеризуется как продольно - размагничивающая.

При емкостной нагрузке ток якоря опережает ЭДС на 90 град во времени, а МДС и поток поля реакции якоря совпадает с МДС и потоком поля возбуждения в пространстве и направлена вдоль продольной оси машины в том же направлении, что и МДС поля возбуждения, т.е. подмагничивает машину. Реакция якоря характеризуется как продольная подмагничивающая. В общем случае активно-индуктивной или активно-емкостной нагрузки ток и созданную им МДС вращающегося магнитного поля раскладывают на две составляющие: продольную  $I_{1d} = I_1 \sin \psi$  и поперечную  $I_{1q} = I_1 \cos \psi$

$$F_a = \frac{3}{2} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{01}}{p} \cdot I_1 \quad F_{ad} = F_a \sin \psi \quad F_{aq} = F_a \cos \psi$$

А процесс рассматривают отдельно по продольной оси машины **d** и поперечной оси **q**.

Магнитное поле синхронной машины при нагрузке машины состоит из поля возбуждения, созданного индуктором, и поля реакции якоря. Индукция в зазоре так же, как и при холостом ходе, несинусоидальна. Отношение амплитуды основной гармоники индукции от поля реакции якоря к максимальному значению несинусоидальной кривой – это коэффициент формы поля реакции якоря.

Коэффициенты формы поля продольной и поперечной реакции якоря

$$k_{ad} = \frac{B_{adm1}}{B_{adm}} \quad k_{aq} = \frac{B_{aqm1}}{B_{aqm}}$$

зависят от отношения геометрических размеров машины:  $\frac{\delta_m}{\delta}$ ,  $\frac{\delta}{\tau}$  и  $\alpha_p = \frac{b_p}{\tau}$ .

МДС продольной и поперечной реакции якоря проводят свои магнитные потоки по продольной и поперечной осям  $F_{ad} \rightarrow \Phi_{ad}$  и  $F_{aq} \rightarrow \Phi_{aq}$ , а эти

потоки наводят в обмотке якоря (статора) ЭДС продольной реакции якоря

$$E_{ad} = 4,44 f_1 w_1 k_{01} \Phi_{ad}$$

и ЭДС поперечной реакции якоря

$$E_{aq} = 4,44 f_1 w_1 k_{01} \Phi_{aq}.$$

Векторные диаграммы магнитных потоков и ЭДС неявнополюсной и явнополюсной машин поясняют происходящие процессы.

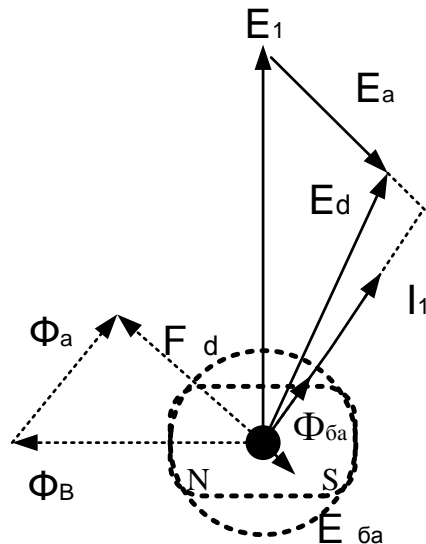


Рис.3.11 Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС неявнополюсного синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке

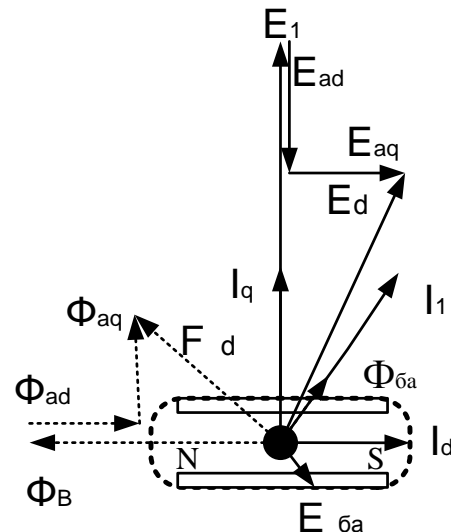


Рис.3.12. Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС явнополюсного синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке

Результирующий магнитный поток в воздушном зазоре

$$\bar{\Phi}_{\delta} = \bar{\Phi}_B + \bar{\Phi}_a$$

$$\bar{\Phi}_{\delta} = \bar{\Phi}_B + \bar{\Phi}_{ad} + \bar{\Phi}_{aq}$$

определяет степень насыщения магнитной цепи машины и положение рабочей точки на кривой намагничивания ее магнитной цепи.

Аналогично результирующая ЭДС от результирующего магнитного потока косвенно определяет степень насыщения машины

$$\bar{E}_\delta = \bar{E}_1 + \bar{E}_a \qquad \bar{E}_\delta = \bar{E}_1 + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq}.$$

Для удобства анализа ЭДС продольной и поперечной реакции якоря явнополюсной машины заменяют произведениями составляющих токов на некоторые индуктивные сопротивления, которые называют сопротивлениями продольной и поперечной реакции якоря,

$$\bar{E}_{ad} = -j\bar{I}_d x_{ad} \qquad \text{и} \qquad \bar{E}_{aq} = -j\bar{I}_q x_{aq}.$$

Величина этих сопротивлений зависит от геометрических размеров и обмоточных данных машины

$$x_{ad} = \frac{4mf_1\mu_0}{\pi k_\delta k_{\mu d}} \cdot \frac{\tau l_\delta}{\delta} \cdot \frac{w_1^2 k_{01}^2}{p} k_{ad} \qquad \text{и} \qquad x_{aq} = \frac{4mf_1\mu_0}{\pi k_\delta k_{\mu q}} \cdot \frac{\tau l_\delta}{\delta} \cdot \frac{w_1^2 k_{01}^2}{p} k_{aq}.$$

ЭДС поля рассеяния представляют тоже в виде произведения тока якоря на некоторое индуктивное сопротивление, которое называют индуктивным сопротивлением рассеяния

$$\bar{E}_{\sigma a} = -j\bar{I}_1 x_{\sigma a}$$

Результирующие синхронные ЭДС

$$\bar{E}_d = -j\bar{I}_d (x_{ad} + x_{\sigma a}) = -j\bar{I}_d x_d$$

$$\bar{E}_q = -j\bar{I}_q (x_{aq} + x_{\sigma a}) = -j\bar{I}_q x_q,$$

где  $x_{\sigma a}$  (или  $x_1$ ) – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора,

которое состоит из пазового рассеяния, рассеяния лобовых частей, дифференциального рассеяния,

$x_q$  и  $x_d$  - продольное и поперечное индуктивные синхронные сопротивления.

Для неявнополюсной машины эти соотношения принимают вид:

$$\bar{E}_a = -j\bar{I}_1 x_a$$

$$\bar{E}_{\sigma a} = -j\bar{I}_1 x_{\sigma a}$$

$$x_d = (x_a + x_{\sigma a})$$

### Лекция 3.3. Векторные диаграммы синхронных генераторов

**Неявнополюсный СГ.** Уравнение напряжений обмотки якоря на основании закона Кирхгофа для контура

$$\boxed{\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + \bar{E}_a + \bar{E}_{\bar{b}a} - r_1 \bar{I}_1}$$

$$\bar{E}_a = -j\bar{I}_1 X_a \quad \bar{E}_{\bar{b}a} = -j\bar{I}_1 X_{\bar{b}a}$$

$$\bar{E}_d = \bar{E}_a + \bar{E}_{\bar{b}a} = -j\bar{I}_1 X_a - j\bar{I}_1 X_{\bar{b}a} = -j\bar{I}_1 X_d,$$

где  $X_d = X_a + X_{\bar{b}a}$  - индуктивное синхронное сопротивление якоря машины.

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 - j\bar{I}_1 X_a - j\bar{I}_1 X_{\bar{b}a} - \bar{I}_1 r_1 = \bar{E}_1 - j\bar{I}_1 X_d - \bar{I}_1 r_1$$

$$\boxed{\bar{U}_1 = \bar{E}_1 - j\bar{I}_1 X_d - \bar{I}_1 r_1}$$

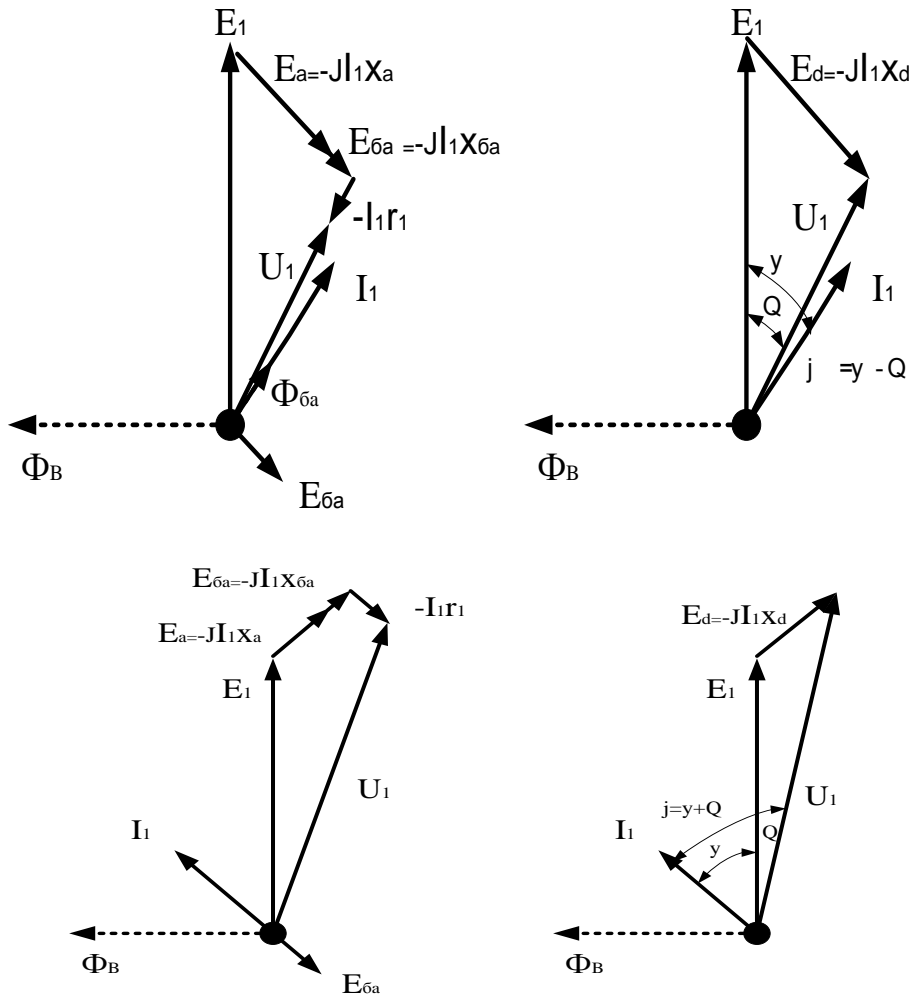


Рис.3.13. Векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузке

**Явнополюсный СГ.** На основании закона Кирхгофа для контура уравнение напряжений



$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq} + \bar{E}_{\delta a} - r_1 \bar{I}_1$$

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 - j\bar{I}_d X_{ad} - j\bar{I}_q X_{aq} - j\bar{I}_1 X_{\delta a} - \bar{I}_1 r_1$$

При  $E_d = E_{ad} + E_{\delta ad} = -jI_d X_d$  и  $E_q = E_{aq} + E_{\delta aq} = -jI_q X_q$   
 где  $X_d = X_{ad} + X_{\delta a}$  - продольное индуктивное синхронное сопротивление  
 якоря машины,  $X_d = X_a + X_{\delta a}$  - поперечное индуктивное синхронное  
 сопротивление якоря машины уравнение напряжений имеет вид

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 - jX_d \bar{I}_d - jX_q \bar{I}_q - r_1 \bar{I}_1,$$

причем величиной падения напряжения в активном сопротивлении обмотки  
 якоря по сравнению с другими векторами настолько мала, что ею часто  
 пренебрегают.

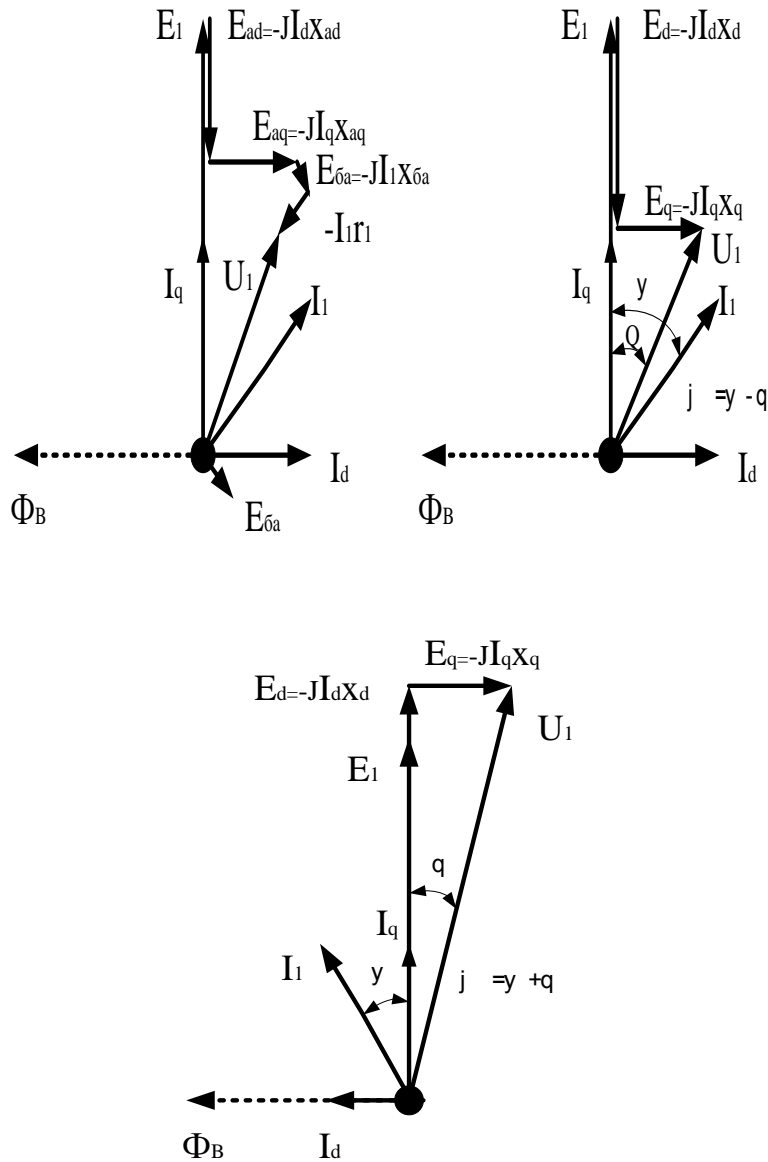


Рис.3.14. Векторные диаграммы явнополюсного синхронного генератора при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузке

### Лекция 3.4. Характеристики синхронного генератора при работе на автономную нагрузку

Характеристики синхронного генератора при работе на автономную нагрузку – это: ХХХ - характеристика холостого хода, ХКЗ – характеристика короткого замыкания, ВХ – внешняя характеристика, РХ – регулировочная характеристика, ИНХ – индукционная нагрузочная характеристика.

Характеристики строятся расчетным путем или снимаются экспериментально при постоянной номинальной частоте, постоянной номинальной частоте вращения и  $\cos \varphi = \cos \varphi_H = const$  в установившемся режиме при симметричной нагрузке.

**ХХХ** это характеристика намагничивания машины, т.е. зависимость ЭДС генератора от тока или МДС возбуждения в именованных или относительных единицах при разомкнутой цепи статора (якоря) и токе якоря  $I_1=0$ . Часто в расчетах пользуются нормальными ХХХ, а также прямолинейными расчетными характеристиками, насыщенной или ненасыщенной. Нормальная ХХХ - это усредненная ХХХ ряда машин в о.е. Ненасыщенная прямолинейная характеристика холостого хода ХХХ-1 проводится через начало координат как касательная к начальной части ХХХ. Насыщенная прямолинейная характеристика ХХХ-2 проходит через начало координат и точку С на ХХХ с ординатой, равной ЭДС от результирующего магнитного потока в воздушном зазоре  $E_\delta$ .

**ХКЗ** – это зависимость тока якоря от тока или МДС возбуждения в именованных или относительных единицах при замкнутой накоротко обмотке якоря и  $U_1=0$ . В режиме КЗ  $r_1 \ll X_d$ ,  $\cos \psi = 0$ . Ток якоря отстает от ЭДС на  $\psi = 90^\circ$  и является продольно - размагничивающим. ЭДС от результирующего магнитного потока

$$\bar{E}_\delta = \bar{E}_1 + \bar{E}_{ad} = \bar{E}_1 - JI_d \bar{X}_{ad} = \bar{E}_{\delta a} = -JI_d \bar{X}_{\sigma a}$$

невелика и магнитная цепь машины не насыщена, т.е. ХКЗ – прямая линия, проходящая через начало координат и точку с координатами  $I_{K0}$  и  $I_{BO}$ , где  $I_{K0}$  - ток короткого замыкания при токе возбуждения  $I_{BO}$ , которому в режиме ХХ соответствует номинальное напряжение.

На основании ХХХ и ХКЗ могут быть определены некоторые параметры генератора: синхронное сопротивление турбогенератора или продольное синхронное сопротивление явнополюсного генератора и ОКЗ (отношение короткого замыкания).

**Синхронные: ненасыщенное  $X_d$  и насыщенное  $X_{d\mu}$  сопротивления и коэффициент насыщения магнитной цепи машины**

$$X_d = \frac{E_1}{I_d} = \frac{AA''' \cdot m_e}{AB \cdot m_i}, \quad X_{d\mu} = \frac{E_{1\mu}}{I_d} = \frac{AA'' m_e}{AB \cdot m_i}, \quad X_{d\mu} = \frac{X_d}{k_\mu}, \quad k_\mu = \frac{AA'''}{AA''}$$

**Отношение короткого замыкания (ОКЗ)** – это отношение тока установившегося тока короткого замыкания при токе возбуждения, которому в режиме холостого хода соответствует номинальное напряжение на зажимах генератора

$$OKZ = \frac{I_{K0}}{I_H} = \frac{U_H}{X_d I_H} = \frac{1}{X_{d*}}$$

Оно невелико и для турбогенератора составляет 0,4-0,8, для гидрогенератора – 0,6-1,7 о.е. То есть этот ТКЗ невелик, что объясняется размагничивающим действием ТКЗ и небольшой величиной тока возбуждения. ОКЗ и  $X_{d*}$  определяют предельную нагрузку генератора по условиям статической устойчивости при параллельной работе генератора в системе. Чем больше ОКЗ (и меньше  $X_{d*}$ ), тем большую нагрузку может взять на себя генератор при параллельной работе. А это может быть достигнуто при конструировании путем увеличения воздушного зазора машины. Но такая машина получается дороже из-за необходимости усиления обмотки возбуждения и увеличения габаритов.

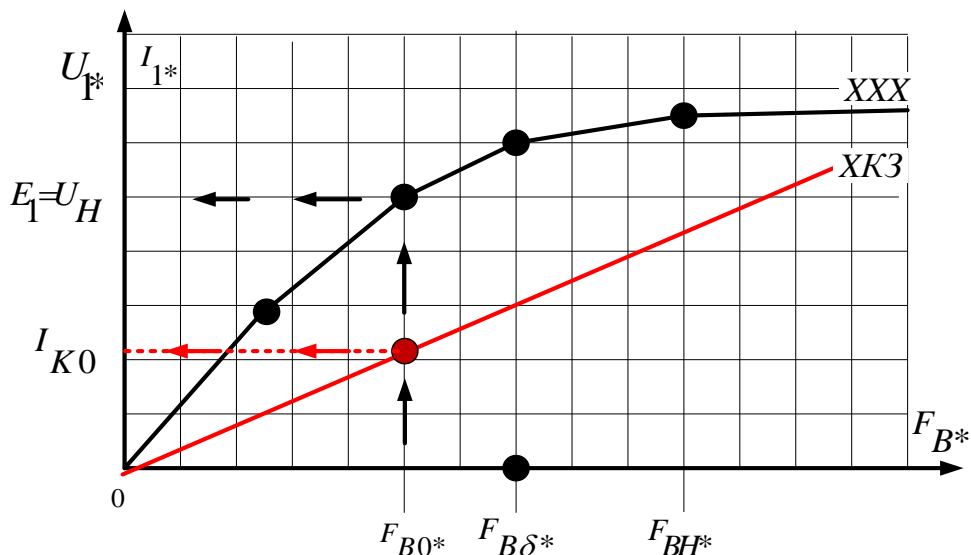


Рис.3.15.Определение ОКЗ синхронного генератора

**ВХ** – это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока якоря (нагрузки) при постоянном токе возбуждения, равном номинальному, т.е. такому, которому при номинальном токе якоря и  $\cos \varphi_H$  соответствует номинальное напряжение на зажимах генератора. Вид характеристик, падающая или восходящая с увеличением тока якоря, зависит от характера нагрузки (активно-индуктивная, активно-емкостная или активная). Это поясняется векторными диаграммами.

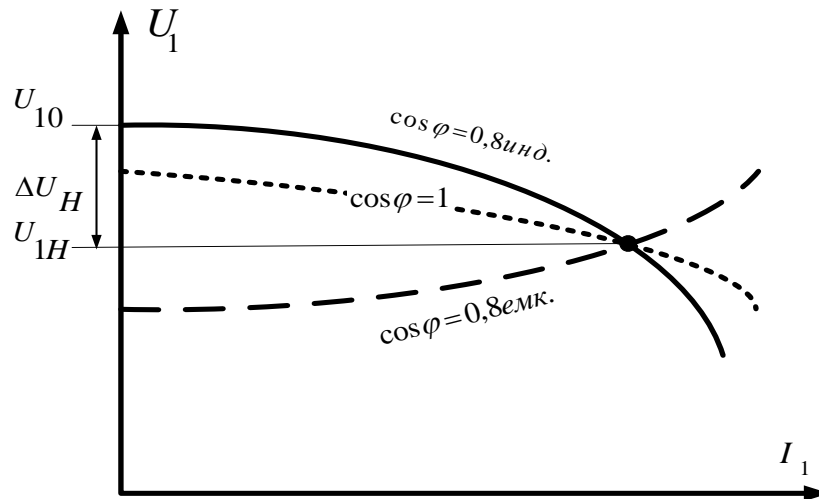


Рис.3.16. Внешние характеристики

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора  $\Delta U_H$  - это изменение напряжения при изменении нагрузки генератора от номинальной  $I_1 = I_{1H}$  до 0 при неизменном токе возбуждения, равном номинальному току  $I_B = I_{BH}$ .

$$\Delta U_{H\%} = \frac{U_{10} - U_H}{U_{10}} \cdot 100.$$

Величина  $\Delta U_{H\%}$  составляет 25-35%, причем для турбогенераторов его величина больше, чем для гидрогенераторов.

**РХ** – это зависимость тока возбуждения генератора от тока якоря при постоянном напряжении на зажимах и  $\cos \varphi = \cos \varphi_H = const$ . РХ показывает, как нужно регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки генератора, чтобы напряжение на зажимах оставалось неизменным. Вид характеристик также зависит от характера нагрузки и поясняется теми же векторными диаграммами.

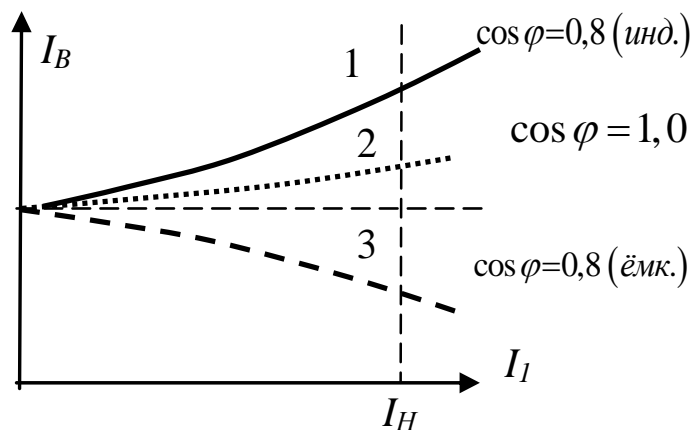


Рис.3.17. Регулировочные характеристики

**ИНХ** – это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока или М.Д.С. возбуждения при постоянном номинальном токе якоря  $I_1 = I_{1H} = const$  и чисто индуктивной нагрузке. ИНХ повторяет форму ХХХ, но проходит ниже вследствие размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения в якоре.

На основании известных ХХХ и ИНХ можно построить реактивный треугольник (треугольник Потье), который определяет соотношения между этими характеристиками. Для построения реактивного треугольника определяют положение точки В с ординатой  $I_{1H} * X_{\sigma a}$  на ХХХ. Сторона АС треугольника представляет собой падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния. Точка А нагрузочной характеристики – это точка пересечения ИНХ с осью абсцисс. Отрезок ОА в масштабе тока возбуждения (МДС) – это ток возбуждения (МДС), которому соответствует режим короткого замыкания с номинальным током якоря. Сторона СА реактивного треугольника пропорциональна току (МДС) возбуждения, который компенсирует размагничивающее действие реакции якоря.

Реактивный треугольник может быть построен и на основании ХХХ и ХКЗ. Построение реактивного треугольника и индукционной нагрузочной характеристики синхронного генератора по известным: ХХХ, току якоря, индуктивному сопротивлению рассеяния якоря представлено на рис.

На основании ХХХ и ИНХ и тока якоря можно определить индуктивное сопротивление рассеяния якоря  $X_{P*} \approx X_{\sigma a*}$

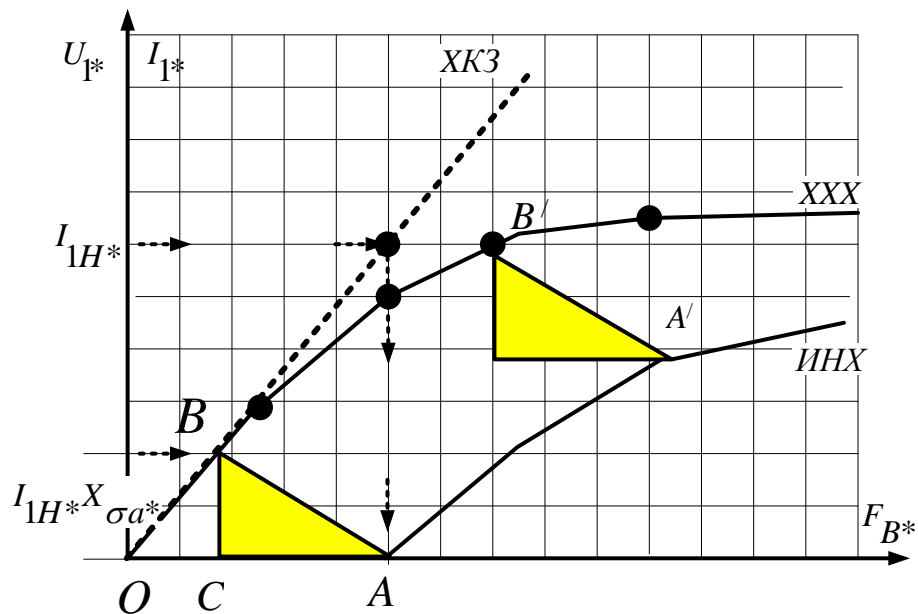


Рис. 3.18. Построение реактивного треугольника и индукционной нагрузочной характеристики синхронного генератора по известным: ХХХ, току якоря, индуктивному сопротивлению рассеяния якоря

### Лекция 3.5. Параллельная работа синхронных генераторов

Параллельная работа синхронных генераторов в современных энергосистемах обеспечивает: повышение надежности электроснабжения, повышение маневренности, повышение экономичности благодаря возможности выбора наиболее экономичных станций, агрегатов, режимов работы, уменьшение мощности необходимого резерва. При параллельной работе синхронных генераторов в мощной энергосистеме:

$S_{\Gamma} \ll S_{СИСТ}$	$U_1 = const$	$f = const$	$n_2 = const$	
$U_1 \neq f(I_B)$	$U_1 \neq f(I_1)$	$U_1 \neq f(P_1)$	$U_{\Gamma} = U_C$	$f_{\Gamma} = f_C$

Векторная диаграмма напряжений синхронного генератора и системы при их параллельной работе  $U_{\Gamma} = U_C$

#### Включение генератора на параллельную работу. Точная и грубая синхронизация.

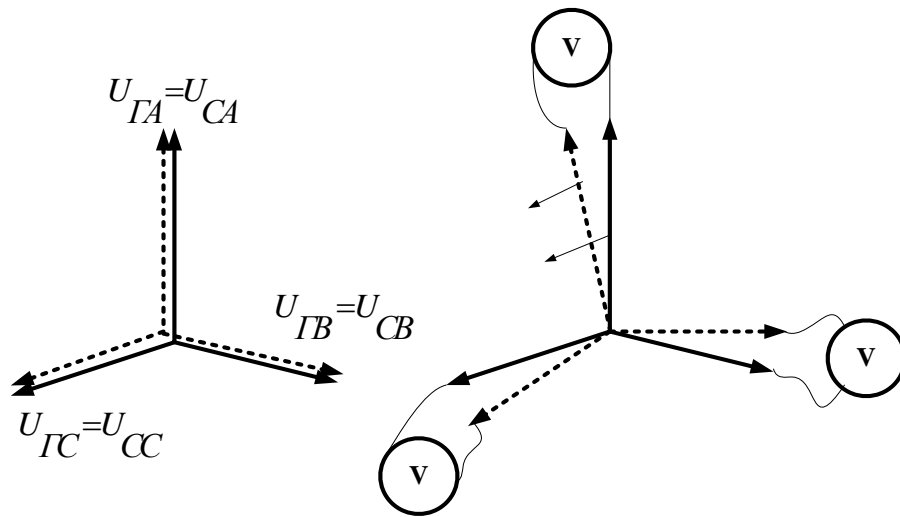


Рис.3.19

При точной синхронизации генератор предварительно приводится во вращение до подсинхронной скорости и возбуждается.

Порядок точной синхронизации, при котором будут отсутствовать чрезмерные токи при включении:

1. Фазировка - должен быть установлен одинаковый порядок чередования фаз.
2. Регулирование напряжения генератора - должно быть установлено равенство напряжений  $U_{\Gamma} \approx U_C$  и совпадение их по фазе.
3. Регулирование частоты генератора - должно быть установлено равенство частот  $f_{\Gamma} \approx f_C$ .

4. Выбор момента включения и включение на параллельную работу – синхронизация с использованием синхроскопа.

При грубой синхронизации (самосинхронизации) - генератор предварительно приводится во вращение до подсинхронной скорости с обмоткой возбуждения, замкнутой на гасительное сопротивление, обмотка якоря подключается к сети, что сопровождается толчками тока якоря, и затем ток возбуждения подается в обмотку возбуждения. Генератор втягивается в синхронизм, что сопровождается большими толчками тока. Их величина согласно ГОСТ ограничивается только 3,5 кратной номинальной величиной тока генератора.

Ламповый синхроскоп с лампами, включенными на вращение света.

Ламповый синхроскоп с лампами, включенными на погасание.

Стрелочный синхроскоп.

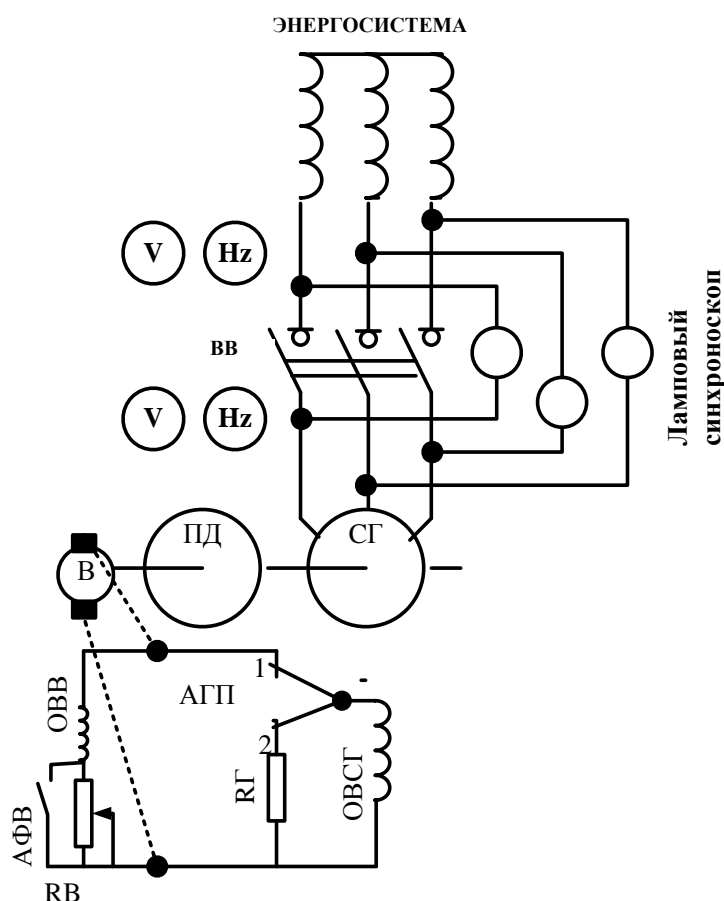


Рис.3.20. Включение синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой методом точной синхронизации

### Лекция 3.6. Характеристики синхронных генераторов при параллельной работе

Характеристики снимаются при  $U_{1c} = const$ ,  $f_1 = const$ ,  $U_1 = -U_{1c} = const$ ,  $n = const$ . Угловые характеристики активной мощности представляют собой зависимость  $P_1(\theta)$  при  $(I_B) = const$  и V-образные характеристики -  $I_1(I_B)$  при  $U_1 = const$  и  $P_1 = const$

#### V-образные характеристики

V-образные характеристики – это зависимость тока якоря от тока возбуждения  $I_1(I_B)$  при параллельной работе генератора с сетью и  $U_1 = const$  и  $P_1 = const$ . Они могут быть построены на основании векторных диаграмм, поясняющих порядок регулирования реактивных нагрузок.

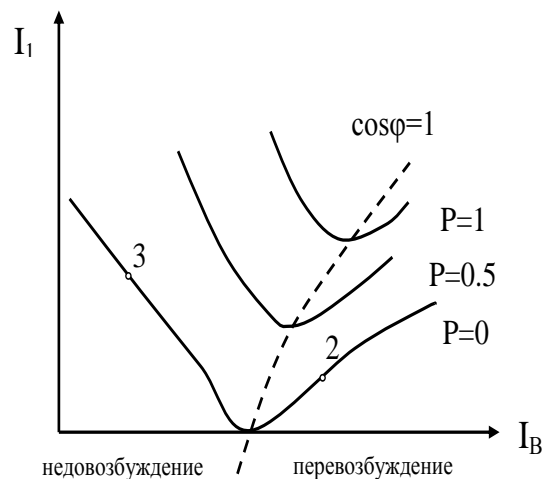
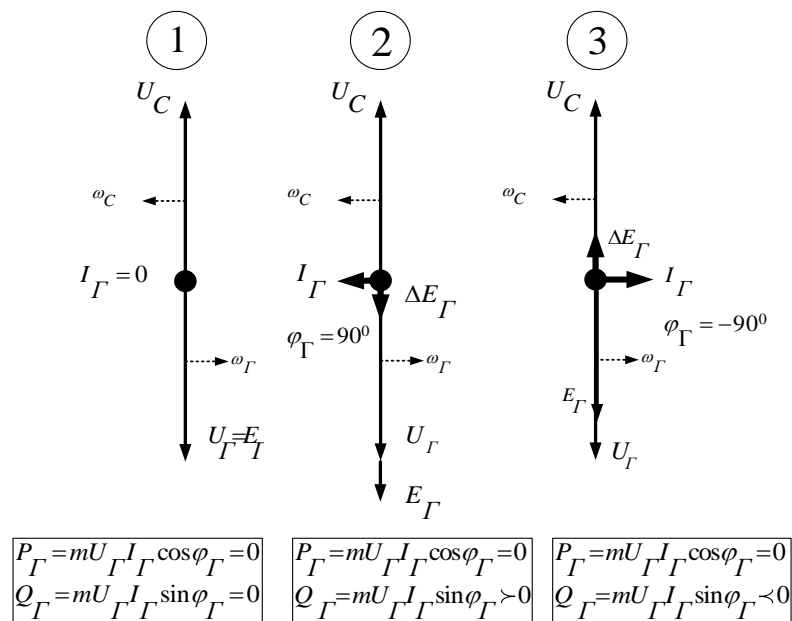


Рис.3.21. Регулирование реактивной нагрузки при параллельной работе синхронного генератора с энергосистемой и V-образные характеристики



## Угловые характеристики активной мощности $P_1(\theta)$

Явнополюсный СГ

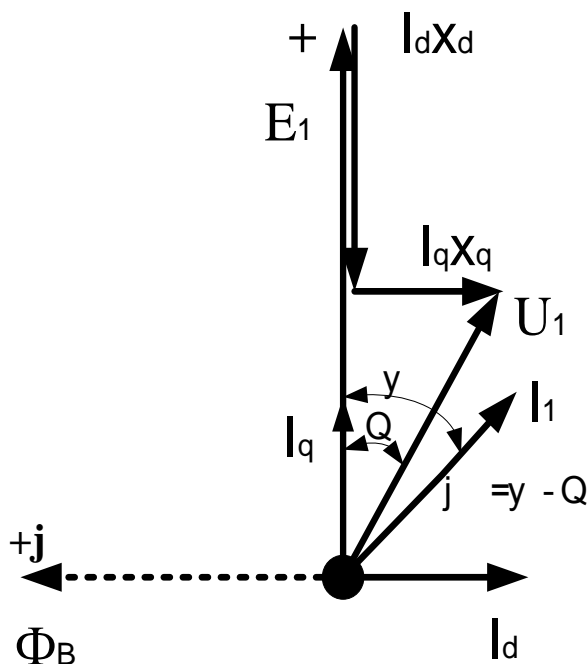


Рис.3.22. Векторная диаграмма синхронного явнополюсного синхронного генератора к выводу выражения угловой характеристики

$$\begin{aligned}
 P_1 &= m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_1 U_1 I_1 \cos(\psi - \theta) = m_1 U_1 I_1 (\cos \psi \cdot \cos \theta + \sin \psi \cdot \sin \theta) = \\
 &= m_1 U_1 (I_q \cdot \cos \theta + I_d \cdot \sin \theta) = m_1 U_1 \left( \frac{U_1 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{X_q} + \frac{E_1 - U_1 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta}{X_d} \right) = \\
 &= \frac{m_1 U_1^2}{X_q} \cdot \frac{\sin 2\theta}{2} + \frac{m_1 U_1 E_1}{X_d} \cdot \sin \theta - \frac{m_1 U_1^2}{X_d} \cdot \frac{\sin 2\theta}{2} = \\
 &= m_1 U_1 \left( \frac{U_1 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{X_q} + \frac{E_1 - U_1 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta}{X_d} \right) = \\
 &= \frac{m_1 U_1^2}{X_q} \cdot \frac{\sin 2\theta}{2} + \frac{m_1 U_1 E_1}{X_d} \cdot \sin \theta - \frac{m_1 U_1^2}{X_d} \cdot \frac{\sin 2\theta}{2}
 \end{aligned}$$

Где:  $I_q X_q = U_1 \sin \theta$ ,  $E_1 - I_d X_d = U_1 \cdot \cos \theta$ ,  $I_q = \frac{U_1 \cdot \sin \theta}{X_q}$ ,  $I_d = \frac{E_1 - U_1 \cdot \cos \theta}{X_d}$

Выражение угловой характеристики явнополюсного синхронного генератора

$$P_1 = \frac{m_1 U_1 E_1}{X_d} \cdot \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta$$

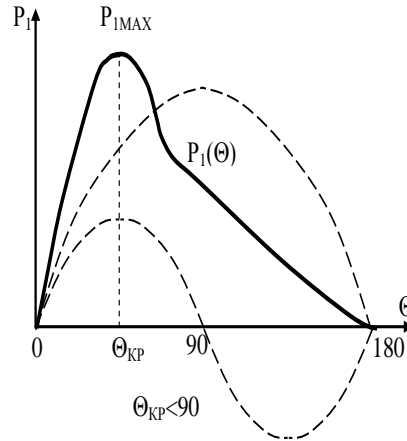


Рис.3.23. Угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора:  
 $P_{1\max}$  - максимальная мощность,  $\theta_{кр}$  - критический угол нагрузки

$$P_1(\theta) \text{ при } I_{\text{в}} = \text{const}$$

При отсутствии возбуждения ( $I_B = 0$  и  $E_1 = 0$ ) явнополюсный синхронный генератор развивает активную мощность в синхронном режиме

$$P_1 = \frac{m_1 U_1^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta$$

за счет несимметрии магнитной цепи ротора, при которой ротор стремится занять в магнитном поле реакции якоря положение, соответствующее минимальному магнитному сопротивлению или минимальной величине энергии.

### Понятие о статической устойчивости

Максимальная мощность, развиваемая синхронным генератором при  $\theta = \theta_{кр}$  может быть определена из условия  $\frac{dP_1}{d\theta} = 0$ . Для турбогенератора, например, она равна

$$P_{1\text{MAX}} = \frac{m_1 U_1 E_1}{X_d}$$

и обратно пропорциональна величине  $X_d \equiv \frac{1}{\delta}$ . При мощности приводного двигателя  $P_{\text{ПД}} = P_1$  и моменте  $M_{\text{нд}}$  возможна работа генератора с приводным двигателем при углах нагрузки  $\theta_1$  или  $\theta_2$  (точка 1 или точка 2 на угловой характеристике).

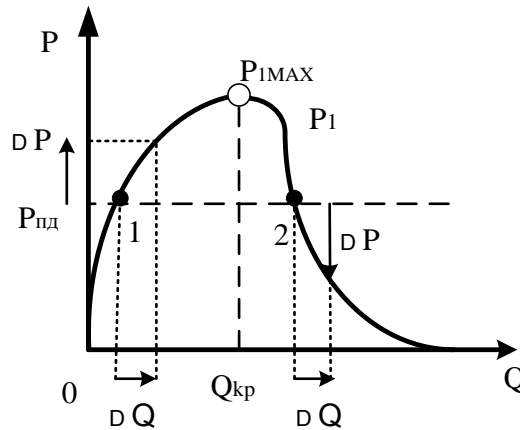


Рис.3.24. Понятие о статической устойчивости

При работе в точке 1 при возникновении некоторого небольшого возмущения (например, увеличения или уменьшения напряжения, тока возбуждения или нагрузки), при увеличении угла нагрузки, возрастает отдаваемая генератором мощность, возрастает его противодействующий момент, который обеспечивает замедление ротора, уменьшение угла нагрузки. Это устойчивый режим работы. Это возможно при выполнении условия статической устойчивости  $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} > 0$  при угле нагрузки  $\theta < \theta_{кр}$ .

При работе в точке 2 при угле нагрузки  $\theta_2$  при увеличении угла нагрузки отдаваемая генератором мощность уменьшается, уменьшается его противодействующий момент, а угол нагрузки возрастает до величины  $180^\circ$ . Ротор генератора ускоряется, и генератор выпадает из синхронизма. Это неустойчивый режим работы. Он возникает при  $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} < 0$  при угле нагрузки  $\theta > \theta_{кр}$ .

Режим работы синхронного генератора является статически устойчивым, если при наличии небольших возмущений изменения угла нагрузки и отдаваемой мощности также невелики и при прекращении действия возмущений восстанавливается режим работы. Мощность  $\Delta P$ , под воздействием которой восстанавливается режим работы, называется синхронизирующей мощностью.

Коэффициент синхронизирующей мощности

$$P_{CM} = \frac{\Delta P}{\Delta \theta}$$

Статическая перегружаемость

$$k_{II} = \frac{P_{1M}}{P_H} = \frac{mU_{1H} \cdot E_1}{x_d} \cdot \frac{1}{mU_{1H} I_{1H} \cos \varphi_H} = \frac{1}{x_{d*} \cdot \cos \varphi_H}$$

Величина  $k_{II}$  нормируется ГОСТ. Для турбо- и гидрогенераторов она находится в пределах 1,6-1,7

### Лекция 3.7. Синхронные двигатели и компенсаторы.

- Конструкции синхронных двигателей и компенсаторов.
- Обратимость СМ. Работа СМ на ГАЭС.
- Физическое представление о двигательном режиме СД.
- Уравнение напряжений и векторная диаграмма

$$\bar{U}_{1C} = -\bar{E}_1 + j\bar{I}_d x_d + j\bar{I}_q x_q$$

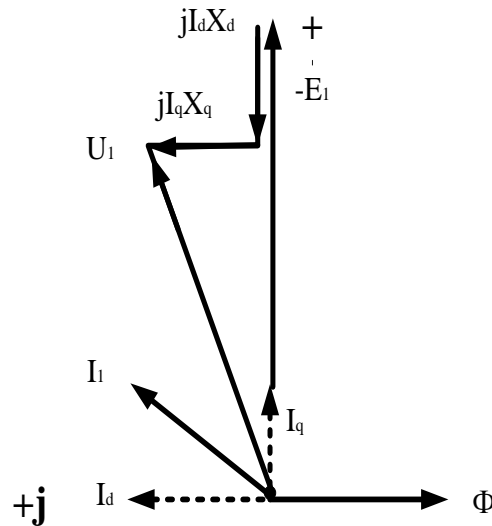


Рис. 3.25. Векторная диаграмма синхронного двигателя в режиме перевозбуждения .

- Преобразование мощности и энергии, потери и КПД

$$\begin{aligned} P_1 - (\Delta P_{M1} + \Delta P_{C1}) &= P_{EM} \\ P_2 &= P_{EM} - (\Delta P_B + \Delta P_{MEX}) \end{aligned}$$

- Активная электрическая мощность
 
$$P_1 = mU_1 I_1 \cos \varphi < 0$$
- Угловая характеристика явнополюсного СД

$$M = \frac{m \cdot U_1 \cdot E_1}{\omega_H \cdot x_d} \sin \theta + \frac{m \cdot U_1^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

- Реактивная мощность и V-образные характеристики
- Механические и рабочие характеристики
- Способы пуска:
  - ✓ Асинхронный пуск при номинальном или пониженном напряжении,
  - ✓ Частотный пуск с плавным повышением напряжения от 0 до номинального (синхронный пуск),
  - ✓ Пуск с разгонным двигателем.

- Достоинства и недостатки:
  - ✓ Способность работать с  $\cos\varphi=1$  и опережающим током в режиме перевозбуждения для компенсации реактивной мощности,
  - ✓ Возможность регулирования максимального момента и меньшая его зависимость от напряжения сети, чем у асинхронного двигателя,
  - ✓ Высокий КПД,
  - ✓ Стабильность частоты вращения,
  - ✓ Малая чувствительность к колебаниям напряжения
  - ✓ Высокая стоимость и сложность,
  - ✓ Сложность пуска,
  - ✓ Нерегулируемость частоты вращения.

**Синхронный компенсатор** – это синхронная машина, предназначенная только для выработки или потребления реактивной мощности – это синхронный двигатель без нагрузки на валу или синхронный генератор без приводного двигателя.

Назначение, особенности конструкции и режима работы синхронного компенсатора:

- ✓ Генерирование реактивной мощности и уменьшение потерь в сетях в режиме перевозбуждения,
- ✓ Регулирование напряжения при спадах нагрузки путем их загрузки реактивными токами в режиме недо возбуждения,
- ✓ Отсутствие активной нагрузки, отсутствие выступающих концов вала, возможность герметизации, применения водорода при повышенном давлении для охлаждения, меньшие размеры и стоимость по сравнению с двигателем или генератором,
- ✓ Порядок пуска – как у синхронного двигателя.

### **Пуск синхронного двигателя и компенсатора**

Возможен **асинхронный пуск**: прямой пуск или пуск при пониженном напряжении (реакторный, автотрансформаторный, пуск с переключением обмоток с треугольника в звезду), а также **частотный (синхронный) пуск** двигателя при питании его от автономного преобразователя частоты и **пуск с помощью разгонного двигателя**.

**Асинхронный пуск** осуществляется с использованием пусковой обмотки и обмотки возбуждения, замыкаемой при пуске на гасительное сопротивление. Порядок пуска: включение с обмоткой возбуждения, замкнутой на гасительное сопротивление, разгон до подсинхронной скорости, синхронизация.

При включении асинхронного двигателя пусковой ток намного превышает номинальный  $I_{\Pi} = (5-7)I_H$ , а пусковой момент невелик  $M_{\Pi} = (0,8-1,2)M_H$

- **Прямой пуск** возможен при выполнении условий:

$$I_{\Pi} < I_{\text{СДОП}} \text{ и } M_{\Pi} > M_C$$

- Пуск при пониженном напряжении (реакторный пуск, автотрансформаторный пуск, пуск с переключением с треугольника на звезду) следует применять при  $I_{СДОП} < I_{П}$ . Коэффициент снижения напряжения

$$K = \frac{I_{СДОП}}{I_{П}} = \frac{I'_{П}}{I_{П}}, \text{ где } K < 1.$$

- **Реакторный пуск.**

$$U'_1 = K \cdot U_1 \quad M_{П} \equiv U_1^2$$

$$M'_{П} = M_{П} \cdot K^2 \quad \text{и} \quad I'_{П} = I_{П} \cdot K$$

- **Автотрансформаторный пуск** при применении автотрансформатора с коэффициентом трансформации  $K_A = \frac{U_{1A}}{U_{2A}}$

$$I'_{П} = I_{П} \cdot K = I_{П} \cdot \frac{1}{K_A^2} = I_{СДОП} \quad \text{и} \quad M'_{П} = M_{П} \cdot K$$

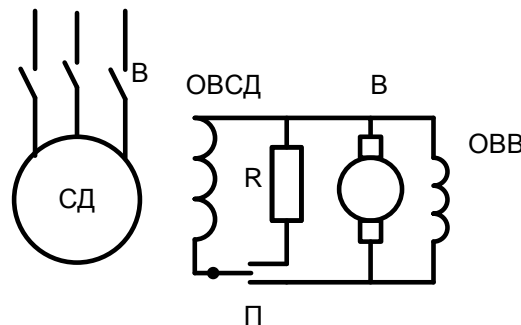


Рис.3.26. Прямой асинхронный пуск синхронного двигателя.  
Пуск с наглухо подключенным возбудителем

- **Пуск с переключением с треугольника на звезду** возможен, если двигатель нормально работает при соединении в треугольник. Фазное напряжение при переключении на звезду снижается в  $\sqrt{3}$  раз, а сопротивление фазы увеличивается в  $\sqrt{3}$  раз. Поэтому:

$$I_{П\Upsilon} = \frac{I_{П\Delta}}{3} \quad \text{и} \quad M_{П\Upsilon^*} = \frac{M_{П\Delta}}{3}$$

- **Частотный (синхронный) пуск** с плавным повышением частоты и напряжения может быть выполнен при включении двигателя через статический (СПЧ) или электромашинный преобразователь частоты.
- **Пуск с помощью разгонного двигателя.**

## Лекция 4.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока

**Принцип действия генератора** основан на явлении электромагнитной индукции - на наведении ЭДС в витке, вращающемся в магнитном поле внешним приводным двигателем. Концы витка выведены на две пластины коллектора. К коллекторным пластинам прижимаются неподвижные щетки, к которым подключается внешняя цепь. Проводники активной части витка пересекают магнитное поле и в них, по закону электромагнитной индукции, наводятся ЭДС, пропорциональные индукции, длине проводника и скорости его движения в магнитном поле  $e = B \cdot l \cdot v$ , направление которых определяется по правилу правой руки. При вращении витка в нем наводится знакопеременная ЭДС. С помощью неподвижных щеток, которые являются простейшим механическим выпрямителем, эта ЭДС преобразуется в пульсирующую ЭДС постоянного направления. Если внешняя цепь замкнута, то по ней, под действием этой ЭДС, будет протекать ток постоянного направления. В реальной машине на якоре, находится большое количество витков, присоединенных к своим коллекторным пластинам, соединенных между собой параллельно и последовательно. Поэтому пульсации ЭДС и тока на выходе невелики, и можно говорить, что ток и ЭДС на выходе машины являются постоянными. Для реального генератора справедливо уравнение напряжений:

$$U = E - I_a \cdot R_a,$$

где:

$I_a$  - ток якоря;

$R_a$  - сопротивление цепи якоря;

$E = C \cdot \Phi \cdot \omega$  - ЭДС якоря;

$C = \frac{N \cdot p}{2\pi \cdot a}$  электромашинная постоянная, зависящая от параметров машины:

$N$  - число проводников,

$p$  - число пар полюсов,

$a$  - число параллельных ветвей обмотки якоря

При протекании тока в проводниках витка, вращающихся в магнитном поле, возникает сила Ампера  $f = B \cdot l \cdot i_a$ , препятствующая вращению витка, направление которой определяется правилом левой руки. Эта сила в реальной машине образует противодействующий вращающий момент. Для реального генератора справедливо уравнение моментов

$$M_1 = M_0 + M,$$

где:

$M = C \cdot \Phi \cdot I_a$  противодействующий момент,

$M_0$  - момент холостого хода.

**Принцип действия двигателя.** То же устройство работает в режиме электрического двигателя, если к щеткам подвести постоянное напряжение. Под действием напряжения через щетки, пластины коллектора и виток потечет ток. Коллектор в режиме двигателя обеспечивает контакт внешней цепи с витком, но и выполняет функцию механического инвертора, т.е. преобразует постоянный ток во внешней цепи в переменный ток в витке. При протекании тока в проводниках витка, находящегося в магнитном поле, возникает сила Ампера  $f = B \cdot l \cdot i_a$ , приводящая виток во вращение, направление которой определяется правилом левой руки. Эта сила в реальном двигателе образует движущий вращающий момент, приводящий ротор (якорь) двигателя во вращение

$$M = M_0 + M_C,$$

где  $M = C \cdot \Phi \cdot I_a$  движущий момент

Для реального двигателя справедливо уравнение напряжений

$$U = E + I_a \cdot R_a,$$

где  $E = C \cdot \Phi \cdot \omega$  - противо - ЭДС

Машина постоянного тока может работать в режиме генератора и в режиме двигателя, т. е. обладает свойством обратимости.

### **Устройство машины постоянного тока.**

Конструкция машины представлена на рис. 4.1., 4.2., где:

- 1 – станина (чугунная или стальная) на лапах или с фланцем,
- 2 – лапы станины с отверстиями для крепления,
- 3 – главный полюс (сердечник и полюсный наконечник из конструкционной стали, цельный литой или шихтованный),
- 4 – обмотка (обмотки) возбуждения (медный изолированный провод), ОВ
- 5 – дополнительный (коммутационный) полюс, из конструкционной стали, цельный литой или шихтованный,
- 6 - обмотка дополнительного полюса, ОДП
- 7 – якорь (ротор) с шихтованным цилиндрическим магнитопроводом из электротехнической стали с пазами для укладки обмотки, с обмоткой якоря, коллектором, подшипниками,
- 8 – вал,
- 9 – зубцовая зона якоря,
- 10 – клеммная коробка,
- 11 – рым болт,
- 12 – коллектор,
- 13 – подшипники, устанавливаемые в подшипниковых щитах,
- 14 – обмотка якоря.

Кроме того, на рисунках не показаны: щеточный аппарат (щетki, щеткодержатели, щеточные пальцы, щеточные траверсы), подшипниковые щиты, подшипниковые крышки, обмотка якоря



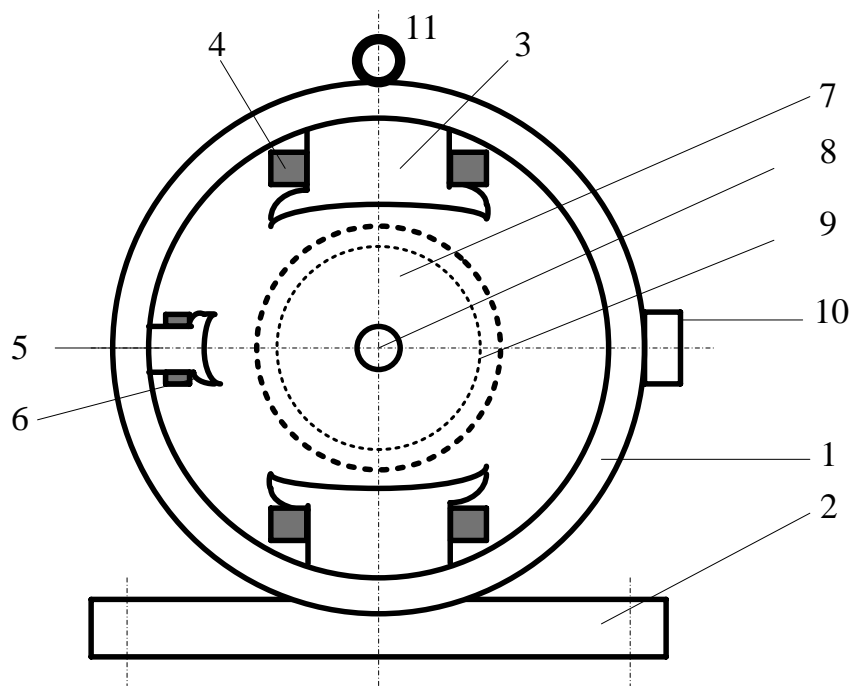


Рис.4.1. Устройство коллекторной машины постоянного тока

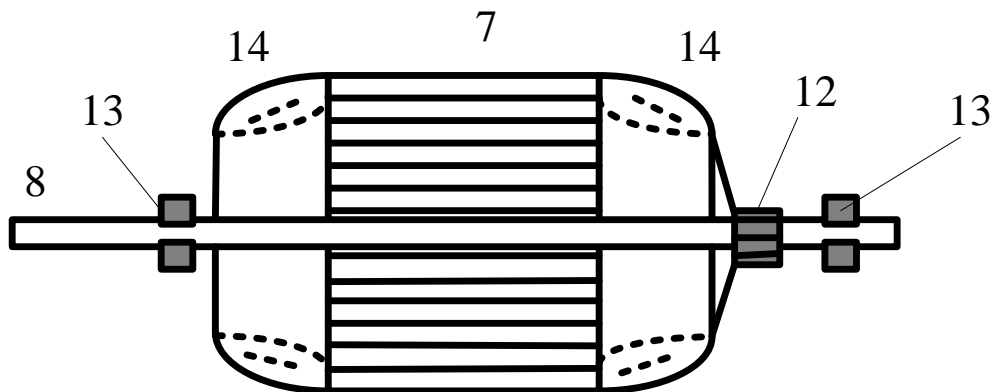


Рис.4.2. Якорь коллекторной машины постоянного тока

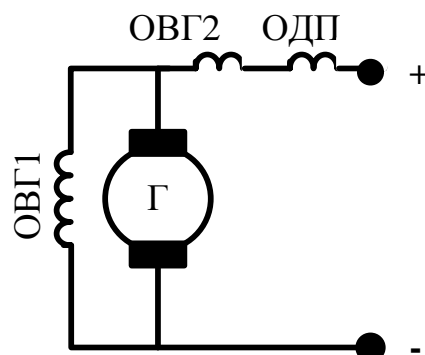


Рис.4.3. Схема соединения обмоток коллекторной машины постоянного тока

## Лекция 4.2. Магнитное поле при ХХ и нагрузке

При ХХ магнитное поле создается индуктором, является однородным (рис 4.4.а) и распределяется под полюсом по трапециевидальному закону (рис 4.5 тонкая линия). При щетках, установленных на геометрической нейтрали, поле реакции якоря направлено вдоль поперечной оси машины (рис 4.4.б). Результирующий магнитный поток показан на рис 4.4.в.

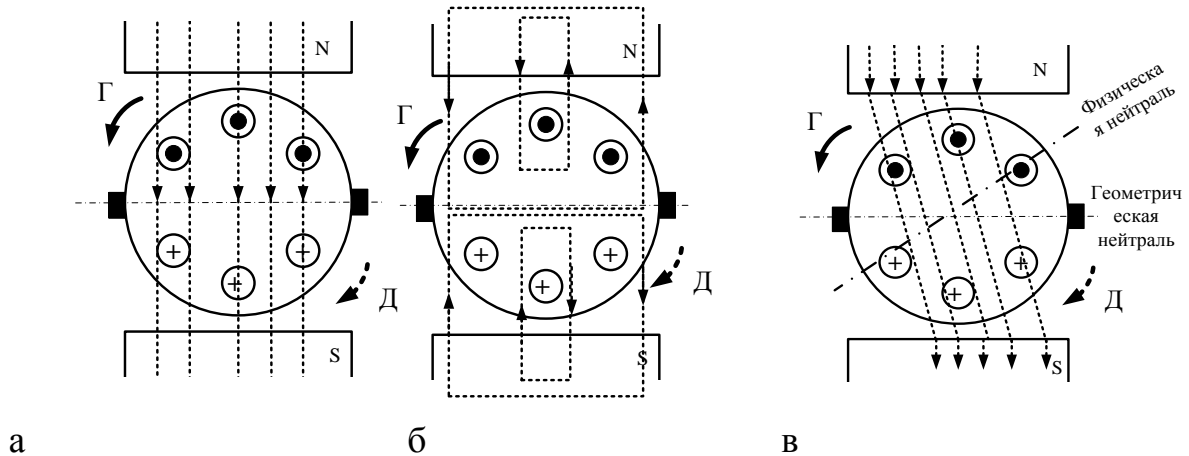


Рис. 4.4. Магнитное поле машины постоянного тока при щетках, установленных на геометрической нейтрали. Действие реакции якоря

При нагрузке машины при щетках, установленных на линии геометрической нейтрали, картины магнитного поля искажаются. Увеличивается плотность магнитного потока под сбегающим краем полюса в генераторе (под набегающим краем в двигателе), и физическая нейтраль смещается относительно геометрической нейтрали в сторону вращения якоря в генераторе (в сторону, противоположную вращения, в двигателе). Кривая индукции поля отличается от кривой МДС наличием седлообразных провалов. Результирующая кривая индукции проходит через «0» в зоне физической нейтрали

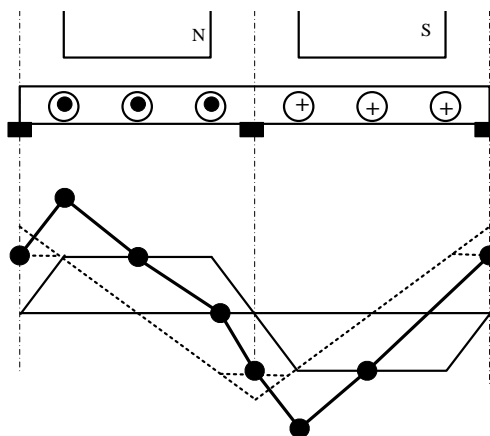


Рис. 4.5. Магнитное поле машины постоянного тока при щетках, установленных на геометрической нейтрали. Действие реакции якоря

### Лекция 4.3. Процессы коммутации тока. Настройка коммутации

Коммутация – это совокупность явлений, связанных с изменением тока в секции, замыкаемой накоротко щеткой при переключении секции из одной параллельной ветви в другую. Качество коммутации оценивается пятью классами (табл.4.1.). Первые три класса, указанные в таблице, допускаются для длительной работы.

Таблица 4.1. Классы коммутации:

1	темная коммутация-отсутствие искрения
$1 \frac{1}{4}$	слабое точечное искрение под небольшой частью щетки
$1 \frac{1}{2}$	слабое искрение под большей частью щетки
2	искрение под всем краем щетки
3	значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных вылетающих искр

Сущность процесса коммутации: в процессе коммутации ток секции меняет свое направление (рис.4.6), поэтому внутри МПТ протекает переменный ток. При этом в секции коммутирующего контура действуют ЭДС, приведенные в таблице 4.2.

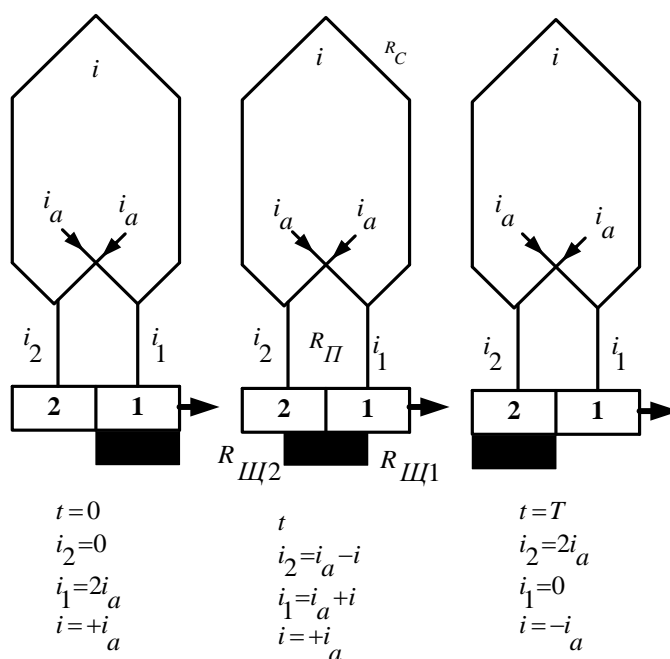


Рис. 4.6. Сущность процесса коммутации:

Таблица 4.2. ЭДС коммутирующего контура

ЭДС самоиндукции	$e_L = -L \frac{di}{dt} = 2w_C \cdot V_a \cdot \Lambda \cdot A$
ЭДС взаимной индукции	$e_M = -M \frac{di}{dt}$
Коммутирующая ЭДС	$e_K = 2w_C \cdot V_a \cdot l_K \cdot B_K$
Здесь $w_C$ - число витков секции, $V_a$ - линейная скорость якоря, $A$ - линейная нагрузка, $\Lambda$ - удельная магнитная проводимость	

На основании вышеизложенного, уравнение коммутации имеет вид:

$$iR_C + i_1 R_{Щ1} + i_1 R_{П} - i_2 R_{Щ2} - i_2 R_{П} = e_L + e_M + e_K$$

Если предположить, что  $R_C = 0$ ,  $R_{П} = 0$ , тогда уравнение коммутации примет вид

$$e_L + e_M + e_K = 0,$$

$$i_1 R_{Щ1} - i_2 R_{Щ2} = 0$$

Это прямолинейная коммутация или коммутация сопротивлением (рис.4.7). При прямолинейной коммутации плотность тока постоянна по всей длине щетки. При этом условия коммутации наилучшие.

Выражение  $i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T}\right)$  является решением уравнения прямолинейной коммутации с учетом соотношений

$$\begin{aligned} i_1 &= i_a + i; \\ i_2 &= i_a - i \end{aligned}$$

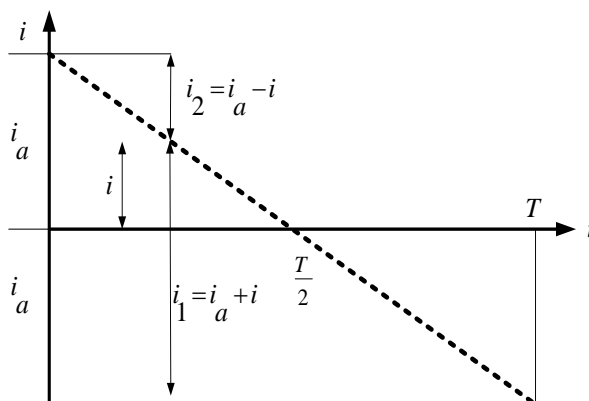


Рис. 4.7. Прямолинейная коммутация

## Лекция 4.4. Характеристики генераторов постоянного тока

### Диаграмма преобразования мощности и уравнение напряжений ГПТ

Энергетическая диаграмма ГПТ приведена на рис.4.8. Генератор приводится в движение приводным двигателем. Мощность на валу генератора равна мощности приводного двигателя:

$$P_1 = P_{ПД},$$

$\Delta P_B$  – потери мощности на возбуждение ГПТ;

$\Delta P_{мех}$  механические потери (на трение подшипников, вентиляционные потери, потери на трение щеток);

$\Delta P_{ста}$  - потери в стали якоря (на гистерезис, вихревые токи);

$\Delta P_{МА}$ - потери в меди якоря.

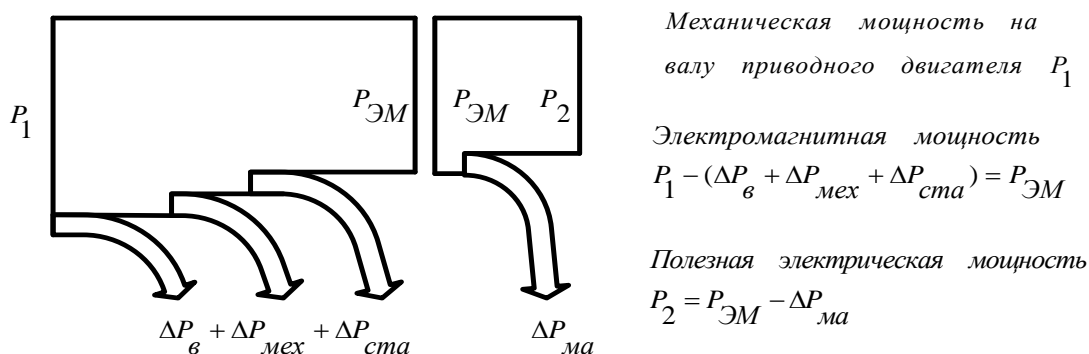


Рис. 4.8. Диаграмма преобразования мощности и уравнение напряжений генератора постоянного тока

В соответствии с приведенной диаграммой можно записать следующие уравнения:

$$P_1 - (\Delta P_B + \Delta P_{мех} + \Delta P_{ста}) = P_{ЭМ};$$

$$P_{ЭМ} - \Delta P_{ма} = P_{ЭМ} - I_a^2 \cdot R_a = P_2.$$

Преобразовав приведенные выражения, получим уравнение напряжений для генератора:

$$E \cdot I_a = U \cdot I_a + I_a^2 \cdot R_a$$

$$E = U + I_a \cdot R_a$$

### ЭДС обмотки якоря МПТ

При вращении якоря в магнитном поле, в проводниках обмотки якоря наводится ЭДС. На основании закона электромагнитной индукции, ЭДС МПТ пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения :

$$E_{\text{ПР}} = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot v = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \frac{\pi D}{2p} \cdot \frac{\omega}{2\pi}$$

$$E = E_{\text{ПР}} \cdot \frac{N}{2a} = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \frac{\pi D}{2p} \cdot \frac{\omega}{2\pi} = C \cdot \Phi \cdot \omega$$

где

$E_{\text{пр}}$  – ЭДС проводника,

$E$  – ЭДС обмотки якоря,

$C$  – машинная постоянная:

$$C = \frac{N \cdot p}{2\pi \cdot a}$$

При работе МПТ в режиме генератора, направление ЭДС определяется по правилу правой руки.

Направление действия силы на проводник с током, находящимся в магнитном поле определяется по правилу левой руки

### Электромагнитный момент и уравнение моментов МПТ.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле и соответствующий вращающий момент определяются по формулам

$$f_X = B_X \cdot l \cdot i_a$$

$$M_X = B_X \cdot l \cdot i_a \cdot \frac{D_a}{2}$$

Тогда с учетом числа проводников, находящихся под полюсом  $N/2p$ ,

находим электромагнитный момент машины  $M$ :

$$M = 2p \cdot \sum_1^{N/2p} M_X = 2p \cdot \sum_1^{N/2p} B_X \cdot l \cdot i_a \cdot \frac{D_a}{2} = 2p \cdot \frac{N}{2p} \cdot B_{\text{СР}} \cdot l \cdot i_a \cdot \frac{D_a}{2} =$$

$$= \frac{N \cdot p}{\pi} \cdot B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{N \cdot p}{2a \cdot \pi} \cdot B_{\text{СР}} \cdot l \cdot I_a \cdot \frac{\pi D_a}{2p} = C \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$C = \frac{N \cdot p}{2\pi \cdot a}$$

В генераторе электромагнитный момент является противодействующим, т.е. направлен в сторону, противоположную моменту приводного двигателя. Уравнение моментов генератора:

$$M_1 = M_0 + M$$

## Способы возбуждения генераторов постоянного тока (ГПТ)

По способу возбуждения ГПТ делятся на (рис.4.9) :

- ГПТ независимого возбуждения. Обмотка возбуждения питается от независимого источника. К этому типу генераторов относятся ГПТ с постоянными магнитами;
- ГПТ параллельного возбуждения. Обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря;
- ГПТ последовательного возбуждения; Обмотка возбуждения подключена последовательно с обмоткой якоря;
- ГПТ смешанного возбуждения. Генератор такого типа имеет две обмотки возбуждения – последовательную и независимую.

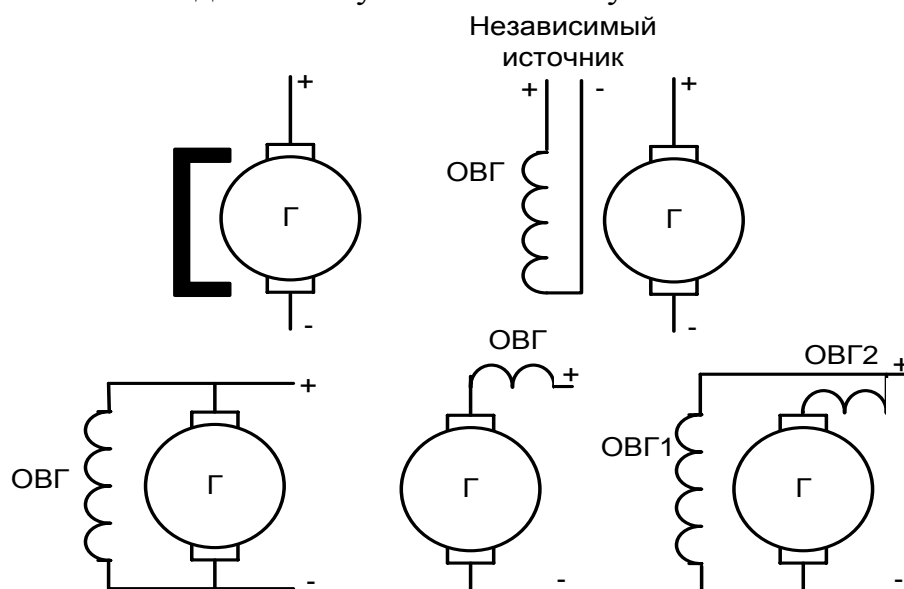


Рис. 4.9. ГПТ с постоянными магнитами;  
ГПТ параллельного, последовательного,  
смешанного возбуждения.

### Характеристики генератора независимого возбуждения.

**Характеристика холостого хода (ХХХ)** снимается в 4х квадрантах. Расчетная ХХХ проводится как средняя линия между нисходящей и восходящей линиями петли гистерезиса.

**Характеристика короткого замыкания ХКЗ.**

**Внешняя характеристика ВХ.** Напряжение на зажимах генератора при увеличении тока нагрузки и постоянном токе возбуждения ( $I_B = I_{BH} = \text{const}$ ) уменьшается из-за увеличивающегося падения напряжения якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

**Регулировочная характеристика РХ.** Зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянном напряжении. РХ показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении тока якоря напряжение оставалось постоянным.

**Нагрузочная характеристика НГ.** Зависимость напряжения от тока возбуждения при постоянном токе якоря, равном номинальному. НХ имеет такую же форму, как и ХХХ, но проходит ниже из-за падения напряжения в обмотке якоря и размагничивающего действия реакции якоря. Если к НГ добавить падение напряжения  $I_H R_a$ , то получим внутреннюю характеристику генератора и характеристический треугольник АВС. Катет АВ- соответствует падению напряжения в якоря, катет ВС- соответствует размагничивающему действию реакции якоря.

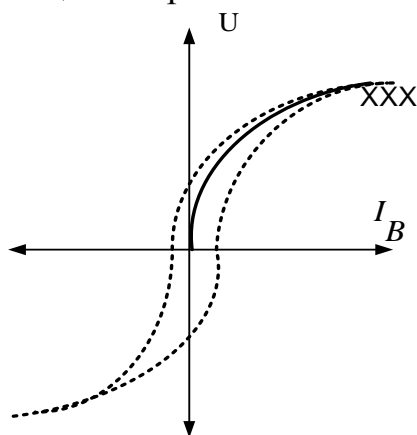


Рис. 4.10. Характеристика холостого хода

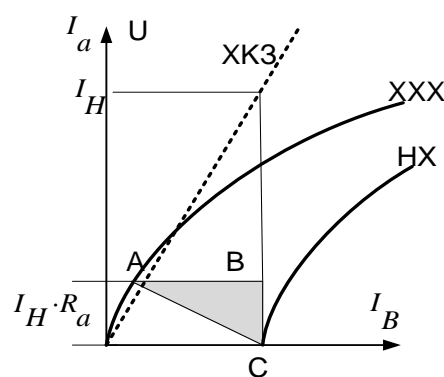


Рис. 4.11. Характеристика короткого замыкания, ХХХ, НХ

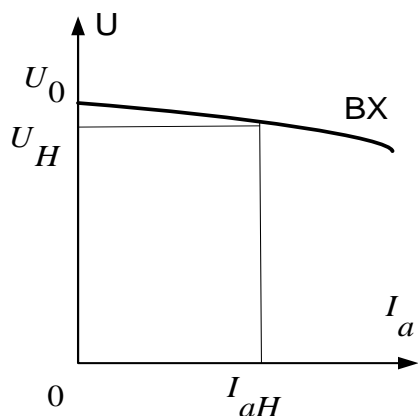


Рис. 4.12. Внешняя характеристика

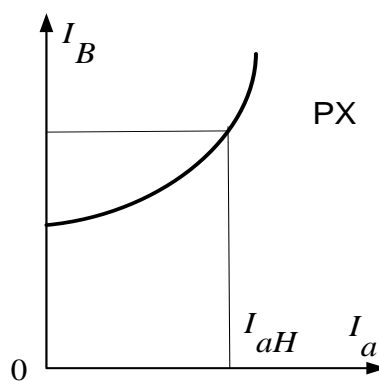


Рис. 4.13. Регулировочная характеристика

### Характеристики генераторов с самовозбуждением

К генераторам с самовозбуждением относятся генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.



Для того, чтобы произошло самовозбуждение, необходимо соблюдение следующих условий :

1. Наличие остаточного магнитного потока. Для самовозбуждения достаточно 2-3% от номинального,
2. Совпадение созданного и остаточного магнитных потоков по направлению,
3. Скорость вращения при данном сопротивлении обмотки возбуждения  $R_B$ , должна быть выше некоторого критического значения  $\omega > \omega_{KP}$ ,
4. Сопротивление цепи возбуждения при данной скорости вращения должно быть меньше критического  $R_B < R_{BKP}$

Процесс самовозбуждения происходит следующим образом: при вращении якоря в магнитном поле, в нем наводится ЭДС, под действием которой начинает протекать ток. Ток создает дополнительный магнитный поток, совпадающий по направлению с остаточным магнитным полем. Происходит дальнейшее увеличение ЭДС и тока  $I_B$ . Увеличение магнитного потока происходит до тех пор, пока не установится равновесие  $E = I_B R_B$

Графически процесс самовозбуждения при холостом ходе можно пояснить с помощью рис.4.14. Самовозбуждение ГПТ возможно при наличии точки пересечения XXX и характеристика цепи возбуждения ( $U_B = R_B I_B$ ).

В процессе самовозбуждения ток возбуждения увеличивается и нарастание  $U$  происходит сначала медленно, затем ускоряется и к концу процесса вновь замедляется из-за криволинейности XXX. Процесс самовозбуждения прекращается в точке пересечения характеристик.

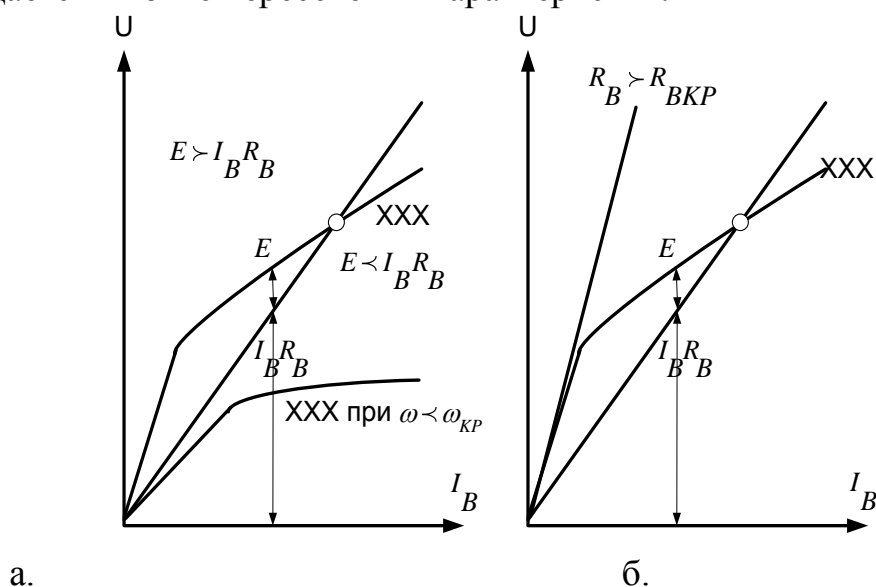


Рис. 4.14. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения при различных скоростях вращения (а) и при различных сопротивлениях цепи возбуждения (б)

## Лекция 4.5. Характеристики двигателей постоянного тока

### Принцип обратимости электрических машин

Принцип обратимости электрической машины сформулировал Э.Х.Ленц в 1833г. Принцип обратимости заключается в том, что любая электрическая машина может работать в генераторном и двигательном режимах. При работе машины в режиме генератора, она развивает электрический момент  $M_G$ , который является тормозным по отношению к вращающемуся моменту  $M_1$  приводного двигателя и преобразовывает подводимую к ней механическую мощность в электрическую. При работе в режиме двигателя, машина развивает вращающий момент  $M$  и преобразовывает подводимую к ней электрическую мощность в механическую.

### Классификация ДПТ

Двигатели постоянного тока классифицируются по способу включения обмотки возбуждения по отношению к якорю. ДПТ бывают (рис.4.15):

- независимого возбуждения (НВ). Обмотка возбуждения питается от независимого источника. К этому типу относятся ДПТ с постоянными магнитами;
- параллельного возбуждения. Обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря;
- последовательного возбуждения (ПВ). Обмотка возбуждения подключена последовательно с обмоткой якоря;
- смешанного возбуждения (СВ). Двигатель такого типа имеет две обмотки возбуждения – последовательную и независимую.

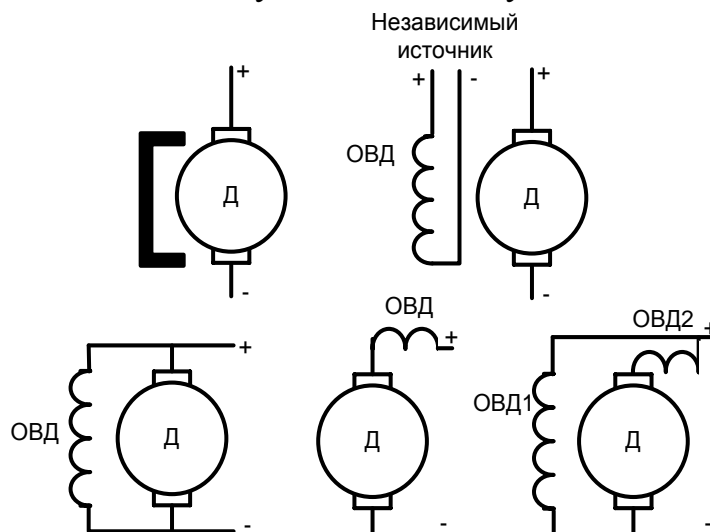


Рис. 4.15. ДПТ с постоянными магнитами;  
ДПТ независимого возбуждения , ДПТ параллельного возбуждения,  
ДПТ последовательного возбуждения ,  
ДПТ смешанного возбуждения

## Характеристики ДПТ параллельного возбуждения

Скоростная и механическая характеристики ДПТ параллельного возбуждения представлены на рис 4.16 ,а, б.

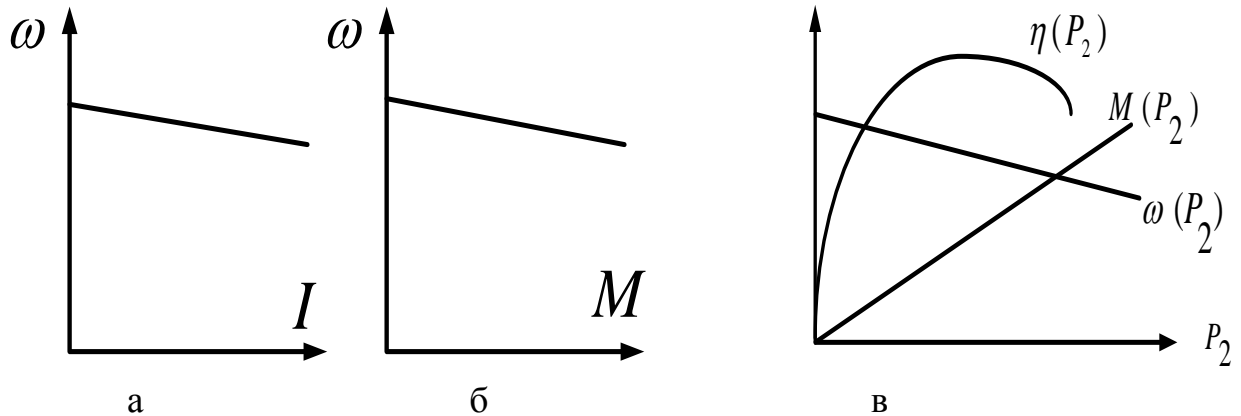


Рис. 4.16 Характеристики ДПТ параллельного возбуждения  
 а. скоростная характеристика  
 б. механическая характеристика  
 в. рабочие характеристики

На рис.4.16 в. представлены рабочие характеристики двигателя – зависимости КПД, скорости, вращающего момента от нагрузки при  $U=U_H=const$ . Регулировочные характеристики определяют собою свойства двигателей при регулировании скорости их вращения.

## Характеристики ДПТ смешанного возбуждения

Так как ток возбуждения последовательной обмотки возбуждения равен току якоря и изменяется одновременно с ним, то магнитный поток ДПТ последовательного возбуждения зависит от нагрузки, что составляет его характерную особенность:

$$I_a = I_B = I, \quad \Phi \approx k \cdot I,$$

то момент двигателя (рис. 4.17):

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_a = kCI^2 \text{ – параболa}$$

С учетом вышесказанного, можно записать уравнения для скоростной и механической характеристик:

Скоростная характеристика

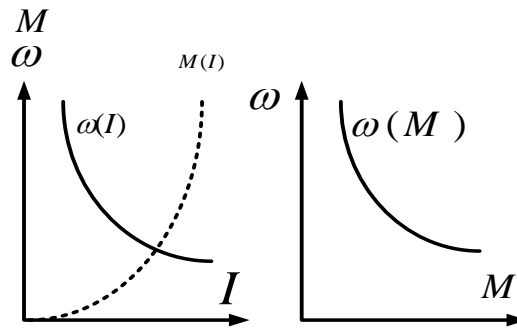
$$\omega = \frac{U - I \cdot R_a}{kCI} = \frac{U}{kCI} - \frac{R_a}{kC} \text{ – гипербола}$$

Механическая характеристика

$$\omega = \frac{U - I \cdot R_a}{kCI} = \frac{U}{kCI} - \frac{R_a}{kC} \text{ – гипербола}$$

При значительном уменьшении нагрузки, двигатель начинает развивать все большую скорость (идет «вразнос»). При холостом ходе поток стремится к

нулю и скорость двигателя приобретает значения, опасные по своим механическим последствиям – разрыв бандажей, порча обмотки якоря... Поэтому ДПТ последовательного возбуждения не должны работать на холостом ходу. ГОСТ устанавливает минимальную нагрузку на валу 25% от номинальной нагрузки, для предотвращения работы ДПТ в режиме холостого хода. Скоростная и механическая характеристики ДПТ последовательного возбуждения представлены на рис 4.17 ,а, б.



а б  
Рис. 4.17 Скоростная (а) и механическая (б) характеристики ДПТ последовательного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя – зависимости КПД, скорости, вращающего момента от нагрузки аналогичны рабочим характеристикам ДПТ параллельного возбуждения.

#### Характеристики ДПТ смешанного возбуждения

У ДПТ смешанного возбуждения имеется две обмотки возбуждения - последовательная и параллельная. Последовательная обмотка возбуждения может быть включена по отношению к параллельной (основной) обмотке как согласно, так и встречно. При согласном включении обмоток возбуждения их МДС складываются, вследствие чего результирующий поток возбуждения усиливается. При встречном включении обмоток результирующий поток представляет собой разность потоков параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

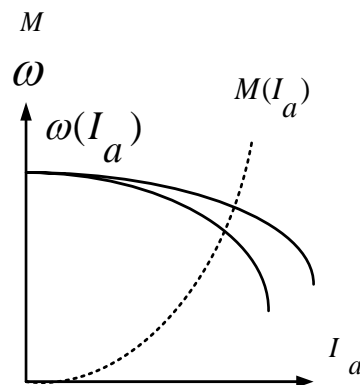


Рис. 4.18 Скоростная характеристика ДПТ смешанного возбуждения

## Механические характеристики электродвигателей и механизмов. Статическая устойчивость.

Главными частями электропривода механизма являются исполнительный механизм и электродвигатель, сообщающий механизму тот или иной вид движения. Для их согласованной работы необходима определенная взаимосвязь между механическими характеристиками двигателя ( $\omega = f(M)$ ) и исполнительного механизма ( $\omega = f_c(M_c)$ ), как в установившемся режиме работы, так и в переходных режимах. Под устойчивостью работы двигателя понимается его способность вернуться к исходному, установившемуся режиму работы. Установившийся режим работы характеризуется работой двигателя с неизменной скоростью. Значение скорости и момента в установившемся режиме электропривода определяются точкой пересечения механических характеристик двигателя и исполнительного механизма  $M = M_c$ , рис.4.19. В общем случае устойчивая работа электропривода обеспечивается при условии  $\frac{\Delta M}{\Delta \omega} < \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega}$ , рис.4.20.

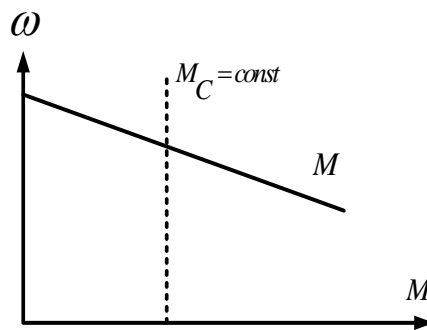


Рис. 4.19 Установившийся режим работы электропривода

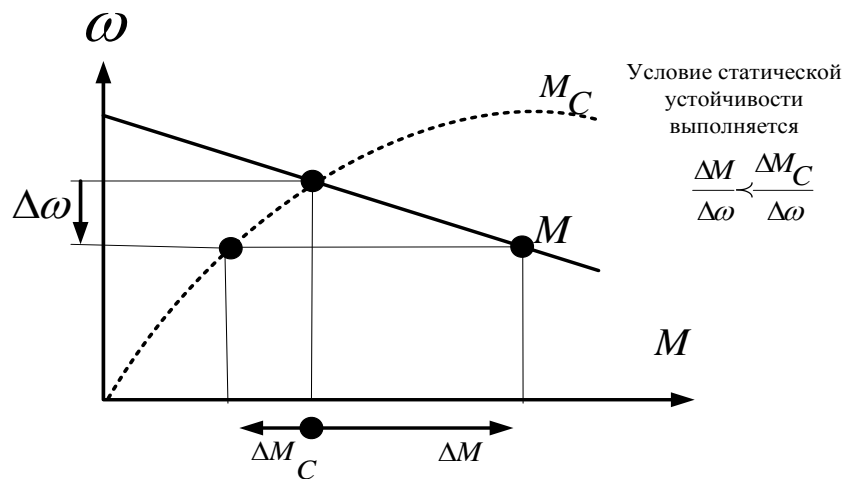


Рис. 4.20 Статическая устойчивость электропривода.

## Лекция 4.6. Пуск двигателей постоянного тока.

### Реостатный пуск

На основании скоростной характеристики двигателя при неподвижном роторе в начале пуска ток превышает номинальную величину в 20 и более раз  $I_{a\Pi} = \frac{U-E}{R_a} = \frac{U}{R_a} = 20I_{aH}$ . Пусковой момент также значительно превышает номинальное значение поскольку  $M_{\Pi} = C \cdot \Phi \cdot I_{a\Pi}$ . Поэтому для ограничения пускового тока и пускового момента в цепь ротора (якоря) вводят дополнительное сопротивление (пусковой реостат). Схема реостатного пуска ДПТ параллельного возбуждения приведена на рис.4.21, процесс пуска изображен на рис.4.22.

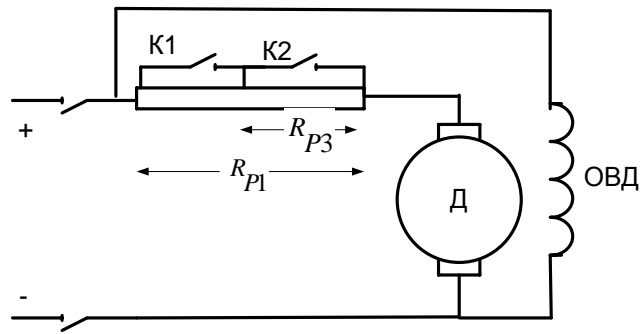


Рис. 4.21 Схема реостатного пуска ДПТ параллельного возбуждения

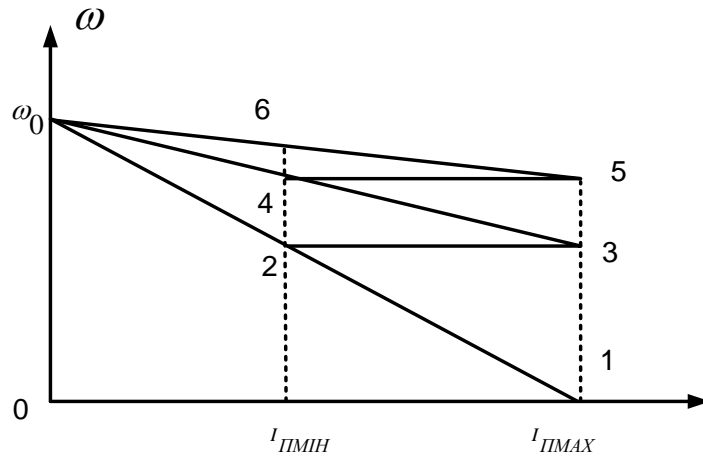


Рис. 4.22 Реостатный пуск ДПТ параллельного возбуждения

В момент пуска угловая скорость равна нулю. Тогда, с учетом пускового реостата, уравнение скоростной характеристики будет иметь вид:

$$\omega_1 = \frac{U - I_{ПМАХ} \cdot (R_a + R_{P1})}{C\Phi} = 0$$

Зная сопротивление якоря, можно определить необходимую величину пускового реостата:

$$R_{P1} = \frac{U}{I_{ПМАХ}} - R_a$$

Согласно рис.4.22, при пуске двигателя с данным пусковым реостатом, двигатель будет разгоняться по прямой на отрезке 1-2, и в точке 2 при достижении тока значения  $I_{ПМАХ}$ , первая ступень реостата отключается. Двигатель переходит на работу в точку 3. Расчет сопротивления реостата осуществляется по приведенным ниже формулам:

$$\omega_2 = \frac{U - I_{ПМИН} \cdot (R_a + R_{P1})}{C\Phi} = \omega_3 = \frac{U - I_{ПМАХ} \cdot (R_a + R_{P3})}{C\Phi},$$

$$R_{P3} = \frac{I_{ПМИН}}{I_{ПМАХ}} (R_a + R_{P1}) - R_a,$$

На участке прямой 3-1 двигатель продолжает разгон, в точке 4 пусковой реостат отключают и двигатель начинает работу на естественной характеристике. Последняя ступень реостата рассчитывается аналогично:

$$\omega_4 = \frac{U - I_{ПМИН} \cdot (R_a + R_{P3})}{C\Phi} = \omega_5 = \frac{U - I_{ПМАХ} \cdot (R_a)}{C\Phi}$$

### Пуск при плавном повышении напряжения

Плавный пуск ДПТ возможен при повышении подводимого напряжения от 0 до номинального значения. Представленная на рис.4.23. схема плавного пуска включает в себя питание ДПТ от управляемых выпрямителей. Для осуществления плавного пуска ДПТ также применяется система Г-Д

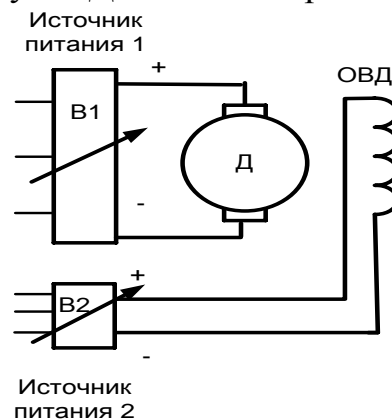


Рис. 4.23 Пуск ДПТ при плавном повышении напряжения

## Лекция 4.7. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Из уравнения скоростной характеристики следует, что частоту вращения двигателей постоянного тока можно регулировать тремя способами:

- изменением реостата в цепи якоря;
- изменением напряжения сети;
- изменением потока возбуждения.

Скоростные и механические характеристики двигателей, снятые при номинальном напряжении, номинальном магнитном потоке, отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря называются естественными. При введении добавочного сопротивления в цепь якоря, или же изменении других номинальных параметров (напряжения, потока) получают семейство искусственных скоростных и механических характеристик двигателя постоянного тока.

При введении добавочного сопротивления в цепь якоря получаем семейство реостатных характеристик.

### Регулирование частоты вращения изменением сопротивления в цепи якоря

**ДПТ параллельного возбуждения.** Схема реостатного регулирования ДПТ параллельного возбуждения представлена на рис.4.24.

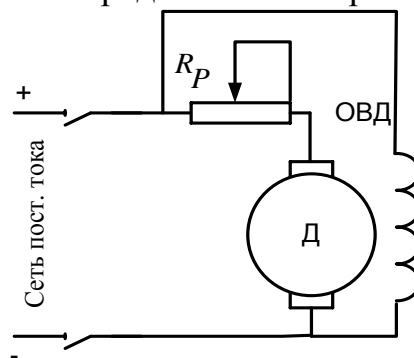


Рис.4.24. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи якоря

Для двигателя параллельного возбуждения уравнение скоростной характеристики имеет вид

$$\omega = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_P)}{C\Phi}$$

Величину угловой скорости на естественной характеристике при отсутствии реостата в цепи якоря и на искусственной характеристике при включенном сопротивлении реостата можно определить следующим образом:



$$\omega_1 = \frac{U - I_a \cdot R_a}{C\Phi}$$

$$\omega_2 = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_P)}{C\Phi}$$

На основании чего, можно рассчитать отношение скоростей на естественной характеристике при отсутствии реостата в цепи якоря и на искусственной характеристике при включенном сопротивлении реостата. При регулировании частоты вращения реостатом в цепи якоря подводимая к двигателю из сети мощность  $P_1 = UI_a$  остается без изменений, полезная мощность двигателя уменьшается пропорционально угловой скорости  $P_2 = M_2\omega$ . КПД снижается пропорционально снижению частоты вращения, ухудшаются условия охлаждения, возможна неустойчивая работа при значительном снижении частоты вращения, диапазон регулирования зависит от нагрузки, а скорость холостого хода вообще не регулируется (рис.4.25.).

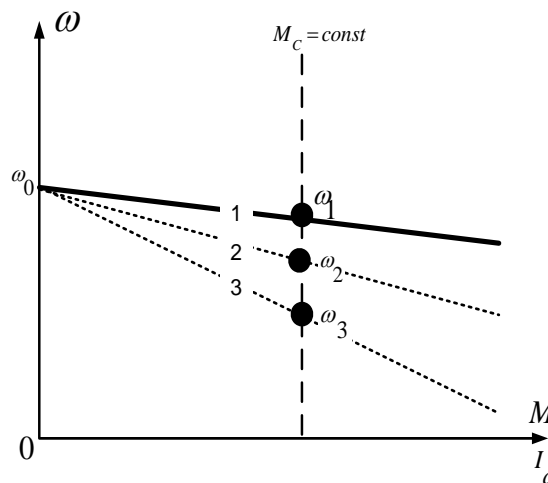


Рис.4.25. Скоростные (механические) характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании частоты вращения реостатом в цепи якоря

Сопротивление якоря не является паспортной величиной. Для расчетов его приближенное значение можно определить, исходя из предположения о равенстве постоянных и переменных потерь:

$$\Delta P_{Ma} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{2} = \frac{U_H \cdot I_H - P_H}{2} = 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot U_H \cdot I_H = I_{aH}^2 R_a,$$

$$R_a = \frac{0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot U_H \cdot I_H}{I_{aH}^2} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_H}$$

**ДПТ последовательного возбуждения.** Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения реостатом в цепи якоря

представлено на рис.4.26. Для двигателя последовательного возбуждения процесс реостатного регулирования усложняется тем, что одновременно с током якоря изменяется ток возбуждения. Уравнение скоростной характеристики двигателя последовательного возбуждения для данного способа регулирования имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{C \cdot K \cdot I} - \frac{(R_a + R_P)}{C \cdot K}$$

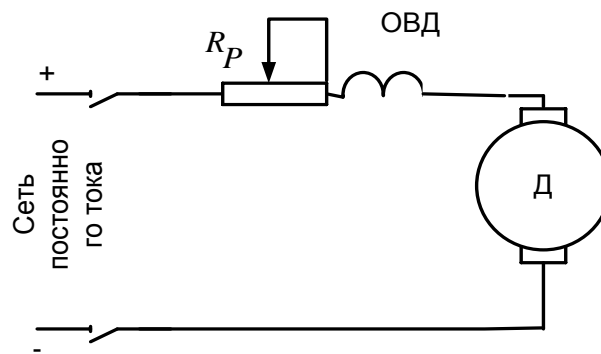


Рис.4.26. Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения реостатом в цепи якоря

Скоростные (механические) характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании частоты вращения реостатом в цепи якоря представлены на рис. 4.27.

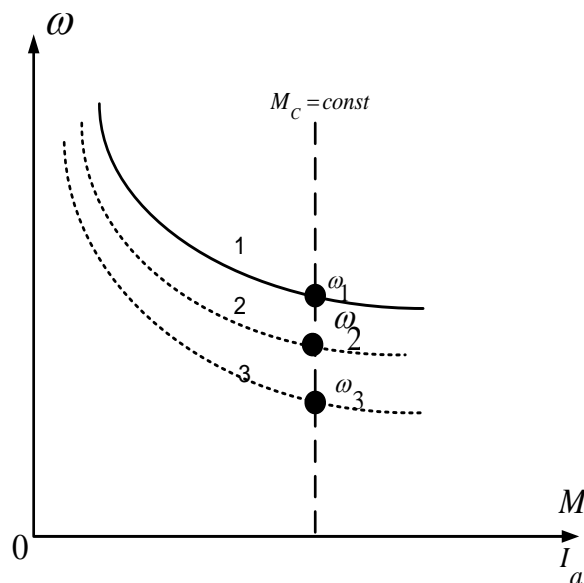


Рис.4.27. Скоростные (механические) характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании частоты вращения реостатом в цепи якоря

## Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения изменением магнитного потока

На рис 4.28. представлена схема регулирования частоты вращения двигателя параллельного возбуждения изменением магнитного потока при постоянном напряжении. Магнитный поток уменьшается, при введении сопротивления в цепь обмотки возбуждения, при этом частота вращения увеличивается.

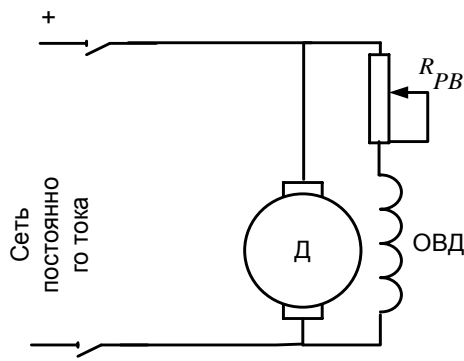


Рис.4.28. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения изменением магнитного потока

Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании изменением магнитного потока представлены на рис.4.29. Регулирование однозонное вверх от основной скорости. Диапазон регулирования в данном случае не более 1:3, так как при сильном ослаблении магнитного потока нарушается устойчивость работы двигателя.

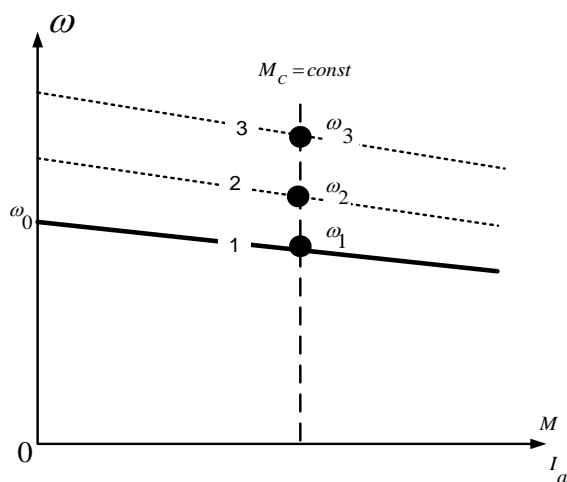


Рис.4.29. Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании изменением магнитного потока

## Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения изменением магнитного потока

Существует два способа регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения изменением магнитного потока :

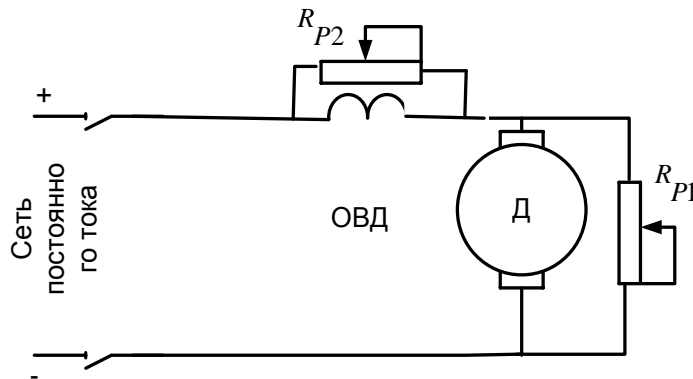


Рис.4.30. Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения изменением магнитного потока

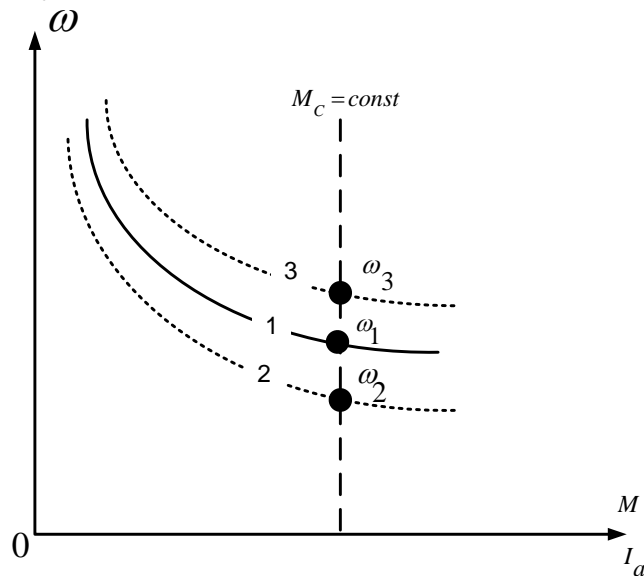


Рис. 4.31. Механические (скоростные) характеристики двигателя последовательного возбуждения при регулировании изменением магнитного потока

При шунтировании обмотки возбуждения ток обмотки становится меньше тока якоря, увеличивается подводимая к двигателю мощность  $P_1 = UI_a$ , полезная мощность  $P_2 = M_2\omega$ . КПД двигателя почти не изменяется. Шунтирование обмотки возбуждения применяется в электротяге.

При шунтировании обмотки якоря ток якоря становится меньше тока обмотки возбуждения. В этом случае потребляемая двигателем мощность  $P_1 = UI_a$  увеличивается, полезная мощность двигателя  $P_2 = M_2\omega$  уменьшается. Регулирование однозонное вниз. Диапазон регулирования в данном случае составляет 1:5

## Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения изменением напряжения и магнитного потока

Для такого способа регулирования частоты вращения обычно применяется система Г-Д (рис.4.32)

Функции системы Г-Д:

- 1) пуск с плавным повышением напряжения от 0 до номинального при полном возбуждении двигателя,
- 2) двухзонное регулирование частоты вращения двигателя: 1 зона - от 0 до  $\omega_H$  плавным изменением напряжения на двигателе при постоянном номинальном токе возбуждения двигателя  $I_B = I_{BH} = const$  и 2 зона - от  $\omega_H$  вверх изменением (уменьшением) тока возбуждения двигателя при постоянном напряжении на двигателе  $U = U_H = const$ , (рис.4.32),
- 3) реверсирование двигателя изменением полярности подводимого к двигателю от генератора напряжения,
- 4) рекуперативное торможение при снижении ЭДС генератора путем уменьшения тока возбуждения генератора.
- 5) Система обеспечивает широкий диапазон регулирования частоты вращения двигателя, особенно в автоматической системе регулирования с обратными связями по току и частоте вращения двигателя.

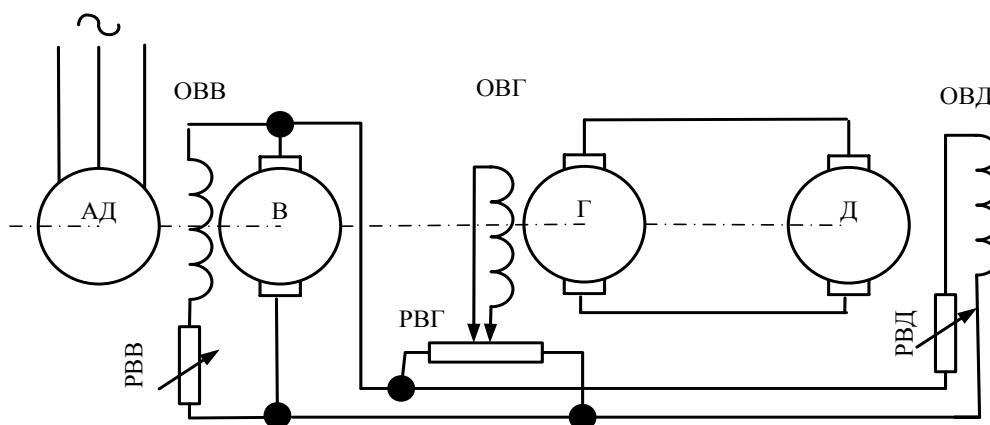


Рис.4.32. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения изменением напряжения и магнитного потока в системе Г-Д

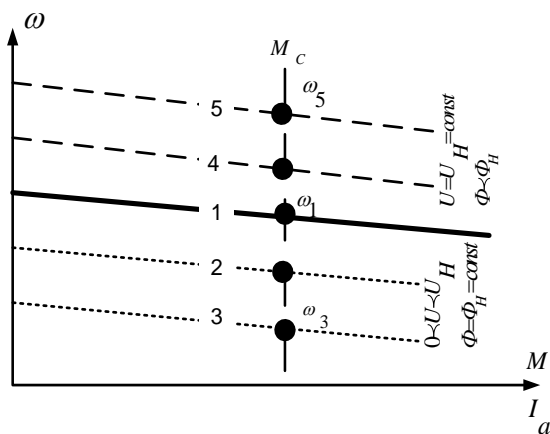


Рис.4.33. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании частоты вращения изменением напряжения и магнитного потока в системе Г-Д

Система ГД позволяет получить быстрый пуск и реверсирование исполнительного двигателя. Для осуществления реверса достаточно изменить на обратное направление ток возбуждения генератора. Торможение двигателя также производится путем регулирования напряжения генератора (рекуперативное торможение).

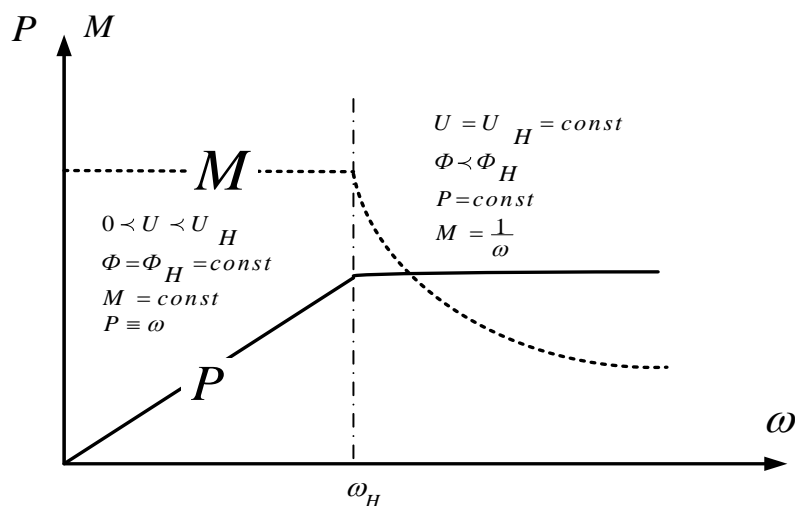


Рис.4.34. Характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании частоты вращения изменением напряжения и магнитного потока в системе Г-Д

Характеристики двигателя параллельного возбуждения при регулировании частоты вращения изменением напряжения и магнитного потока в системе Г-Д представлены на рис.4.34.

При изменении напряжения поток возбуждения остается неизменным, поэтому в этой зоне характеристика момента и мощности представляют собой прямые, далее, при изменении потока возбуждения при неизменном напряжении, подводимая мощность остается постоянной, момент будет изменяться по гиперболическому закону.

## Лекция 4.8. Торможение двигателей постоянного тока.

В ряде установок режимы электрического торможения двигателей имеют существенное значение. Существует следующие виды торможения двигателей постоянного тока :

- динамическое;
- противовключением;
- рекуперативное (генераторное) с возвратом электроэнергии в сеть.

### Динамическое торможение

При динамическом торможении ДПТ параллельного возбуждения якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление  $R_{PB}$ , а ток в цепи возбуждения оставляют без изменения (рис.4.35). Машина начинает работать в режиме генератора независимого возбуждения, используя запас кинетической энергии агрегата.

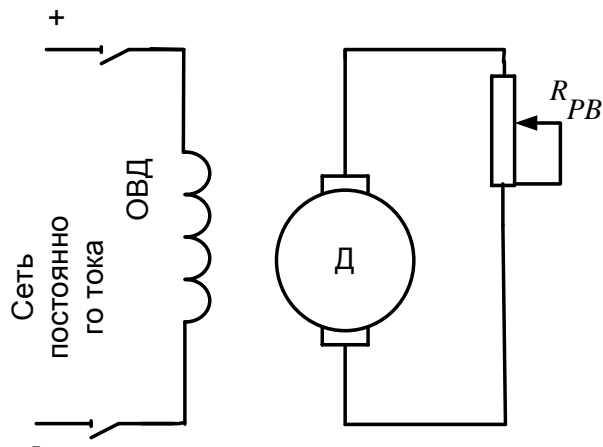


Рис.4.35. Динамическое торможение двигателя параллельного возбуждения

Уравнение напряжений ДПТ в общем виде:  $C\Phi\omega = U - I_a \cdot (R_a + R_P)$ .

При динамическом торможении и  $U = 0$  уравнение напряжений ДПТ принимает вид :

$$C\Phi\omega = -I_a \cdot (R_a + R_P),$$

откуда

$$I_a = -\frac{C\Phi\omega}{(R_a + R_P)}$$

Вращающий момент  $M = C \cdot \Phi \cdot I_a < 0$  становится отрицательным, т.е. тормозящим. Торможение интенсивное. Время торможения можно регулировать сопротивлением в цепи якоря. Торможение остановочное. Сопровождается потерей запасенной вращающимся ротором энергии. Эта энергия идет на нагрев реостата и обмотки якоря. Торможение неэкономичное. Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при динамическом торможении приведены на рис. 4.36. Режим динамического торможения изображен отрезком 2-3.

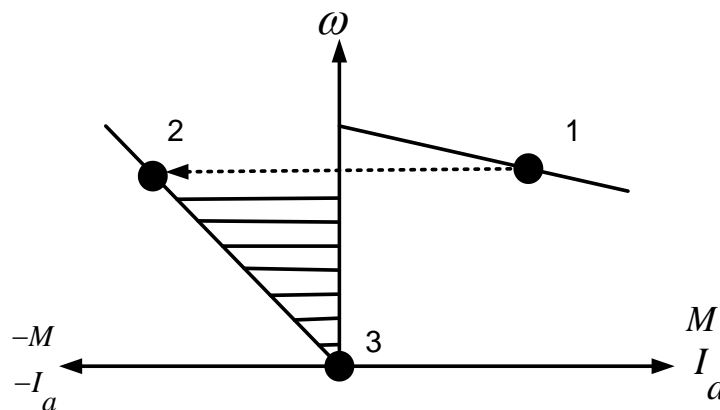


Рис.4.36. Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при динамическом торможении

### Торможение противовключением

Режим торможения противовключением осуществляется двумя способами:

- когда исполнительный механизм приводит машину во вращение в сторону, противоположную той, в какую действует развиваемый двигателем момент (например, при включении в цепь якоря двигателя, поднимающего груз, достаточно большого сопротивления) ;
- при переключении направления вращения двигателя на противоположное путем изменения направления тока в якоря.

Уравнение напряжений  $C\Phi\omega = U - I_a \cdot (R_a + R_P)$  при торможении противовключением ( $U < 0$ ) принимает вид

$$C\Phi\omega = -U - I_a \cdot (R_a + R_{PT}),$$



откуда

$$I_a = -\frac{U + C\Phi\omega}{(R_a + R_p)} < 0$$

Вращающий момент  $M = C \cdot \Phi \cdot I_a < 0$  становится тормозящим. Торможение интенсивное. Время торможения можно регулировать сопротивлением в цепи якоря. Торможение остановочное.

Подводимая к двигателю со стороны сети и с вала мощность теряется, т.е. расходуется на нагрев реостата и обмотки якоря. Торможение неэкономичное.

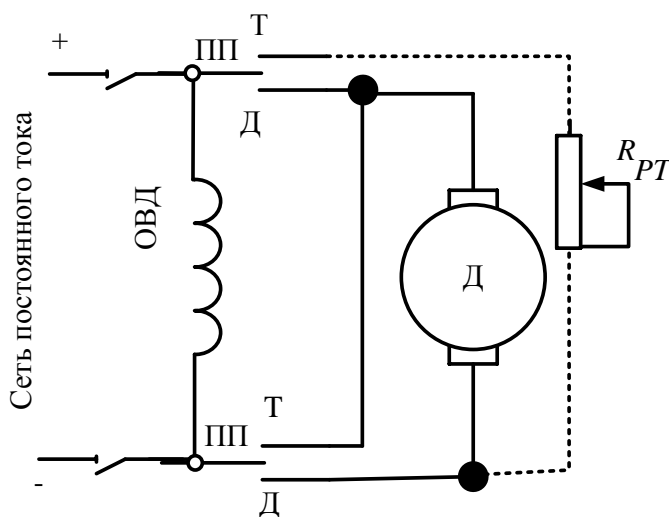


Рис.4.37. Торможение двигателя параллельного возбуждения противовключением

Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при торможении противовключением представлены на рис.4.38. В данном случае при необходимости затормозить двигатель необходимо контролировать частоту вращения ротора и производить отключение ДПТ при скорости ротора равной нулю (отрезок 2-3).

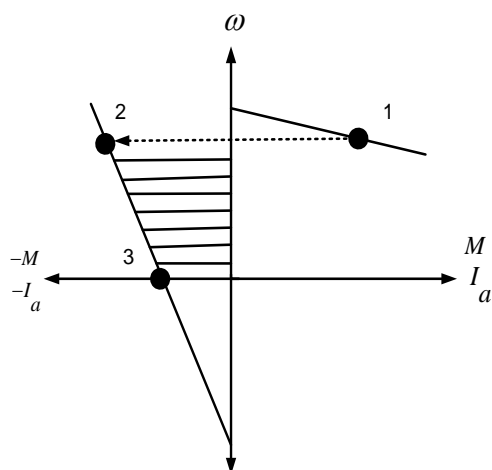


Рис.4.38. Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при торможении противовключением

### Рекуперативное (генераторное) торможение

Такой вид торможения для ДПТ параллельного возбуждения применяется, например, когда машина, работающая в режиме двигателя со скоростью  $n_1$  переходит на работу с более низкой скоростью  $n_2$

Решение уравнения напряжений  $E = U - I_a \cdot (R_a + R_p)$  при рекуперативном торможении при  $\omega > \omega_0$  и  $E = C\Phi\omega > U$  имеет вид

$$I_a = -\frac{U - C\Phi\omega}{R_a} < 0$$

Вращающий момент  $M = C \cdot \Phi \cdot I_a < 0$  становится тормозящим. Торможение интенсивное. Торможение может применяться как для остановки, так и для подтормаживания. Энергия торможения возвращается в сеть. Торможение экономичное.

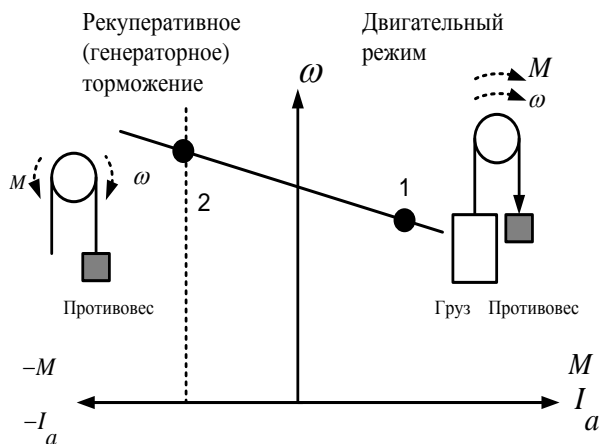


Рис.4.39. Механические (скоростные) характеристики двигателя параллельного возбуждения при рекуперативном (генераторном) торможении

**ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**  
учебно-методического комплекса  
по дисциплине «**Электрические машины**»  
для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

## Задачи для практических занятий

### Машины постоянного тока

Номинальные данные двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: мощность  $P_{2H}$ , напряжение  $U_H$ , частота вращения (таблица 1).

Таблица 1

Последняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2H}$ , кВт	10	8	12	22	30	37	45	55	75	90
Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_H$ , В	110	110	110	220	220	220	440	440	440	440
$n_H$ , об/мин	3000	1500	750	750	1000	3000	1000	750	1500	3000

Сопротивление якорной цепи  $R_{я*} = 0,029$  о.е. (относительных единиц); сопротивление обмотки возбуждения  $R_{в*} = 20$  о.е.; номинальный ток возбуждения  $I_{BH}$  составляет 3,5% номинального тока якоря  $I_{ЯH}$ ; к п д  $\eta_H = 0,87$ ; механические потери равны 2% от номинальной мощности. Кривая намагничивания двигателя приведена в таблице 2.

Таблица 2

$I_B / I_{BH}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$E_Y / E_{ЯH}$	0	0,36	0,65	0,82	0,93	1,0	1,06

Требуется:

- 1) рассчитать и построить механическую и скоростную характеристики;
- 2) определить максимальный КПД и при какой нагрузке он будет;
- 3) определить сопротивление реостата в цепи возбуждения, который позволяет изменять ток возбуждения от  $I_B = 0,5 I_{BH}$  до  $I_B = I_{BH}$ ;
- 4) построить кривую намагничивания в именованных единицах;
- 5) определить сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток  $I_{ЯП} = 2I_{ЯH}$ ;
- 6) определить частоту вращения и потери в якорной цепи при номинальном моменте и моменте, равном 50% номинального, если в цепи якоря включен реостат с сопротивлением согласно п.5;
- 7) определить частоту вращения при номинальном моменте, если вывести реостат в цепи возбуждения;
- 8) определить частоту вращения и потери в якорной цепи при номинальном моменте, если в цепь обмотки возбуждения введен реостат, сопротивление которого равно сопротивлению обмотки возбуждения.

## Методические указания

Сопровитления даны в долях от номинального сопротивления  $R_H = U_H / I_{ЯН}$ , при  $20^{\circ}\text{C}$ . Их нужно привести к температуре  $75^{\circ}\text{C}$ . Номинальный ток якоря  $I_{ЯН}$  легко найти через номинальную потребляемую мощность  $P_{1Н} = U_H(I_{ЯН} + I_{ВН})$ .

При расчете скоростной характеристики произведение конструктивной постоянной ЭДС на магнитный поток  $C_e \Phi$  можно найти из уравнения для частоты вращения в номинальном режиме:

$$n_H = \frac{U_H - I_{ЯН} R_a}{C_e \Phi} = \frac{E_H}{C_e \Phi}.$$

Здесь  $n_H$  – в об/с.

При построении механической характеристики необходимо учесть, что конструктивные постоянные ЭДС  $C_e$  и момента  $C_m$  связаны между собой.

Расчет характеристик нужно производить, задаваясь значениями полезного момента  $M_2$ , равными: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 от номинального  $M_{2Н} = P_{2Н} / \Omega_H$ , где  $\Omega_H$  – номинальная угловая скорость.

Прибавив к этому моменту момент холостого хода, по механической характеристике можно найти соответствующую частоту вращения, а затем полезную мощность. Ток находят из выражения:

$$M_2 + M_x = C_e \Phi I_a.$$

Момент холостого хода равен:

$$M_x = \frac{\Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{ст}}}{\Omega_H}.$$

Суммарные потери в двигателе состоят из электрических потерь в якоре и на возбуждение, потерь в стали, механических, добавочных и в щеточном контакте:

$$\Delta P = I_{ЯН}^2 R_{Я} + I_{В}^2 R_{В} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{щ}}.$$

Потери в щеточном контакте можно принять равными:

$$\Delta P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{Я} = 2 I_{Я}.$$

Добавочные потери в номинальном режиме принимаются равными 1% от подведенной мощности. При других нагрузках они пересчитываются пропорционально квадрату тока якоря.

При решении задач, связанных с изменением тока возбуждения, следует пользоваться кривой намагничивания.

## Трансформаторы

По данным таблицы 3 для трехфазного двухобмоточного трансформатора требуется:

1. Для номинальной мощности трехфазного трансформатора определить фазные и линейные значения напряжений и токов, а также коэффициент трансформации.

2. Схемой и векторными диаграммами подтвердить заданную группу соединения трансформатора, а также установить группу соединения при перемене местами начал и концов фаз одной из обмоток трансформатора.

3. Определить параметры и вычертить схему замещения трансформатора, приняв ее симметричной.

4. Рассчитать значения КПД для  $\cos\varphi_n=0,8$  при коэффициентах загрузки  $K_{из}=0,25, 0,75, 1,0$ . Определить максимальный КПД и соответствующее ему значение нагрузки.

5. Рассчитать токи короткого замыкания, установившийся и ударный, а также их кратности. Короткое замыкание произошло при холостом ходе.

6. Данный трансформатор включен на параллельную работу с другим трансформатором такой же мощности.

6.1. Определить распределение нагрузок между параллельно работавшими трансформаторами, если  $U_k$  одного из трансформаторов отличается на 15% от заданного в таблице, а нагрузка равна сумме их номинальных мощностей.

6.2. Оценить величину уравнивающего тока при включении на параллельную работу трансформаторов, принадлежащих к разным группам (группа второго трансформатора отличается на два часа по сравнению с группой заданного трансформатора).

Таблица 3

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность, к ВА	400	630	1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000	25000
Потери холостого хода, к Вт	1,35	2,00	2,75	3,65	5,10	6,70	27,3	14,5	21,0	29,0
Потери короткого замыкания, к Вт	5,5	7,6	12,2	18	23,5	33,5	55,16	85	105	145
Ток холостого хода, %	2,1	2,0	1,5	1,4	1,1	1,0	37,2	0,8	0,75	0,7

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первичное номинальное напряжение, к В	6,0	6,0	10,0	10,0	10,0	20,0	20,0	20,0	20,0	35,0
Вторичное номинальное напряжение, к В	0,23	0,40	0,23	0,40	6,30	0,23	0,40	10,50	6,30	10,50

### Методические указания

При определении линейных и фазных значений напряжений и токов необходимо принять во внимание, что в таблице 3 данные относятся к трехфазному трансформатору.

Коэффициент трансформации можно считать приблизительно равным отношению фазных напряжений на зажимах двух обмоток в режиме холостого хода.

Группа соединения обмоток трансформатора - угловое смещение векторов линейных электродвижущих сил обмоток (сторон) среднего и низшей напряжений по отношению к векторам соответствующих электродвижущих сил обмоток (стороны) высшего напряжения.

При построении заданной группы соединения трансформатора принято, что направление, в котором намотаны обмотки высшего и низшего напряжения совпадают; кроме того одноименные фазы расположены на одном стержне.

Параметры схемы замещения определяются с использованием данных холостого хода и короткого замыкания. Расчеты параметров производятся на одну фазу (потери мощности, ток и напряжение). Симметричность схемы замещения предполагает соотношения между сопротивлениями трансформатора:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2}, \quad X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2}.$$

Для расчетов КПД трансформатора используется известное выражение. КПД достигает максимума при такой нагрузке, когда потери в меди равны потерям в стали. Для определения максимального значения КПД необходимо в выражение для КПД трансформатора подставить значение  $K_{нг}$ , соответствующее максимуму КПД

Ударный ток короткого замыкания - наибольшее мгновенное значение тока КЗ, определяемое как сумма мгновенных значений вынужденного тока и свободного тока в процессе короткого замыкания. Наибольший ударный ток КЗ - ударный ток КЗ при наибольшем вынужденном токе и наибольшем возможном или установленном нормативным документом свободном токе. Наступает через  $t=0,01$  с. после короткого замыкания. Кратность установившегося тока короткого замыкания - отношение установившегося тока короткого замыкания трансформатора к номинальному току.

Нагрузка между трансформаторами, включенными на параллельную работу, распределяется обратно пропорционально их напряжениям короткого замыкания.

При включении на параллельную работу трансформаторов, принадлежащих к разным группам соединений, в трансформаторах протекает уравнительный ток, величина которого превышает номинальное значение тока в несколько раз.

## Асинхронные машины

1. Номинальные данные трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором: мощность  $P_H$ , напряжение  $U_H$ , число пар полюсов (таблица 4), частота  $f_H = 50$  Гц, КПД  $\eta = 89\%$ ,  $\cos \varphi_H = 0,89$ , схема соединения обмоток - звезда. Сопротивления Т-образной схемы замещения в относительных единицах:  $R_{1*} \approx R_{2*}' = 0,03$  о.е.;  $X_{1*} \approx X_{2*}' = 0,18$  о.е.;  $X_{0*} = 6,0$  о.е.;  $R_{0*} = 1,3$  о.е. Отношение эффективных чисел витков статора и ротора равно 2.

Таблица 4

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_H$ , кВт	11,0	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0	90,0
Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_H$ , В	660	660	660	380	380	380	380	220	220	220
$p$ , пар полюсов	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3

Требуется:

- 1) Начертить схему замещения двигателя и указать в ней значения сопротивлений в Ом, предварительно определив их. В качестве базисной величины сопротивления принять  $Z_0 = U_0 / I_0 = U_{инф} / I_{инф}$ .
- 2) Записать уравнения напряжений и токов и построить векторную диаграмму, соответствующую номинальной нагрузке.
- 3) Определить сопротивление пускового реостата, при котором двигатель развивает наибольший пусковой момент. Определить этот момент, пусковой ток при этом. Начертить схему включения.

2. По номинальным данным асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором  $P_H$ ,  $p$ ,  $U_H$  (таблица 4), схема соединения обмотки статора - звезда, а также  $\eta = 90\%$ ,  $\cos \varphi_H = 0,9$ ,  $S_H = 0,03$ ,  $f_H = 50$  Гц, кратности максимального момента  $K_M = 2$ , пускового момента  $K_P = 1$ , пускового тока  $I_P = 7$ :

- 1) Определить номинальный, критический момент и скольжения, а также пусковой момент и ток, полагая  $\Delta P_{мех} \approx 0,02 P_H$ ;
- 2) Построить механическую характеристику двигателя  $M = f(n)$ ;
- 3) Выбрать способ пуска (прямой, реакторный и трансформаторный), если допустимый ток сети  $I_{с доп} = 0,8 I_P$ , а момент нагрузки на валу двигателя  $M_c = 0,7 M_H = \text{const}$ ;
- 4) Определить начальный тормозной момент при торможении противовключением после работы в установившемся режиме с номинальной частотой вращения.

## Методические указания

Расчеты режимов работы асинхронных машин основываются на



уравнениях ЭДС и МДС, схеме замещения и векторной диаграмме, как и расчеты трансформаторов. В отличие от трансформаторов здесь

$$Z_{HГ}' = R_2' \frac{1-S}{S};$$

$$R_2' = R_2 K_e K_i;$$

$$X_2' = X_2 K_e K_i;$$

где  $K_e, K_i$ - коэффициенты трансформации по напряжению и току.

При расчетах режимов асинхронных машин удобнее пользоваться Г-образной схемой замещения.

На основании схемы замещения можно определить мощности и потери в машине: механическая мощность

$$P_{мех} = 3I_2'^2 R_2' (1-S)/S,$$

полезная мощность в двигательном режиме

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех},$$

подведенная мощность

$$P_2 = 3U_1 I_1 \cos \varphi;$$

потери в меди и стали

$$\Delta P_m = 3I_2'^2 (R_1 + R_2');$$

$$\Delta P_c = 3I_0^2 R_0.$$

Механическая характеристика асинхронной машины определяется выражением:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2' / S}{\Omega_1 \left[ (R_1 + R_2' / S)^2 + X_K^2 \right]}.$$

Здесь  $\Omega_1$  – угловая скорость магнитного поля.

Величина электромагнитного момента может быть также определена в зависимости от механической или электромагнитной мощности

$$M = P_{мех} / \omega = P_{эм} / \Omega_1.$$

В частности, номинальный момент

$$M_{ном} = (P_{2н} + \Delta P_{мех}) / \Omega_n.$$

В зависимости от параметров схемы замещения и соотношения потерь определяются некоторые значения скольжения

$$S = \Delta P_{м2} / P_{эм};$$

номинальное скольжение

$$S_n \approx R_2'^*;$$

критическое скольжение

$$S_K = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_2'^2 + X_K^2}};$$

В приведенных выражениях  $R_2'$  - относительное сопротивление ротора;  $\Delta P_{\text{мех}}$  - механические и добавочные потери;  $\Delta P_{\text{м2}}$  - потери в меди ротора.

Выражение механической характеристики в относительных величинах - формула Клосса

$$\frac{M}{M_K} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

### Синхронные машины

**Построить практическую векторную диаграмму (Потье) неявнополюсного синхронного генератора с номинальными данными: мощностью  $S_H$ , линейным напряжением  $U_H$ ,  $\cos\varphi_H$ , с индуктивной нагрузкой (таблица 5).**

Другие параметры генератора:  $f_H=50$  Гц,  $p=1$ ,  $X\sigma=0,2$  о.е.,  $R_1 \approx 0$ ,  $w_1 k_{01}/w_2=0,5$ , схема соединения обмотки якоря - звезда. Обмотанная часть ротора составляет 2/3 полюсного деления. Характеристика холостого хода совпадает с нормальной ХХХ.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_H$ , МВА	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_H$ , кВ	3,3	3,3	3,3	6,6	6,6	6,6	6,6	10,5	10,5	10,5
$\cos\varphi$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Таблица 6

$i_B$ , о.е.	0	0,5	1	1,5	2	2,5
$e_1$ , о.е.	0	0,58	1	1,21	1,33	1,4

При холостом ходе номинальное напряжение на зажимах генератора достигается при токе возбуждения  $I_{BO}=0,5I_{H}$ . Построить характеристику короткого замыкания, проходящую через начало координат и точку  $I_{B^*}=1$ ,

$$I_{1*}=1,3.$$

Требуется:

1. Определить ненасыщенное и насыщенное индуктивное синхронное сопротивление, Ом, коэффициент насыщения, ток возбуждения, А, соответствующий номинальному напряжению при номинальной нагрузке, напряжение холостого хода,  $V$ , при этом токе возбуждения и номинальное изменение напряжения, В, о.к.з.;
2. Построить регулировочную и внешнюю характеристики генератора.
3. Определить активную и реактивную мощность, отдаваемую генератором в сеть при номинальных условиях.

### Методические указания

Практическая векторная диаграмма (диаграмма Потье) - это векторная диаграмма, совмещенная с характеристикой холостого хода машины. Она строится в относительных единицах. Вектор номинального напряжения  $U_{1*}=U_{H*}=1$  о.е. совмещается с осью ординат, вектор номинального тока  $I_{1*}=I_{1*}=1$  о.е. строится под углом  $\varphi + \delta$  с учетом характера нагрузки. В качестве базисных величин для пересчёта в относительные единицы принимают:

$$U_{\sigma} = U_{нф} = \frac{U_H}{\sqrt{3}}; \quad I_{\sigma} = I_{нф} = \frac{S_H}{3U_{нф}}; \quad Z_{\sigma} = U_{нф} / I_{нф}.$$

По диаграмме находят ЭДС  $E_{\delta}$  от результирующего магнитного потока и воздушном зазоре

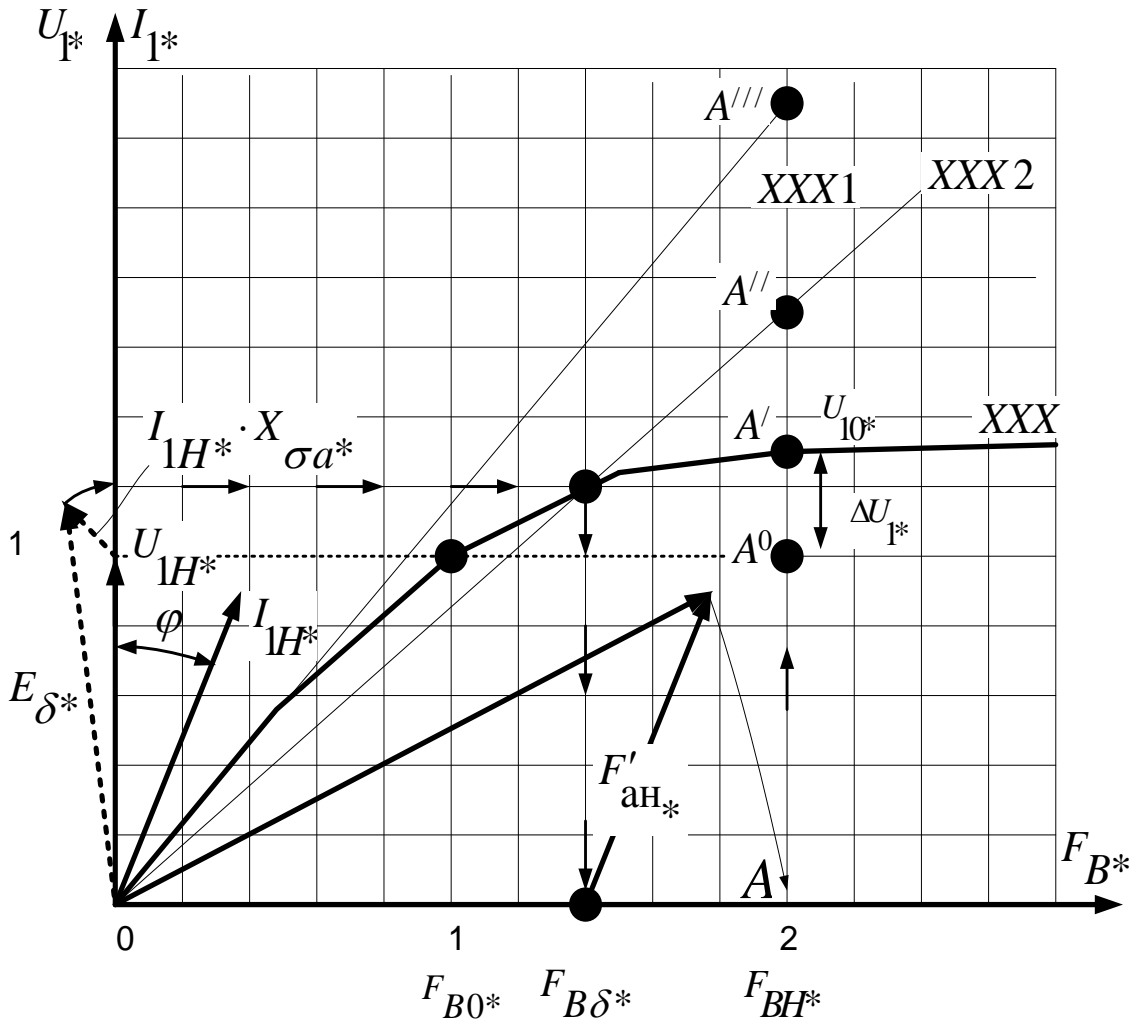
$$E_{\delta} = U_{1*} + jI_{1*}x_{\sigma a*},$$

которая определяет степень насыщения магнитной цепи машины, а затем с помощью характеристики холостого хода графически определяют ток  $I_{1*}$  обмотки возбуждения, создающий эту ЭДС при холостом ходе. Результирующий ток обмотки возбуждения определяют графически, добавляя к вектору  $I_{1*}$  вектор приведенного тока статора  $I'_{1*} = I_{1*}k_d$ , который проводят параллельно вектору тока  $I_{1*}$ .

Коэффициент приведения

$$k_d = \frac{3 \cdot 2 \sqrt{2}}{2 \pi} \cdot \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_{1H} = \frac{3 \cdot 2 \sqrt{2}}{2 \pi} \cdot \frac{360 \cdot 0,915}{6} \cdot 57,1 = 4223 \text{ A}$$

При практическом пользовании векторную диаграмму совмещают с кривой намагничивания машины.



Векторная диаграмма Потье, совмещенная с XXX синхронного генератора

**РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ**  
учебно-методического комплекса  
по дисциплине «**Электрические машины**»  
для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

## **ВОПРОСЫ К ЗАЧЁТУ ПО ПРЕДМЕТУ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»**

### **ВОПРОСЫ**

#### **ТРАНСФОРМАТОРЫ**

1. Классификация трансформаторов. Конструкция и принцип действия трансформатора. Группа соединения, напряжение короткого замыкания, коэффициент трансформации.
2. Электромагнитные процессы при работе трансформатора. Основные соотношения. Уравнения ЭДС и МДС.
3. Приведенный трансформатор. Схема замещения и уравнения.
4. Режим холостого хода однофазного трансформатора. Режим короткого замыкания трансформатора. Схема замещения, векторная диаграмма, уравнения.
5. Трансформация трехфазных токов. Схемы и группы соединения обмоток.
6. Эксплуатационные характеристики трансформаторов при работе под нагрузкой. Потери мощности и КПД. Изменение напряжения.
7. Параллельная работа трансформаторов. Условия включения на параллельную работу. Параллельная работа трансформаторов при различных группах соединения.
8. Параллельная работа трансформаторов. Параллельная работа при различных коэффициентах трансформации.
9. Параллельная работа трансформаторов. Параллельная работа при различных напряжениях короткого замыкания.
10. Трансформаторы специального назначения. Трехобмоточный трансформатор.
11. Трансформаторы специального назначения. Автотрансформатор.
12. Трансформаторы специального назначения. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой.

#### **АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

1. Устройство и принцип действия асинхронной машины.
2. ЭДС обмоток переменного тока. МДС обмоток переменного тока
3. Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе с заторможенным ротором
4. Принцип действия индукционного регулятора, фазорегулятора.
5. Электромагнитные процессы в асинхронной машине при вращающемся роторе. Т-образная схема замещения.
6. Вращающий момент асинхронной машины. Механическая характеристика.
7. Режимы работы асинхронной машины. Асинхронный двигатель. Асинхронный генератор.
8. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
9. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором.
10. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением числа полюсов.
11. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением частоты подведенного напряжения.
12. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением сопротивления в цепи ротора.

#### **СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

1. Устройство и принцип действия синхронного турбогенератора. Особенности конструкции гидрогенератора.
2. Реакция якоря синхронного генератора
3. Возбуждение синхронных генераторов.
4. Характеристики синхронного генератора при автономной работе (XX, КЗ, внешняя, нагрузочная и регулировочная). ОКЗ генератора.
5. Векторные диаграммы и уравнения напряжений явнополюсного и неявнополюсного синхронных генераторов.
6. Параллельная работа синхронных генераторов. Синхронизация.
7. Угловые характеристики синхронного генератора. Статическая перегружаемость.
8. Регулирование нагрузок и V-образные кривые синхронного генератора при параллельной работе.
9. Способы пуска синхронного двигателя

#### **МПТ**

10. Конструкция и принцип действия электрической машины постоянного тока.
11. Коммутация машин постоянного тока.
12. Вращающий момент и ЭДС машины постоянного тока. Уравнения ЭДС и вращающих моментов генератора и двигателя
13. Магнитное поле электрической машины постоянного тока при XX и нагрузке. Реакция якоря при расположении щеток на нейтрали.

14. Системы возбуждения генераторов постоянного тока. Характеристики генератора независимого возбуждения.
15. Схемы и характеристики генераторов постоянного тока с самовозбуждением. Условия самовозбуждения.
16. Скоростные и механические характеристики двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения
17. Прямой и реостатный пуск двигателя постоянного тока. Расчет пускового реостата.
18. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного реостатом в цепи якоря. Схема включения, скоростные характеристики.
19. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока изменением подведенного напряжения и магнитного потока. Схема и скоростные характеристики.
20. Способы возбуждения генераторов постоянного тока. Условия самовозбуждения. Внешние характеристики генераторов.
21. Электрическое торможение двигателя постоянного тока.

**ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ**  
учебно-методического комплекса  
по дисциплине «**Электрические машины**»  
для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»



# **Белорусский национальный технический университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе,  
социальным вопросам и спорту  
Белорусского национального  
технического университета

\_\_\_\_\_ О.К. Гусев

\_\_\_\_\_ /уч.  
Регистрационный № УД- \_\_\_\_\_

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Учебная программа учреждения высшего образования**

**по учебной дисциплине для специальности**

**1-37 01 05 «Городской электрический транспорт»**

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта  
ОСВО 1-37 01 05 -2013

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

В.Н. Калечиц, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение»  
Белорусского национального технического университета.

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

В.М. Збродыга, заведующий кафедрой «Электроснабжение» Белорусского  
государственного аграрного технического университета, кандидат технических  
наук, доцент;

В.А.Булат, доцент кафедры «Электрические станции» БНТУ, кандидат  
технических наук, доцент.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой "Электроснабжение" Белорусского национального технического  
университета (протокол №\_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ В.Б. Козловская

Методической комиссией энергетического факультета Белорусского  
национального технического университета

(протокол №\_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2015г.)

Председатель методической  
комиссии

\_\_\_\_\_ Е.Г. Пономаренко

Научно-методическим советом Белорусского национального технического  
университета (протокол №\_\_\_\_\_ секции №1 от \_\_\_\_\_ 2015г.)

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Электрические машины» разработана для специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт».

Целью изучения дисциплины является получение студентами необходимых теоретических знаний процессов преобразования энергии, устройства, принципов действия и свойств электрических машин различных типов, применяемых при производстве, передаче и потреблении электрической энергии, а также для их эффективного использования, приобретение практических навыков при работе с ними.

Курс «Электрические машины» базируется на результатах изучения таких дисциплин как математика, физика, теоретические основы электротехники, электротехнические материалы, вычислительная техника и программирование. В свою очередь, дисциплина «Электрические машины» является базой для изучения дисциплин специальности «Релейная защита и автоматика». Для закрепления теоретических знаний предусматривается проведение лабораторных работ и выполнение курсового проекта.

В результате освоения дисциплины «Электрические машины» студент должен:

**знать:**

- основы теории электрических машин и трансформаторов,
- их устройство и принцип действия;
- уметь использовать на практике электрические машины и трансформаторы;
- выполнять расчетно-конструкторские работы по электрическим машинам и трансформаторам;
- проводить испытания для определения их параметров и обслуживание во время эксплуатации.
- методы анализа электрических, магнитных цепей электрических машин и трансформаторов;
- принципы действия, конструкции, свойства, области применения и возможности основных электрических машин и трансформаторов;
- проблемы энергосбережения при производстве, передаче, распределении и потреблении электроэнергии;

**уметь:**

- читать структурные и электрические схемы;
- производить измерения электрических и некоторых неэлектрических величин, характеризующих работу электрических машин и трансформаторов;

**владеть:**

- навыками экспериментального определения параметров и характеристик электрических машин и трансформаторов;
- выбором электрических машин и трансформаторов.

Освоение данной учебной дисциплины должно обеспечить формирование следующих компетенций:

- АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
- АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.
- АК-3. Владеть исследовательскими навыками.
- АК-4. Уметь работать самостоятельно.
- АК-5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).
- АК-8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.
- АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.
- ПК-9. Реализовывать на практике современные подходы по повышению энергоэффективности функционирования электрооборудования.
- ПК- 10. Внедрять энергосберегающие мероприятия и технологии.

Согласно учебному плану для очной формы получения высшего образования на изучение учебной дисциплины отведено всего 100 ч., из них аудиторных - 64 часов.

Распределение аудиторных часов по семестрам приведено в таблице 1.

Таблица 1

Семестр	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Итоговый контроль знаний
6	32	-	32	зачет

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### Введение

Роль и значение электрических машин и трансформаторов в современной электротехнике и энергетике. Материалы, применяемые в электромашиностроении.

### Раздел I. Трансформаторы

#### Тема 1.1 Основные сведения о трансформаторах.

##### Устройство и принцип действия

Общие сведения. Классификация. Устройство и принцип действия. Конструкции обмоток и магнитопроводов. Сухие и масляные трансформаторы. Конструкции баков. Охлаждение.

#### Тема 1.2 Электромагнитные процессы при работе трансформатора

Электромагнитные процессы при работе трансформатора. Основные соотношения. Уравнения ЭДС и МДС. Схема замещения трансформатора и ее параметры. Т-образная схема замещения. Приведенный трансформатор. Приведение параметров. Векторная диаграмма.

### **Тема 1.3 Режимы холостого хода и короткого замыкания трансформаторов**

Процессы в трансформаторе при холостом ходе и коротком замыкании. Процессы в простейшем и реальном трансформаторах. Магнитный поток и намагничивающий ток при холостом ходе однофазного трансформатора. Схемы замещения при холостом ходе и коротком замыкании. Векторные диаграммы. Определение параметров трансформатора из опытов холостого хода и короткого замыкания. Коэффициент трансформации. Ток холостого хода. Напряжение короткого замыкания. Потери мощности при холостом ходе и коротком замыкании. Потери в стали.

### **Тема 1.4 Работа трансформатора под нагрузкой**

Эксплуатационные характеристики трансформаторов при работе под нагрузкой. Векторная диаграмма нагрузочного режима. Потери мощности и КПД. Постоянные и переменные потери. Условие максимума КПД. Изменение напряжения при изменении нагрузки.

### **Тема 1.5 Трансформация трехфазных токов**

Схемы соединения трехфазных обмоток. Высшие гармоники фазных и линейных ЭДС и токов. Группы соединения обмоток. Определение группы соединения однофазного и трехфазного трансформаторов. Группы соединения, допускаемые ГОСТ. Опытная проверка группы соединения. Типы магнитных систем трехфазных трансформаторов. Холостой ход трехфазных трансформаторов при соединении обмоток «звезда» - «звезда», «звезда» - «треугольник» и «треугольник» - «звезда». Высшие гармоники в кривых ЭДС и магнитного потока трехфазных трансформаторов.

### **Тема 1.6 Параллельная работа трансформаторов**

Условия включения на параллельную работу. Фазировка. Векторная диаграмма параллельно работающих трансформаторов. Работа трансформаторов при несоблюдении условий включения. Работа при различных коэффициентах трансформации. Работа при различных группах соединения. Работа при различных напряжениях короткого замыкания. Отклонения от условий включения на параллельную работу, допускаемые ГОСТ.

### **Тема 1.7 Разновидности трансформаторов**

Трансформаторы специального назначения. Трехобмоточный трансформатор, его схема замещения, параметры, векторная диаграмма. Автотрансформатор, его свойства и особенности конструкции. Полная, электромагнитная и электрическая мощности. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой. Устройства ПБВ и РПН. Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Другие разновидности трансформаторов.

## **Раздел II. Асинхронные машины**

### **Тема 2.1. Устройство и принцип действия асинхронной машины**

Устройство и принцип действия. Основные элементы конструкции. Конструкция статора и ротора. Особенности конструкции машин с короткозамкнутым и фазным ротором.

### **Тема 2.2 ЭДС обмоток переменного тока. МДС обмоток переменного тока**

ЭДС проводника, витка, катушки, катушечной группы и фазы обмотки переменного тока. Гармонический состав кривых ЭДС. Векторные диаграммы ЭДС обмоток с диаметральным и укороченным шагом. Коэффициент укорочения. Векторная диаграмма ЭДС распределенной обмотки. Коэффициент распределения. Обмоточный коэффициент. Основная и высшие гармоники ЭДС однофазной и трехфазной обмоток. Способы улучшения формы кривой ЭДС.

Уравнения пульсирующих и бегущих волн. Принципы создания вращающихся магнитных полей в двухфазных и трехфазных машинах. МДС катушки с током. МДС катушки с диаметральным и укороченным шагом. МДС катушечной группы и фазной обмотки. МДС трехфазной обмотки. Гармонический состав. Обмоточный коэффициент. Способы улучшения формы кривой МДС.

### **Тема 2.3 Схемы замещения и векторные диаграммы асинхронных машин**

Электромагнитные процессы в асинхронной машине при неподвижном роторе. Принцип действия индукционного регулятора, фазорегулятора. Электромагнитные процессы в асинхронной машине при вращающемся роторе. Преобразование мощности в генераторе и двигателе. Уравнения ЭДС и МДС. Т-образная и Г-образная схемы замещения и векторные диаграммы. Параметры схем замещения.

### **Тема 2.4 Вращающий момент и механическая характеристика асинхронной машины**

Режимы работы асинхронной машины. Асинхронный генератор и асинхронный двигатель. Вращающий момент асинхронной машины. Номинальный, пусковой, критический моменты и скольжения. Механическая характеристика. Рабочие характеристики асинхронного двигателя. Механическая характеристика асинхронного двигателя в относительных единицах.

### **Тема 2.5 Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей**

Пуск асинхронного двигателя в ход. Пусковые свойства асинхронного двигателя и способы их улучшения. Пуск двигателя с фазным ротором. Пуск короткозамкнутого асинхронного двигателя. Прямой пуск. Пуск при

пониженном напряжении: реакторный и автотрансформаторный пуск. Частотный пуск. Двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением скольжения, изменением числа полюсов, изменением частоты подведенного напряжения. Закон регулирования напряжения при частотном регулировании. Электрическое торможение.

Динамическое торможение. Торможение противовключением. Рекуперативное (генераторное) торможение. Схемы включения и механические характеристики.

## **Раздел III. Синхронные машины**

### **Тема 3.1 Устройство и принцип действия синхронных машин**

Устройство и принцип действия синхронной машины. Явнополюсные и неявнополюсные машины. Турбогенераторы и гидрогенераторы. Возбуждение синхронных машин. Схема возбуждения с возбудителем постоянного тока. Функции системы возбуждения. Схема возбуждения с синхронным возбудителем и подвозбудителем. Схема бесконтактного возбуждения.

### **Тема 3.2 Электромагнитные процессы при работе синхронного генератора. Уравнения и характеристики синхронных генераторов**

Электромагнитные процессы при холостом ходе и нагрузке. Векторные диаграммы магнитных потоков и ЭДС. Реакция якоря. Магнитные поля, ЭДС, параметры синхронного генератора.

Уравнения напряжений и векторные диаграммы явнополюсного и неявнополюсного генераторов.

Характеристики синхронного генератора при работе на автономную сеть. Характеристики: холостого хода, короткого замыкания, внешняя, нагрузочная, регулировочная. Отношение короткого замыкания. Определение параметров и построение реактивного треугольника по характеристикам холостого хода и короткого замыкания.

Векторные диаграммы синхронных генераторов с учетом насыщения. Диаграмма Потье.

### **Тема 3.3 Параллельная работа синхронных генераторов**

Параллельная работа синхронных генераторов. Условия включения на параллельную работу и синхронизация. Точная синхронизация. Самосинхронизация. Регулирование активной и реактивной нагрузок.

Характеристики синхронного генератора при параллельной работе. Угловые характеристики. Электромагнитная мощность. Синхронизирующая мощность и синхронизирующий момент. Максимальная электромагнитная мощность в установившемся режиме. Понятие о статической устойчивости синхронной машины. Статическая перегружаемость. V-образные кривые синхронного генератора.

### **Тема 3.4 Синхронные двигатели и компенсаторы**

Синхронный двигатель, его недостатки и преимущества. Рабочие и пусковые характеристики. Способы пуска трехфазного синхронного двигателя. Синхронный компенсатор. Использование компенсатора для улучшения коэффициента мощности и регулирования напряжения сети. Пуск синхронного компенсатора.

## **Раздел IV. Электрические машины постоянного тока**

### **Тема 4.1. Конструкция и принцип действия машин постоянного тока**

Конструкция и принцип действия машины постоянного тока. Статор, ротор. Роль и назначение коллектора. Щеточный аппарат. Обмотки и ЭДС якоря. Простая и сложная петлевые обмотки. Простая и сложная волновые обмотки. Комбинированная обмотка. Уравнение напряжений. Применение обмоток.

### **Тема 4.2. Реакция якоря машин постоянного тока**

Магнитное поле машины постоянного тока при холостом ходе и нагрузке. Реакция якоря. Виды реакции якоря и ее влияние на магнитный поток. Продольная и поперечная реакция якоря.

### **Тема 4.3. Коммутация в машинах постоянного тока**

Процессы коммутации тока. Сущность процесса. Виды коммутации. Прямолинейная и криволинейная коммутация. Способы улучшения коммутации. Сдвиг щеток с нейтрали. Установка дополнительных полюсов. Применение компенсационных обмоток. Другие способы улучшения коммутации.

### **Тема 4.4. Генераторы постоянного тока**

Характеристики генераторов постоянного тока с независимым возбуждением и самовозбуждением. Характеристики и схемы генераторов параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Электромагнитный момент и уравнение моментов. Условия самовозбуждения генераторов. Потери мощности в машинах постоянного тока. Коэффициент полезного действия.

### **Тема 4.5. Двигатели постоянного тока**

Характеристики двигателей постоянного тока параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Скоростные и механические характеристики. Рабочие характеристики. Пуск и регулирование частоты вращения. Электрическое торможение. Механические характеристики двигателей и производственных механизмов. Условия статической устойчивости при совместной работе двигателя с механизмом.

### **Тема 4.6. Потери мощности в машинах постоянного тока**

Виды потерь. Коэффициент полезного действия. Условия максимума коэффициента полезного действия.



#### **Тема 4.7. Специальные типы машин постоянного тока**

Бесколлекторные двигатели и генераторы. Принцип обратимости. Специальные типы машин. Электромашинный усилитель. Вентильные двигатели. Двигатели с печатным якорем. Микромашины постоянного тока. Паспортные данные машин постоянного тока.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**очная форма получения высшего образования**

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСП	Литература	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	2	3	4	5	6		7	9	10
	<b>7 семестр</b>								
	<b>Введение</b>								
	Роль и значение электрических машин в современной электротехнике и энергетике. Материалы, применяемые в электромашиностроении	1						[1],[2],[3],[4]	
<b>1</b>	<b>Раздел I. Трансформаторы</b>							[1],[2],[3],[4]	
1.1	Основные сведения о трансформаторах. Устройство и принцип действия	1						[1],[2],[3],[4]	
1.2	Электромагнитные процессы при работе трансформатора	1	2					[[1],[2],[3],[4]	
1.3	Режимы холостого хода и короткого замыкания трансформатора	1	2					[1],[2],[3],[4]	
1.4	Работа трансформатора под нагрузкой	1	2					[1],[2],[3],[4]	
1.5	Трансформация трехфазных токов	1	2					[1],[2],[3],[4]	
1.6	Параллельная работа трансформаторов	1	2					[1],[2],[3],[4]	
1.7	Разновидности трансформаторов	1						[1],[2],[3],[4]	Контрольная работа
<b>2</b>	<b>Раздел II. Асинхронные машины</b>							[1],[2],[3],[4]	
2.1	Устройство и принцип действия асинхронной машины.	2						[1],[2],[3],[4]	
2.2	ЭДС обмоток машин переменного тока. МДС обмоток машин переменного тока	2	2					[1],[2],[3],[4]	
2.3	Схемы замещения и векторные диаграммы асинхронных машин	1	2					[1],[2],[3],[4]	

2.4	Вращающий момент и механические характеристики асинхронных машин	1	2					[1],[2],[3],[4]	
2.5	Пуск, регулирование частоты вращения и торможение асинхронных двигателей	2	2					[1],[2],[3],[4]	Контрольная работа
3	<b>Раздел III. Синхронные машины</b>							[1],[2],[3],[4]	
3.1	Устройство и принцип действия синхронных машин. Возбуждение синхронных машин.	2						[1],[2],[3],[4]	
3.2	Электромагнитные процессы при работе синхронного генератора. Уравнения и характеристики синхронных генераторов	2	2					[1],[2],[3],[4]	
3.3	Параллельная работа синхронных генераторов	1	2					[1],[2],[3],[4]	
3.4	Синхронные двигатели и компенсаторы	1	2					[1],[2],[3],[4]	Контрольная работа
4	<b>Раздел IV. Электрические машины постоянного тока</b>							[1],[2],[3],[4]	
4.1	Конструкция и принцип действия машин постоянного тока	1						[1],[2],[3],[4]	
4.2	Реакция якоря машин постоянного тока	1	2					[1],[2],[3],[4]	
4.3	Коммутация тока в машинах постоянного тока	2						[1],[2],[3],[4]	
4.4	Генераторы постоянного тока	2	2					[1],[2],[3],[4]	
4.5	Двигатели постоянного тока	2	2					[1],[2],[3],[4]	
4.6	Потери мощности в машинах постоянного тока	1	2					[1],[2],[3],[4]	Контрольная работа
4.7	Специальные типы машин постоянного тока	1						[1],[2],[3],[4]	
	Итого за семестр	32	32						Зачёт
	Всего аудиторных часов			64					

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Токарев Б.Ф. Электрические машины / Б.Ф. Токарев. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 547с.
2. Копылов И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 360с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. - 928с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1979, - 832с.

### - Дополнительная литература

1. Костенко М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – М.: Энергия, ч.1, 1972. - 543 с.; ч. 2, 1973. - 647с.
2. Проектирование электрических машин. Под ред. Копылова И.П. - М.; Энергия, 1980. - 496с.
3. Гурин Я.С. Проектирование серий электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов – М.: Энергия, 1978. – 479с.
4. Справочник по электрическим машинам /Под ред. Копылова И.П., Клокова Б.К. /Т. 1, 2. М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989,
5. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Лабораторные работы по дисциплине «Электрические машины». Часть I. Электрические машины постоянного тока. Гончар А.А., Олешкевич М.М., Шафранский В.И. Мн., 1989.
7. Лабораторные работы по дисциплине «Электрические машины». Часть II. Трансформаторы и асинхронные машины. Гончар А.А., Олешкевич М.М., Шафранский В.И. Мн., 1990.
8. Лабораторные работы по дисциплине «Электрические машины». Часть III. Синхронные машины. Гончар А.А., Олешкевич М.М., Шафранский В.И. – Мн., 1990.

### Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- проведение текущих контрольных работ по отдельным темам;
- защита выполненных на практических занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;

- сдача зачета по дисциплине.

### **Перечень тем практических занятий**

1. Конструкции трансформаторов. Электромагнитные процессы при работе трансформатора.
2. Процессы в трансформаторе при работе, холостом ходе и коротком замыкании. Эксплуатационные характеристики.
3. Параллельная работа трансформаторов
4. Обмотки, ЭДС и МДС обмоток машин переменного тока. Схемы обмоток машин переменного тока. Магнитная цепь машины переменного тока и ее расчет
5. Параметры, схемы замещения, векторные диаграммы, механические характеристики асинхронной машины.
6. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.
7. Параметры, схемы замещения, векторные диаграммы, характеристики синхронных генераторов и двигателей
8. Параллельная работа синхронных генераторов. Синхронизация.
9. Конструкция машины постоянного тока, обмотки якоря.
10. Характеристики генераторов и двигателей постоянного тока

### **Методы (технологии) обучения**

Основными методами (технологиями) обучения, отвечающими целям изучения дисциплины, являются:

- элементы проблемного обучения (проблемное изложение, вариативное изложение, частично-поисковый метод), реализуемые на лекционных занятиях;
- элементы учебно-исследовательской деятельности, творческого подхода, реализуемые на практических занятиях (или лабораторных работах) и при самостоятельной работе;
- коммуникативные технологии (дискуссия, учебные дебаты, мозговой штурм и другие формы и методы), реализуемые на практических занятиях и конференциях;
- проектные технологии, используемые при проектировании конкретного объекта, реализуемые при выполнении курсовой работы.

### **Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов**

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- самостоятельная работа в виде решения индивидуальных задач в аудитории во время проведения практических занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием;
- подготовка рефератов по индивидуальным темам, в том числе с использованием патентных материалов.