

	Система менеджменту якості <b>НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС</b> навчальної дисципліни « <u>Електричні машини</u> » назва дисципліни	Шифр документа	СМЯ НАУ НМК 07.01.05 – 01 – 2018
		Стор. ___ з ___	

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Навчально-науковий Аерокосмічний інститут

(назва інституту (факультету))

**КАФЕДРА Автоматизації та енергоменеджменту**

(повна назва кафедри)

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни «Електричні машини»

Галузь знань: 14 "Електрична інженерія"

Спеціальність: 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Спеціалізація: Енергетичний менеджмент

(шифр та повна назва напрямку (спеціальності))

Укладач: к.т.н., доцент Тихонов Віктор  
Васильович

(науковий ступінь, вчене звання, П.І.Б. викладача)

Конспект лекцій розглянутий та схвалений  
на засіданні кафедри автоматизації та

енергоменеджменту

(повна назва кафедри)

Протокол № \_\_\_ від « \_\_\_ » \_\_\_ 2018 р.

Завідувач кафедри Захарченко В.П.

## Лекція № 1.1

### Тема лекції: ПРЕДМЕТ ДИСЦИПЛІНИ, ЇЇ ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ. ОСНОВНІ ЗАКОНИ, ПОКЛАДЕНІ В ОСНОВУ ДІЇ МАШИНИ. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

#### План лекції

1. Предмет дисципліни, її цілі та завдання.
2. Класифікація електромашин

#### **1. Предмет дисципліни, її цілі та завдання.**

Первые потребители электрической энергии (освещение, обогрев, радио) были установлены на тяжелом бомбардировщике «Илья Муромец» в 1912 г.

Переломным этапом в развитии электрификации самолетов явился созданный в 1939 г. В. М. Петляковым пикирующий бомбардировщик Пе-2, на котором впервые в истории авиации были широко применены электромеханизмы для дистанционного управления наиболее важными органами самолета. Его электросистема и электрические агрегаты разрабатывались и создавались под руководством К. В. Рогова и А. А. Енгибаряна.

В годы Великой Отечественной войны продолжалось дальнейшее интенсивное внедрение электротехнических устройств в авиации и соответствующий рост мощности источников электрической энергии на самолетах.

Послевоенные годы характеризуются быстрым развитием реактивной авиации, что отразилось на дальнейшем развитии авиационных электрических машин.

Современные самолеты, особенно самолеты дальней авиации, имеют большое количество электрифицированных систем и установок. Общая мощность источников питания на таких самолетах около 480 кВА. И это не предел. Есть все основания полагать, что степень электрификации перспективных летательных аппаратов значительно возрастет. Как и прежде, она будет основываться на широком использовании электрических машин различных типов и исполнения.

#### **2. Классификация електромашин.**

Авиационные электрические машины это вращающиеся электромагнитные механизмы, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую (генераторы) или, наоборот, электрической — в механическую (двигатели), а также статические электромагнитные преобразователи энергии переменного тока — трансформаторы.

На борту летательного аппарата применяется большое многообразие типов электрических машин. С целью удобства изучения их можно подразделить на группы:

- *по виду электрической энергии :*
  - электрические машины постоянного тока;
  - электрические машины переменного тока;
- *по назначению :*
  - генераторы;
  - двигатели;
- *по наличию контактного узла :*
  - контактные;
  - бесконтактные.

## Лекція № 1.2

### Тема лекції: КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

#### План лекції

1. Елементы конструкции асинхронных двигателей
2. Принцип действия асинхронного двигателя
3. Принцип действия простейшего генератора переменного тока

#### 1. Элементы конструкции асинхронных двигателей.

В конструктивном отношении асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: ротора и статора, отделенных друг от друга воздушным зазором. Магнитопроводы ротора и статора набираются из тонких листов электротехнической стали толщиной 0,2...0,35мм. На рис.1,а показан лист и полный пакет статора авиационного асинхронного двигателя, а на рис.2,а лист пакета ротора обозначен цифрой 3. Обмотки статора и ротора асинхронных машин между собой электрически не связаны; между ними существует только магнитная связь. Для того, чтобы эта связь была лучше, зазор между статором и ротором делают минимальным. Так, для авиационных асинхронных двигателей мощностью от нескольких десятков Ватт до 5 кВт воздушный зазор  $\delta=0,2...0,5$  мм.

#### Принцип действия асинхронного двигателя.

Принцип действия асинхронной машины основан на законе электромагнитной индукции, открытом М. Фарадеем.

При включении трехфазной статорной обмотки в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, частота вращения (об/мин) которого

$$n_1=60 \cdot f_1/p$$

где  $f_1$  - частота питающей сети;  
 $p$  - число пар полюсов.

#### 3. Принцип действия простейшего генератора переменного тока

На рис.1. приведена принципиальная схема простейшего генератора переменного тока. Здесь N и S - неподвижные полюсы, соединенные внешним магнитопроводом, который на рисунке не показан. Эта часть машины создает магнитный поток и называется индуктором. Для создания потока могут использоваться постоянные магниты или электромагниты.

В пространстве между полюсами вращается стальной цилиндр. На

цилиндре расположен виток *abcd* из проводникового материала. Концы витка присоединяются к кольцам 1 и 4. Кольца наглухо насажены на вал цилиндра и, следовательно, вращаются вместе с ним. Эта часть машины называется якорем. На кольца наложены неподвижные щетки 2 и 3, к которым присоединяется электрическая нагрузка *Rн*.

### Лекція № 1.3

#### Тема лекції ОДНОФАЗНИЙ ТРАНСФОРМАТОР. РІВНЯННЯ ТРАНСФОРМАТОРА, ПРИВЕДЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОР. СХЕМА ЗМІЩЕННЯ, ВЕКТОРНІ ДІАГРАМИ

##### План лекції

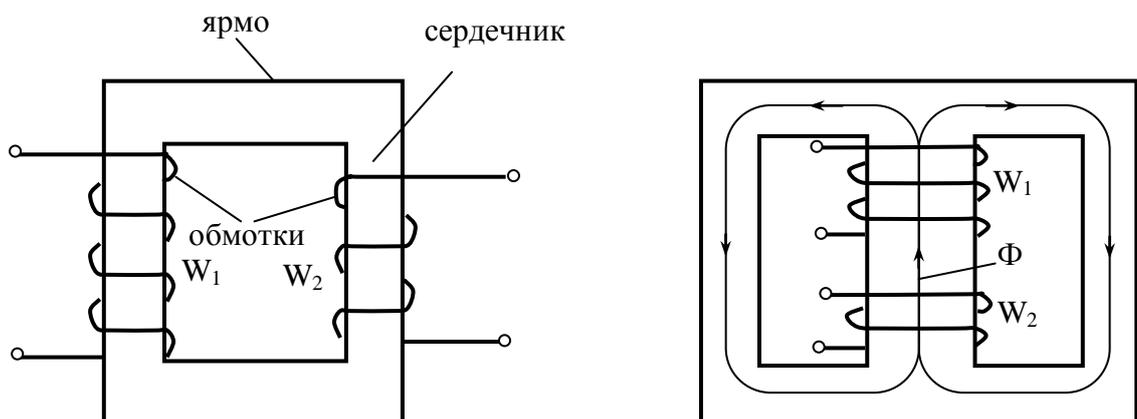
- 1 Назначение, конструкция и классификация
- 2 Принцип действия и устройство
- 3 Уравнения, порядок приведения трансформатора
- 4 Схема замещения
- 5 Векторная диаграмма

#### 1. Назначение, конструкция и классификация.

Трансформаторы это статические электромагнитные устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

*Конструкция.* Трансформатор состоит из двух основных частей: магнитопровода и обмоток.

Магнитопровод выполняется из листов электротехнической стали, может быть шихтованным, т.е. набирается из отдельных штампованных листов, либо витым – изготавливается путем намотки из стальной ленты. Часть магнитопровода, вокруг которой расположены обмотки, называется сердечником (стержнем), а часть соединяющая сердечники – ярмом (рис. 1, а).



а) б)  
 Рис. 1. Конструкции трансформаторов

## 2. Принцип действия и устройство.

*Принцип действия.* Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции.

По первичной обмотке  $W_1$  (рис. 2), при включении ее в цепь переменного тока с напряжением  $u_1$  и частотой  $f$ , течет переменный ток  $i_1$ , который создает магнитодвижущую силу (МДС) первичной обмотки  $F_1 = i_1 W_1$ .

Эта МДС, согласно закона Ома для магнитной цепи ( $\Phi = \frac{F}{R_\mu}$ , где  $R_\mu$  - магнитное сопротивление магнитопровода трансформатора), обуславливает переменный во времени основной магнитный поток  $\Phi$ , сцепленный как с обмоткой  $W_1$ , так и со вторичной обмоткой  $W_2$ . Поток  $\Phi$  индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_1$ , а во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции  $e_2$ . Мгновенные значения этих ЭДС определяются на основании закона электромагнитной индукции

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

## 3. Уравнения, порядок приведения трансформатора.

Так как потребляемы ток, а значит и поток изменяются по синусоидальному закону ( $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ), то преобразуем для ЭДС обмоток трансформатора

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f_2 W_2 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$$

или

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2)$$

где:  $E_{1m} = 2\pi f_1 W_1 \Phi_m$ ;

$$E_{2m} = 2\pi f_2 W_2 \Phi_m$$

Запишем выражения для действующих значений ЭДС:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 W_1 \Phi_m = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m,$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_2 W_2 \Phi_m = 4,44 f_2 W_2 \Phi_m.$$

Аналогично запишутся выражения для ЭДС рассеяния:

#### 4. Схема замещения

Анализируя уравнения трансформатора записанные в приведенной форме можно сделать вывод, что оба контура - первичная обмотка и приведенная вторичная имеют общий участок электрической цепи ( $E'_2 = E_1$ ).

Данный участок электрической цепи характеризует намагничивающий контур трансформатора и может быть представлен в виде последовательного соединения активного сопротивления  $R_m$ , характеризующего потери в стали и индуктивного сопротивления  $X_m$  - характеризующего потокосцепление потока трансформатора с обмотками.

#### 5. Векторная диаграмма

Для построения векторной диаграммы необходимо знать следующие параметры трансформатора:  $U_2, I_2, \cos \varphi_2, R_1, x_1, R_2, x_m$ . Данные параметры либо замеряются, либо вычисляются по опытам ХХ и КЗ.

### Лекція № 1.4

**Тема лекції:** РЕЖИМИ РОБОТИ. ВТРАТИ І ККД. ДОСЛІДИ ХОЛОСТОГО ХОДА ТА КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ. ЗОВНІШНЯ ХАРАКТЕРИСТИКА. РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

#### План лекції

- 1 Режимы работы
- 2 Потери и ККД
- 3 Опыт холостого хода
- 4 Опыт короткого замыкания
- 5 Опыт короткого замыкания

#### 1. Режимы работы

Параметры уравнений и схемы замещения трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода (ХХ) и, короткого замыкания (КЗ).

*Опыт холостого хода*  
( $U_1 = U_0, I_2 = 0$ )

При приведении опыта ХХ изменяют величину питающего напряжения от 0 до  $1,2 U_{ном}$  и снимают закон изменения потребляемого тока и мощности (см. блок схему).

## 2. Потери и ККД

Согласно требованиям ГОСТа потери мощности в трансформаторе определяются по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте ХХ активная мощность ( $P_0$ ), потребляемая трансформатором, расходуется на покрытие магнитных потерь в стали магнитопровода, т.к. магнитный поток при ХХ практически равен потоку при нагрузке, а магнитные потери в стали пропорциональны квадрату магнитного потока.

## 3. Опыт холостого хода

$$(U_1 = U_0, I_2 = 0)$$

При приведении опыта ХХ изменяют величину питающего напряжения от 0 до  $1,2 U_{ном}$  и снимают закон изменения потребляемого тока и мощности (см. блок схему).

Для значения питающего напряжения:  $U_0 = U_{ном}$  по данным опыта ХХ вычисляют следующие параметры трансформатора:

$$z_1 + z_m = \frac{U_0}{I_0}, R_1 + R_m = \frac{P_0}{I_0^2}, x_1 + x_m = \sqrt{(z_1 + z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2}$$

## 4. Опыт короткого замыкания

$$(U_1 = U_k = 5 \dots 10\% U_{ном}, z_m = 0)$$

При проведении опыта КЗ к первичной обмотке трансформатора подводят пониженное напряжение такого значения, при котором по обмоткам проходит ток не превышающий номинальное значение.

Учитывая, что  $\Phi \equiv U_1$ , а  $R_m \equiv B^2$  то ввиду малости потерями в стали и током  $I_0$  пренебрегаем. Схема замещения в этом случае представлена на рис. 1.

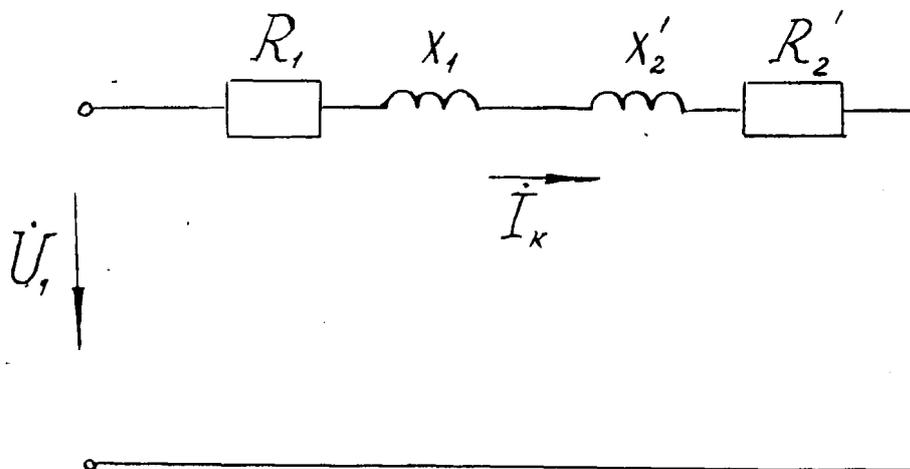


Рис.1

## 5. Внешняя характеристика

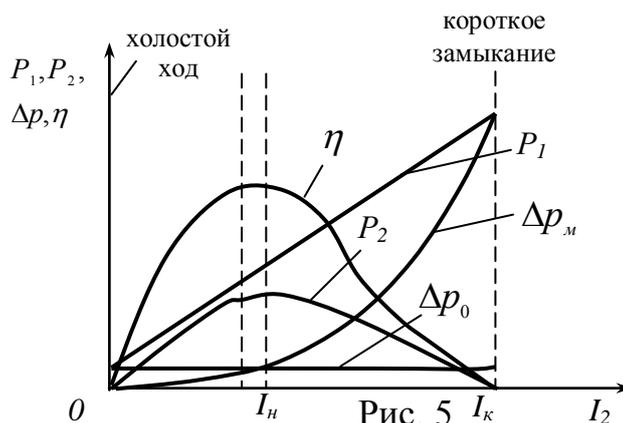
Внешняя характеристика это зависимость  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = const, f_1 = const$  (см. блок схему).

Для объяснения характера изменения выходного напряжения в зависимости от величины и характера нагрузки целесообразно использовать векторную диаграмму (см. блок схему), соответствующую упрощенной схеме замещения. Данная схема замещения получена при исключении намагничивающего контура (т.к.  $I_0 = 5...10\%I_{ном}$ ) из схемы замещения трансформатора.

## 4. Рабочие характеристики

На рис.4 изображена зависимость  $\Delta P, \eta = f(I_2)$

При  $I_2=0$  полезная мощность и  $\eta$  равны 0. С увеличением отдаваемой мощности увеличивается КПД, т.к. в энергетическом балансе уменьшается удельное значение магнитных потерь в стали, имеющих постоянное значение.



При некотором токе КПД достигает максимума, после чего начинает уменьшаться с увеличением нагрузки. Это объясняется увеличением электрических потерь в обмотках трансформатора пропорционально квадрату тока, при возрастании полезной мощности пропорционально току.

## Лекція № 1.5

**Тема лекції: ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ. СХЕМИ І ГРУПИ З'ЄДНАННЯ. ОСОБЛИВОСТІ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ПАСПОРТНИМ ДАНИМ**

### План лекції

- 1 Трехфазные трансформаторы. Устройство
- 2 Способы и группы соединения
- 3 Типы авиационных трансформаторов, их технические данные, особенности эксплуатации

### **1. Трехфазные трансформаторы. Устройство.**

Энергию трехфазного переменного тока можно преобразовывать тремя однофазными трансформаторами (так называемый групповой трансформатор) или одним трехфазным. В авиационном оборудовании нашли применение только трехфазные стержневые трансформаторы, так они значительно легче группового.

На каждом стержне трехфазного трансформатора располагаются первичная и вторичной обмотки одной из фаз (рис.1).

### **2. Способы и группы соединения.**

*Способы соединений.* Первичную и вторичную обмотки трехфазного трансформатора можно соединить следующими способами:  $Y/Y$ ,  $Y/\Delta$ ,  $\Delta/Y$ ,  $\Delta/\Delta$ . В числителе и в знаменателе показаны способы соединений обмоток соответственно первичной и вторичной.

*Группы соединений.* Различные способы соединений первичной и вторичной обмоток, их размещение на стержнях, приводят к различной разности фаз соответствующих линейных напряжений обмоток. Возможный угол разности фаз всегда кратен  $30^0$  и различают 12 групп соединений.

### **3. Типы авиационных трансформаторов, их технические данные, особенности эксплуатации**

На борту ЛА авиационные трансформаторы применяются в качестве силовых, измерительных и специальных.

Наиболее широкое применение нашли силовые трансформаторы, которые предназначены для понижения напряжения со 115/200В до 36В, а также используются в выпрямительных устройствах типа ВУ-6Б, ВУ-9Б и т.п.

Более подробно о типах, технических данных и особенностях эксплуатации Вы будете изучать на практическом занятии.

В качестве примера рассмотрим силовой трансформатор ТС 320СО4А.

Расшифровка маркировки:

Т – трансформатор;

С – силовой;

3 – трехфазный;

20 – необходимо представлять между цифрами запятой – 2,0 кВА – мощность трансформатора;

СО – сухое охлаждение;

А – модификация.

## Лекція № 1.6

### Тема лекції: СПЕЦІАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ: БАГАТООБМОТКОВИЙ ТРАНСФОРМАТОР, ТРАНСФОРМАТОРИ НАПРУГИ ТА СТРУМУ, РІВНЯННЯ, СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, АВТОТРАНСФОРМАТОР, ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОТУЖНОСТІ

#### План лекції

- 1 Автотрансформаторы
- 2 ТРАНСФОРМАТОРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
- 3 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ
- 4 МНОГООБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ
- 5 ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ
- 6 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧИСЛА ФАЗ

#### 1. Автотрансформаторы

*Автотрансформатором* называется трансформатор, у которого часть обмоток принадлежит одновременно первичной и вторичной системам, а сами первичная и вторичная обмотки помимо магнитной связи имеют еще и связь электрическую.

Принципиальная схема автотрансформатора изображена на рис.1.

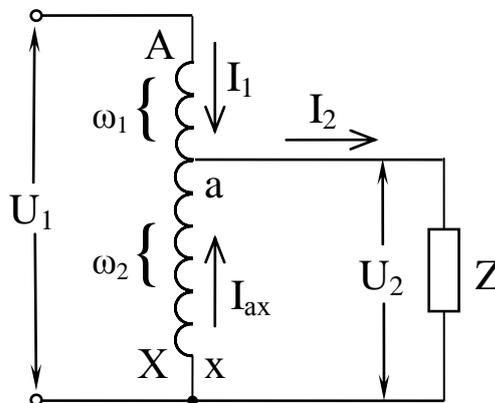


Рис.1. Принципиальная схема автотрансформатора

В случае понижающего автотрансформатора вторичная обмотка является частью первичной, как это сказано в определении (см. рис.1). В случае повышающего автотрансформатора первичная обмотка является частью вторичной.

#### 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Особую группу составляют трансформаторы, применяемые в выпрямительных устройствах. Выпрямительные устройства (ВУ), как статические преобразователи переменного тока в постоянный, получили широкое распространение в системах авиационного оборудования. В общем

случае ВУ состоит из трансформатора, вентильного блока и сглаживающего фильтра (рис.4.).

Трансформаторы выпрямительных устройств предназначены для согласования уровня питающего напряжения переменного тока  $U_{вх}$  с напряжением, подаваемым на выпрямитель, т.к. после выпрямления необходимо получить напряжение постоянного тока 27В. Кроме того, трансформаторы исключают электрическую связь между входными и выходными цепями ВУ.

Вентильный блок осуществляет преобразовательную функцию переменного тока в постоянный. Он состоит из выпрямительных элементов (диодов), соединенных между собой в схему выпрямления.

Сглаживающий фильтр предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока.



Рис.4. Блок-схема выпрямительного устройства.

### 3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

При напряжении больше 250В и токах, превышающих несколько десятков ампер, все измерительные приборы переменного тока включаются через измерительные трансформаторы.

Измерительные трансформаторы используются для преобразования тока (трансформатор тока) и напряжения (трансформатор напряжения) до величин, более удобных для их измерения. Мощности их сравнительно малы, так как трансформаторы тока работают практически в режиме короткого замыкания, а трансформаторы напряжения – в режиме холостого хода. Эти режимы работы и требования малых погрешностей определяют особые требования к расчету и конструированию измерительных трансформаторов.

#### Трансформатор тока

Первичная обмотка трансформатора состоит из одного или нескольких витков относительно большого сечения и включается последовательно в цепь, ток которой измеряется (рис.7.).

Вторичная обмотка состоит из большого числа витков сравнительно малого сечения и замыкается на приборы с малыми сопротивлениями - амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчики и т.д. Рабочий режим трансформатора тока практически представляет собой режим короткого замыкания.

## Трансформаторы напряжения

Условия работы трансформаторов напряжения соответствуют работе трансформаторов в режиме, близком к режиму холостого хода.

Погрешность измерения напряжения:

$$\varepsilon_u = \frac{kU_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% ,$$

в соответствии с классами точности 0,2; 0,5; 1 и 3, не должна превышать соответственно 0,2; 0,5; 1; 3%. Для этого сердечник трансформатора выполняют из стали высокого качества и относительно слабо насыщают ( $B=0,6-0,8$ Тл). Трансформаторы напряжения выполняются как в виде однофазных трансформаторов на номинальные мощности до 1000В·А, так и в виде трехфазных трансформаторов на мощности до нескольких киловольт-ампер.

Трансформаторы напряжения изготавливаются на напряжения от  $380/\sqrt{3}$  до  $400000/\sqrt{3}$  В. До 3000В трансформаторы делаются сухими, а при более высоком напряжении – с масляным охлаждением.

### 4. МНОГООБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В авиационном оборудовании имеется большое количество силовых трансформаторов, работающих в блоках питания вычислительных устройств, радиотехнических, радиолокационных и других систем. Эти трансформаторы должны питать цепи с различными напряжениями, например, анодные цепи передающих и приемных устройств, цепи накала ламп и другие. Следовательно, вторичная система таких трансформаторов должна иметь несколько обмоток на различные напряжения и различные токи. В таких случаях применяются многообмоточные трансформаторы, которые могут иметь одну или несколько первичных и одну или несколько вторичных обмоток. В системах авиационного оборудования, в основном, применяются трансформаторы, имеющие одну первичную и несколько вторичных обмоток.

### 5. ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Импульсные трансформаторы (ИТ) находят широкое применение в устройствах импульсной техники для изменения амплитуды импульсов, исключения постоянной составляющей, размножения импульсов и т.п. Одно из важнейших требований, предъявляемых к ИТ,- минимальное искажение формы трансформируемых импульсов, для чего во вторичной обмотке трансформатора необходимо максимально уменьшить паразитную емкость и индуктивность рассеяния обмоток трансформатора. Основное значение для этого имеет уменьшение размеров сердечника и числа витков обмоток.

## 6. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧИСЛА ФАЗ

Преобразователи фаз предназначены для преобразования многофазных систем с одним числом фаз в системы с другими числами фаз. Преобразование фаз можно осуществлять как с помощью электрических машин, так и с помощью трансформаторов. В схемах автоматики для питания двухфазных асинхронных двигателей необходим двухфазный переменный ток.

### Лекція № 2.1

#### Тема лекції: ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ. ОБМОТКИ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ. МАГНІТОРУШІЙНА СИЛА БАГАТОФАЗНОЇ ОБМОТКИ

#### **План лекції**

- 1 ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБМОТОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
- 2 Однослойные обмотки
- 3 Двухслойные обмотки

#### **1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБМОТОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.**

Как в синхронных, так и в асинхронных машинах имеются обмотки, в которых электродвижущие силы (ЭДС) индуцируются пересекающим их магнитным полем. Обмотки создают свои магнитодвижущие силы (МДС), если по ним протекают переменные токи.

Основным элементом обмотки переменного тока является *катушка*. Теплостойкость машины определяется теплостойкостью проводов, из которых выполнены катушки. Катушки укладываются в пазы пакета стали якоря в один слой, образуя однослойную обмотку, или в два слоя, образуя двухслойную обмотку.

#### **2. Однослойные обмотки.**

Рассмотрим пример однослойной обмотки, фаза А которой изображена на рис.1,а и занимает пазы 1, 2, 7, 8, 13, 14, 19 и 20. Обмотка, как видим, с диаметральной шагом ( $y=\tau=6$ ). Фаза состоит из четырех катушек, разделенных на катушечные группы по  $q$  (в данном случае по две) катушек в каждой. Таким образом, фаза имеет число катушечных групп, равное числу пар полюсов.

#### **3. Двухслойные обмотки.**

Конструктивное расположение катушек двухслойных обмоток такое же, как и расположение секций в обмотках постоянного тока, т.е. если одна сторона катушки лежит сверху одного паза, то другая лежит внизу другого паза, удаленного от первого на ширину катушки  $y$ .

Соединение катушек фазы А двухслойной обмотки при диаметральной

шаге  $2p=4$ ,  $m=3$  и  $q=2$  изображено на рис.4. Плоскостная развертка всех трех фаз такой обмотки представлена на рис.5. В отличие от однослойной обмотки, фаза двухслойной обмотки имеет в два раза большее число катушек ( $Z$  катушек) и  $2p$  катушечных групп по  $q$  катушек в каждой.

### **Лекція № 2.3**

#### **Тема лекції: ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДІЛЯНОК МАГНІТНОГО КОЛА. ВТРАТИ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ, ККД. РІВНЯННЯ НАГРІВУ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ. СПОСОБИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ**

#### **План лекції**

- 1 Електромагнитная и номинальная мощность электромашин
- 2 Уравнение, определяющее главные размеры машины
- 3 Электромагнитные загрузки
- 4 Потери и КПД электромашин
- 5 Нагрев и охлаждение электромашин

#### **1. Электромагнитная и номинальная мощность электромашин**

К важнейшим энергетическим характеристикам электрической машины относятся понятия электромагнитной и номинальной мощности.

Под электромагнитной мощностью  $P_{эм}$  понимают мощность, передаваемую в машине электромагнитным путем.

Для машин переменного тока:

$$P_{эм} = m_1 E_1 I_1 10^{-3} \text{ кВА} ,$$

где  $m_1$  - число фаз обмотки статора;

$E_1, I_1$  - ЭДС и ток обмотки фазы статора.

Для машин постоянного тока:

$$P_{эм} = E_2 I_2 10^{-3} \text{ кВт}$$

где  $E_2, I_2$  - ЭДС и ток якоря.

Под номинальной мощностью  $P_2$  понимают мощность отдаваемая машиной на нагрузку.

Величина электромагнитной мощности определяет габаритные размеры электрической машины и вычисляется по величине номинальной мощности.

Для машин переменного тока:

для генераторов:

$$P_{эм} = m_1 E_1 I_1 10^{-3} = m_1 k_H U_1 I_1 10^{-3} = k_H P_2 / \cos \varphi$$

#### **2. Уравнение, определяющее главные размеры машины**

Главными размерами электрической машины называются внутренний диаметр статора или наружный диаметр якоря и расчетная длина статора или якоря.

Расчетная мощность для машины переменного тока:

$$P_{эм} = m_1 E_1 I_1 10^{-3} \text{ кВА} .$$

ЭДС обмотки статора:

$$E_1 = 4\kappa_\phi \kappa_{об1} f_1 W_1 \Phi , \text{ В} .$$

Частота тока в обмотке:

$$f_1 = \frac{pn}{60} , \text{ Гц} .$$

Основной магнитный поток

$$\Phi = \alpha_i l_a \tau B_\delta ;$$

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

### 3. Электромагнитные нагрузки

Анализ выражения показывает, что главные размеры машины зависят от ряда факторов, в первую очередь от магнитной  $B_\delta$  и электрической  $A$  нагрузок машины. Обычно при проектировании машины ее мощность и частота вращения задается. Поэтому активный объем машины зависит от величины электромагнитных нагрузок. Например, если задаться пониженными значениями  $B_\delta$  и  $A$ , то получим машину с большими габаритными размерами, но с высоким КПД, низкой рабочей температурой и следовательно с весьма продолжительным сроком службы. Если же задаться повышенными значениями  $B_\delta$  и  $A$ , то можно получить машину с малыми габаритными размерами, но с низким КПД, высокой рабочей температурой, а следовательно с малым сроком службы. Вполне очевидно, что оба решения неприменимы.

### 4. Потери и КПД электромашины.

Преобразование энергии в электрических машинах механической в электрическую и наоборот сопровождается различными видами потерь возникающими в машине.

Все потери в электрических машинах делят на основные и добавочные.

К основным потерям относятся:

- электрические  $\Delta p_e$ , или как их называют потери в меди, включающие потери в обмотках машины и потери в щеточных контактах (для машин имеющих скользящие контакты)

### 5. Нагрев и охлаждение электромашины.

При работе машины происходит нагрев ее частей, температура которых превышает температуру окружающей среды. Нагревание машины

обусловлено наличием в ней различного вида потерь, поэтому для бесконечно малого промежутка времени можно записать:

$$Q = \Delta p dt ,$$

### **Номинальные режимы работы.**

С точки зрения охлаждения и нагревания существуют три режима работы электрической машины:

- продолжительный, когда машина работает по времени большим, нежели необходимо для достижения установившегося (рис. 1 а);

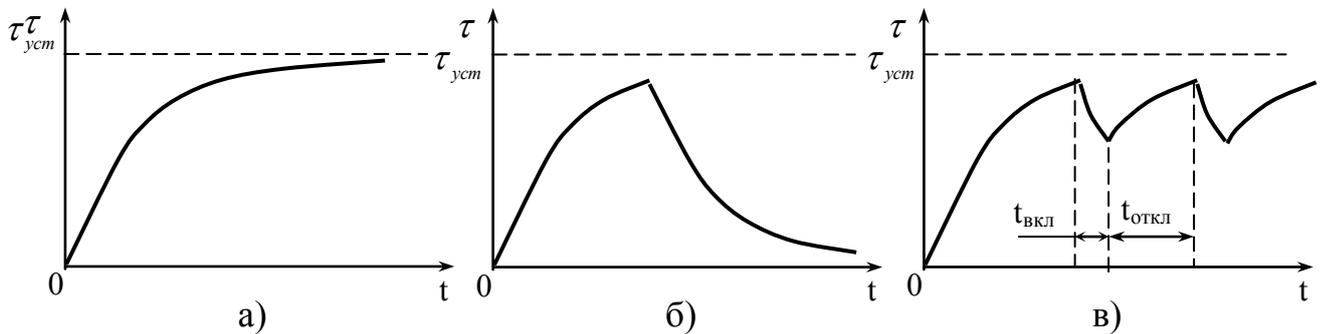


Рис. 1

- кратковременный, когда машина включается, работает, а ее температура не достигает установившегося значения, после чего она отключается и охлаждается до температуры окружающей среды (рис. 1б);

- повторно-кратковременный, когда машина периодически включается и отключается. При работе ее температура не достигает установившегося значения, а при отключении она не успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис. 1в).

### **Способ охлаждения авиационных электромашин.**

Для охлаждения авиационных электрических машин применяются следующие системы охлаждения:

- *воздушное*, отбор тепла машины посредством воздуха. Существуют: *естественное* – непосредственная отдача тепла машиной окружающему воздуху; *самовентиляция* – отбор тепла посредством пропускания через полость машины воздуха нагнетаемого вентилятором, установленным на валу; *продув* – отбор тепла посредством пропускания через полость машины

встречного потока воздуха, поступающего через патрубки от воздухозаборника;

## Лекція № 2.4

### Тема лекції: АСИНХРОННІ МАШИНИ. КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В АСИНХРОННОЇ МАШИНИ. РІВНЯННЯ АМ

#### План лекції

- 1 Конструкція
- 2 Режимы работы
- 3 Потери и КПД электромашины Нагрев и охлаждение электромашины

#### 1. Конструкция.

Основными частями асинхронной машины являются статор и ротор.

Статор (рис.1 ) представляет собой магнитопровод, набранный из отдельных штампованных листов электротехнической стали, на внутренней поверхности которого имеются пазы. В пазах размещается распределенная многофазная обмотка.

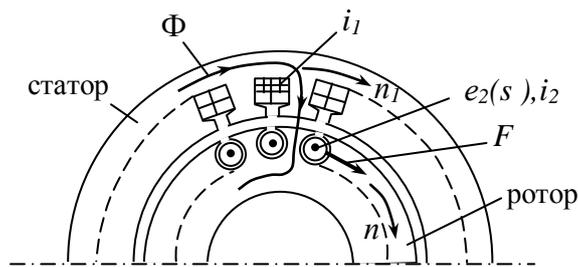


Рис.1

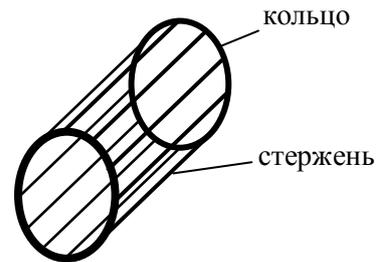


Рис.2

#### 2. Режимы работы.

В зависимости от соотношения частот вращения ротора и поля статора различают следующие режимы работы асинхронной машины:



Рис.3

- 1)  $0 < n < n_1; 0 < S < 1$  - двигательный. Ротор отстает от поля статора. Электрическая энергия, потребляемая от бортсети, преобразуется в механическую.
- 2)  $n=0; S=1$  - пуск. Ротор неподвижен, т.е. момент пуска, еще называют режимом короткого замыкания.

## Лекція № 2.5

### Тема лекції: ПРИВЕДЕННЯ РОТОРА ДО СТАТОРА. Т ТА Г-ПОДІБНІ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ, ВЕКТОРНА ДІАГРАМА. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ, МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА. ВТРАТИ, ЕНЕРГЕТИЧНА ДІАГРАМА, ККД.

#### План лекції

- 1 Порядок приведення ротора к статору
- 2 Т -образная схема замещения
- 3 Г-образная схема замещения
- 4 Энергетическая диаграмма, электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронной электромашини
- 5 Механическая характеристика

#### 1. Порядок приведення ротора к статору

Для количественного анализа процессов протекающих в асинхронной машине, построение схем замещения, векторных диаграмм, вывода выражений для электромагнитного момента, также как и для трансформатора произведем преобразование уравнений описывающих статический режим работы машины.

При вращении ротора ЭДС в его обмотке, согласно равна:

$$\dot{E}_{2S} = 4,44 f_2 W_2 k_{об2} \Phi = 4,44 f_1 S W_2 k_{об2} \Phi$$

Переходя к неподвижному ротору, получаем

$$E_{2S} = E_2 S .$$

Аналогично представляем индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$x_{2S} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 S L_2 = x_2 S .$$

где:  $x_2$ - индуктивное сопротивление обмотки заторможенного ротора.

Данные преобразования позволяют перейти к уравнениям неподвижного ротора, где изменение частоты вращения учтено введением  $S$ .

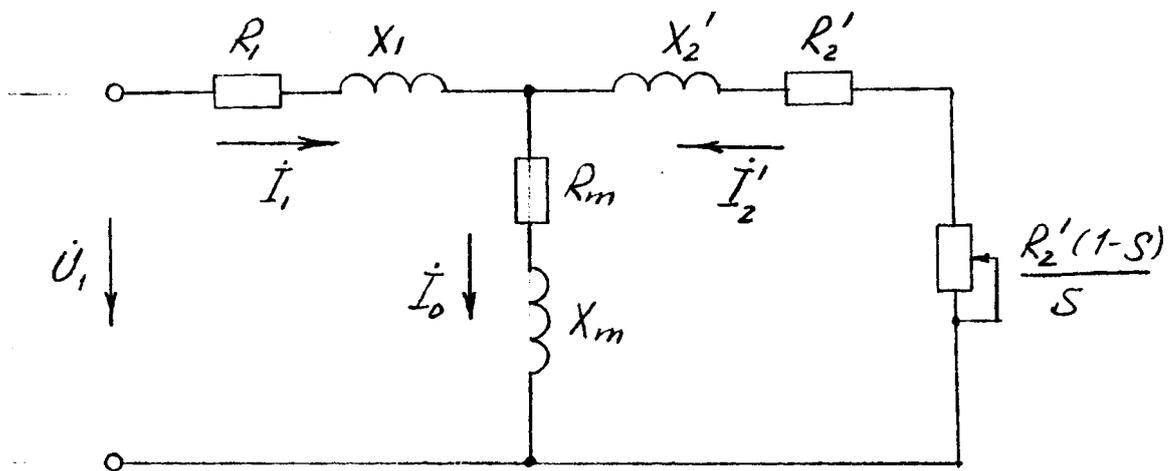
$$\dot{E}_2 S = \dot{I}_2 R_2 + j \dot{I}_2 x_2 S ;$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 / S + j \dot{I}_2 x_2$$

#### 2. Т -образная схема замещения

Построение схемы замещения ведется аналогично схеме замещения трансформатора с той лишь разницей, что сопротивление  $\frac{R'_2}{S}$  представлено

двумя последовательно соединенными сопротивлениями  $R'_2$  и  $\frac{R'_2(1-S)}{S}$ .



Такое представление сопротивления позволяет приблизить схему замещения асинхронного двигателя к схеме замещения трансформатора, в которой в качестве нагрузки подключено сопротивление  $\frac{R_2'(1-S)}{S}$ . Поэтому, считая потери в обмотках машины неизменными, можно сказать, что активная мощность выделяемая на  $\frac{R_2'(1-S)}{S}$  есть мощность развиваемая двигателем при его вращении.

### 3. Г-образная схема замещения

Более удобной схемой замещения асинхронной машины, используемой для вывода выражения электромагнитного момента является Г-образная схема замещения, которая получается из Т-образной путем ее преобразования в результате принятия следующего допущения при изменении скольжения в незначительных пределах: считаем, что намагничивающий ток постоянный.

1. При  $S=0$  (XX) находим  $I_0$

#### 4. Энергетическая диаграмма, электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронной электромашин.

Важнейшим вопросом в работе асинхронной машины является процесс преобразования электрической энергии потребляемой из сети (для двигателя) в механическую. Диаграмма характеризующая этот процесс преобразования называется энергетической диаграммой. На блок схеме представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Пусть к статору из сети подводится мощности  $P_1$  Часть этой мощности тратится на покрытие электрических потерь в в активном сопротивлении обмотки статора и магнитных потерь в магнитопроводе статора. Оставшаяся часть мощности электромагнитная, посредством вращающегося магнитного поля передается в ротор.

$$P_{эм} = P_1 - \Delta p_{м1} - \Delta p_c$$

#### 4. Энергетическая диаграмма, электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронной электромашин

Важнейшим вопросом в работе асинхронной машины является процесс преобразования электрической энергии потребляемой из сети (для двигателя) в механическую. Диаграмма характеризующая этот процесс преобразования называется энергетической диаграммой. На блок схеме представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Пусть к статору из сети подводится мощности  $P_1$ . Часть этой мощности тратится на покрытие электрических потерь в активном сопротивлении обмотки статора и магнитных потерь в магнитопроводе статора.

## 5. Механическая характеристика

Наибольшее значение для оценки свойств асинхронной машины, в особенности для двигателя, отводится механической характеристике, представляющей собой графическую зависимость частоты вращения ротора от электромагнитного момента.

### Лекція № 2.6

#### Тема лекції: РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМ. РЕЖИМИ РОБОТИ

#### План лекції

#### 1 Рабочие характеристики

##### 1. Рабочие характеристики.

Это зависимости потребляемой и полезной мощностей, потерь, КПД от тока двигателя при постоянном токе возбуждения и напряжении сети:  $P_1, P_2, \Delta P, \eta = f(I_a)$  при  $U_c = const; f = const$  (рис.1).

Рабочие характеристики представлены на рис.1

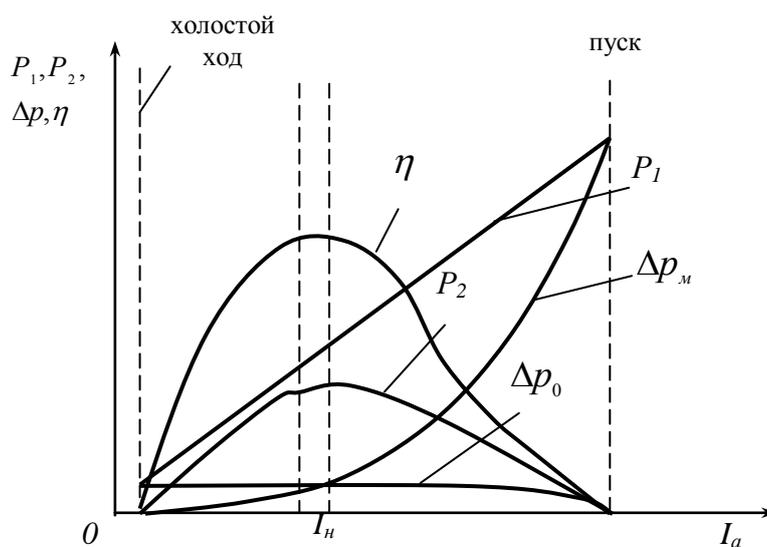


Рис.1

Потери холостого хода ( $\Delta p_0$ ), вследствие незначительного изменения частоты вращения двигателя при нагрузках менее номинальной, можно

считать постоянными. В режиме холостого хода они равны потребляемой мощности ( $P_1 = \Delta p_0$ ).

## Лекція № 2.7

### Тема лекції: СПОСОБИ ПУСКУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ПУСКОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

#### План лекції

- 1 Пусковые моменты и пусковые токи
- 2 Способы пуска
- 3 Применение роторов специального исполнения для улучшения пусковых характеристик

#### 1. Пусковые моменты и пусковые токи

Работа асинхронных двигателей в приводных устройствах характеризуется частыми пусками, остановками, изменениями направления и частоты вращения. Все это происходит в крайне сложных условиях эксплуатации сочетающихся с требованиями высокого быстродействия и надежности при малом весе с габаритных размеров машины. Поэтому наряду с характеристиками, определяющими поведение машины в установившемся режиме, большое значение имеют показатели характеризующие процесс пуска. К ним относятся электромагнитный момент и ток, потребляемый двигателем в момент пуска, которые называются соответственно пусковыми.

$$M_n = \frac{m_1 p_1 U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(c_1 R_1 + c_1^2 R_2')^2 + (c_1 x_1 + c_1^2 x_2')^2]}$$

или  $M_n = \frac{m_1 I_n^2 R_2'}{\omega_1}$

#### 2. Способы пуска

##### 1. Прямой пуск

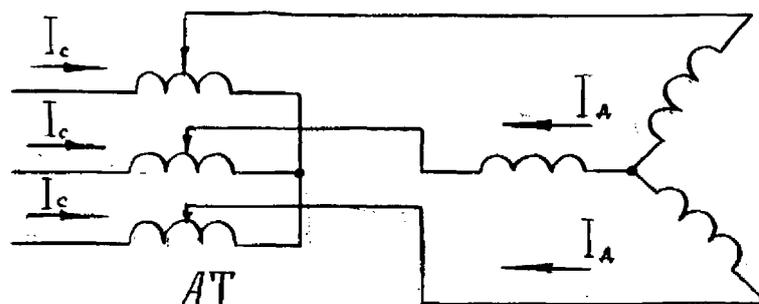
Включение двигателя непосредственно на сеть (прямой пуск) является наиболее простым и надежным. Разгон двигателя происходит по его естественной механической характеристике.

Недостаток данного способа - большой пусковой ток, для различных двигателей колеблется от 3 до 8  $I_{ном}$ .

Данный способ применяется лишь для маломощных двигателей, т.е. двигателей используемых в системах авиационной автоматики.

##### 5. Автотрансформаторный пуск

Питание асинхронного двигателя производится через автотрансформатор.



Ток потребляемый автотрансформатором из сети в  $K_{AT}^2$  ( $K_{AT}$  - коэффициент трансформации автотрансформатора) меньше пускового тока асинхронного двигателя при прямом пуске, т.к.

$$I_D = \frac{U_1}{K_{AT} Z_k}; \quad I_c = \frac{I_D}{K_{AT}} = \frac{U_1}{K_{AT}^2 Z_k} = \frac{I_n}{K_{AT}^2}$$

При этом пусковой момент уменьшается в  $K_{AT}^2$  раз по сравнению с моментом при прямом включении.

### 3. Применение роторов специального исполнения для улучшения пусковых характеристик

Анализируя способы пуска асинхронных двигателей можно сделать вывод, что увеличение пускового момента двигателя не повышая его потери в рабочем режиме возможно путем повышения активного сопротивления цепи ротора только в период пуска.

#### *Глубокопазные асинхронные двигатели*

Двигатели с глубокопазным ротором имеют стержни, у которых отношение высоты к ширине может достигать 10. Поэтому при такой конструкции ротора используется явление вытеснения тока в стержнях, обусловленное пазовыми потоками рассеяния.

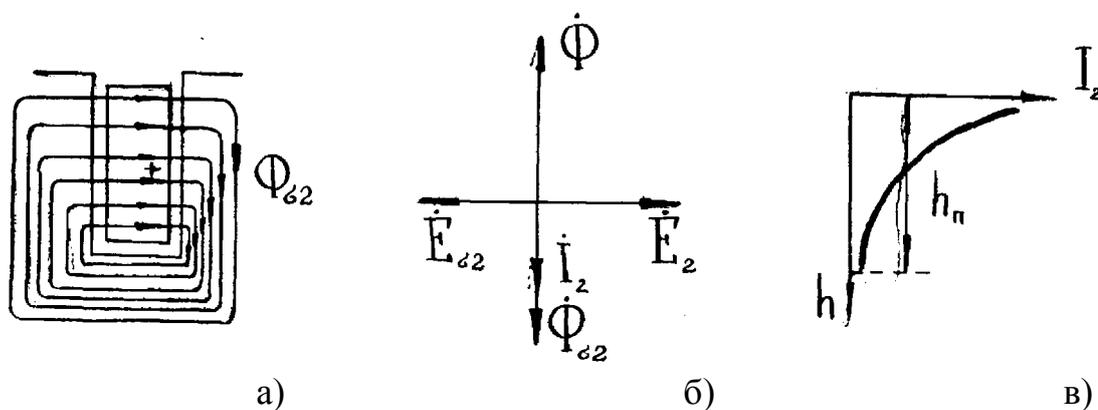


Рис. 1

## Лекція № 2.7

### Тема лекції: СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

#### План лекції

- 1 Регулирование частоты вращения ротора, путем изменения частоты вращения магнитного поля
- 2 Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения
- 3 Импульсное регулирование частоты вращения

Частота вращения асинхронного двигателя определяется формулой

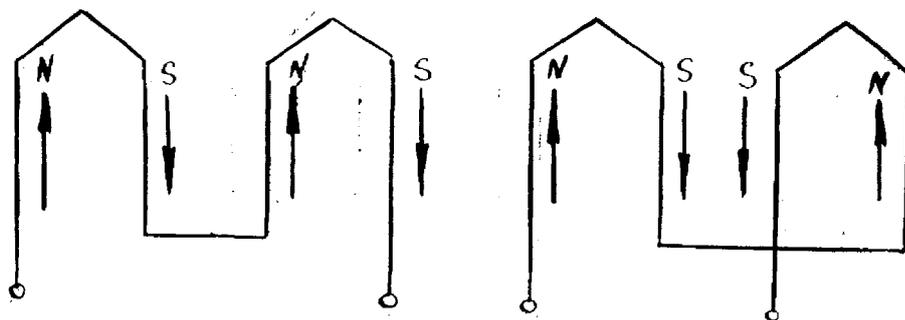
$$n = n_1(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S)$$

Из выражения следует, что регулировать ее можно, изменяя или величину синхронной частоты вращения магнитного поля  $n_1$  или величину скольжения  $S$ .

#### 1. Регулирование частоты вращения ротора, путем изменения частоты вращения магнитного поля

##### Изменение числа пар полюсов

Изменение числа пар полюсов обмотки статора асинхронного двигателя осуществляется либо размещением в одних и тех же пазах двух отдельных обмоток с разным числом  $p$ , либо использованием одной обмотки с соответствующим ее переключением.



При применении данного способа регулирования частота вращения асинхронного двигателя изменяется степенями

$$M_{эм} = c_m I_2 \Phi \cos \varphi_2,$$

т.к.

$$c_m = \frac{m_2 k_{об} p W_2}{\sqrt{2}},$$

то

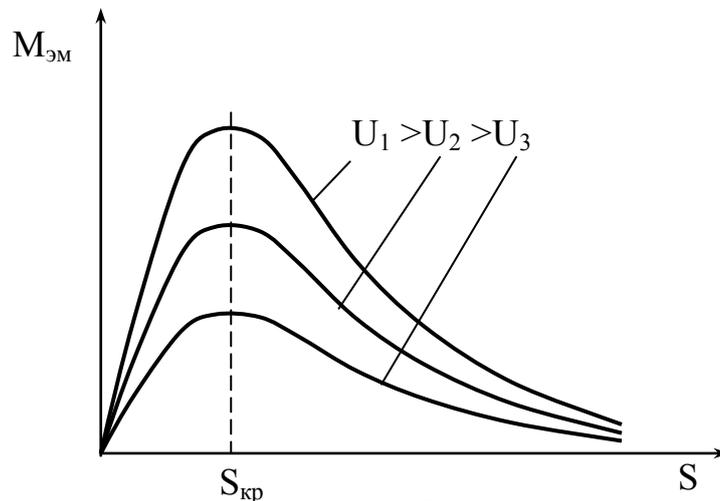
$$M_{эм} k_1 \Phi p,$$

## 2. Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения

### Изменение питающего напряжения

При изменении величины подводимого напряжения изменяется значение максимального момента, при постоянном критическом скольжении. При этом изменение напряжения ведет к изменению точки устойчивой работы двигателя, а значит скольжения.

Для изменения напряжения могут быть использованы регулируемые автотрансформаторы или сопротивления включаемые в цепи фаз статора.



Изменение активного сопротивления фаз статора

Изменение частоты вращения асинхронного двигателя путем изменения активного сопротивления цепи ротора возможно только в двигателях с фазным ротором.

## 3. Импульсное регулирование частоты вращения

При импульсном регулировании обмотки фаз статора периодически подключаются к сети питающего напряжения. В этом случае в течение времени включения двигатель непосредственно присоединен к источнику и электромагнитный момент возрастает, в результате чего происходит ускорение ротора до некоторой угловой скорости  $\omega_1$ .

### Лекція № 2.7

**Тема лекції:** СПЕЦІАЛЬНІ АМ. ОДНОФАЗНІ ТА ДВОФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНІ. СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

### План лекції

- 1 Влияние ненормальных условий на работу 3-фазного асинхронного двигателя
- 2 Особенности и свойства однофазного и конденсаторного асинхронных двигателей

## **1. Влияние ненормальных условий на работу 3-фазного асинхронного двигателя.**

При работе асинхронного двигателя на борту летательного аппарата, вследствие включения и отключения различного рода нагрузок, параметры бортовой сети в различной степени могут отличаться от номинальных, что оказывает существенное влияние на параметры асинхронного двигателя.

### ***Колебания питающего напряжения.***

Изменение питающего напряжения при постоянной частоте приводит к тем же последствиям, что и изменение частоты. Однако увеличение  $U_1$  вызывает рост  $\Phi$ , а уменьшение  $U_1$  - снижение  $\Phi$ .

Колебание  $U_1$ , не более 2%.

### ***Несинусоидальность напряжения.***

Несинусоидальность напряжения сети отражается на работе асинхронного двигателя вследствие влияния высших гармонических МДС статора на значения коэффициента мощности, КПД и  $M_{эм}$ .

Для оценки этого влияния разлагаем несинусоидальное напряжение в гармонический ряд и представляем асинхронный двигатель как ряд машин имеющих общий вал статорные обмотки, которых питаются от отдельных источников.

### ***Несинусоидальность магнитного поля.***

Магнитное поле машины, также как и токи обмоток, помимо основной волны, могут иметь высшие гармонические.

В теме №3 было установлено, что высшие гармонические МДС трехфазной обмотки с порядковым номером  $6k+1$  вращаются в направлении основного поля и имеют синхронную частоту равную:

$$n_v = \frac{60f_1}{p_v} = \frac{60f_1}{vp} = \frac{n_1}{v}$$

где  $p_v = vp$  - число пар полюсов для  $v$ -ой гармоники

### ***Нарушение симметричности подводимых напряжений.***

Для анализа работы асинхронной машины при асимметрии питающего напряжения целесообразно, пренебрегая насыщением пользоваться методом симметричных составляющих, т.е. любую несимметричную систему можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом составляющая нулевой последовательности в токах обмотки статора соединенной  $Y$  обычно не возникают.

## **2. Особенности и свойства однофазного и конденсаторного асинхронных двигателей.**

### ***Нарушение симметричности подводимых напряжений.***

Для анализа работы асинхронной машины при асимметрии питающего напряжения целесообразно, пренебрегая насыщением пользоваться методом симметричных составляющих, т.е. любую несимметричную систему можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом составляющая нулевой последовательности в токах обмотки статора соединенной  $Y$  обычно не возникают. Напряжение прямой последовательности, приложенное к обмотке статора, создает вращающееся магнитное поле в прямом направлении. Скольжение ротора в этом случае равно:

$$S_{np} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

### **Однофазной двигатель**

Однофазное двигателя получает питание от однофазной сети переменного тока. поэтому они имеют ни статоре одну рабочую обмотку. Кроме того, для обеспечения пуска двигателя, что будет изложено ниже, на статоре размещается также вспомогательная, пусковая обмотка, которая чаще всего подключается к сети только во время пуска двигателя. Роторная обмотка однофазного двигателя обычно выполняется коротко замкнутой в виде беличьей клетки.

Т.к. рабочая обмотка однофазного двигателя получает питание от однофазной сети переменного тока, то поле создаваемое током, протекающим по ней, является пульсирующим.

Любое пульсирующее поле может быть разложено на два вращающихся в противоположные стороны с одинаковой скоростью поля, имеющими амплитуды равные половине амплитуды пульсирующего поля.

### **Конденсаторный двигатель**

Конденсатор является лучшим элементом по сравнению с активным или индуктивным сопротивлением. Для одного из режимов в конденсаторных двигателях можно получить круговое поле, уменьшив до нуля обратное поле. Чтобы в воздушном зазоре поле было близким к круговому от режима пуска до номинального режима, необходимо изменять емкость.

### **Лекція № 3.1**

#### **Тема лекції: СИНХРОННІ МАШИНИ. КОНСТРУКЦІЯ, ПРИНЦИП ДІЇ І СХЕМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ**

#### **План лекції**

- 1 Конструкція СГ
- 2 Принцип действия
- 3 Режимы работы

#### **1. Конструкція СГ**

Основными частями синхронной машины являются:

– -якорь (статор)- часть машины, в обмотках которой индуцируется электродвижущая сила (ЭДС). Магнитопровод набран из листов электротехнической стали, имеет на внутренней поверхности пазы, в которых размещается трехфазная распределенная обмотка;

– -индуктор (ротор)- часть машины, создающая основной магнитный поток. Имеет многополюсную конструкцию, набранную из листов электротехнической стали. На полюсах индуктора размещаются обмотки возбуждения.

## 2. Принцип действия

*Основы теории.* Если на обмотку возбуждения (ОВ) индуктора (на роторе, рис. ) подать питания от источника постоянного тока (блок схема), то возникает магнитный поток индуктора ( $\Phi_{\theta}$ ). При вращении ротора с частотой  $n$  поток возбуждения пересекает проводники обмотки якоря (ОЯ, на статоре) и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС, изменяющуюся с частотой

$$f_1 = \frac{pn}{60},$$

где  $p$  – число пар полюсов индуктора.

## 3. Режимы работы

В процессе функционирования можно выделить две группы режимов работы синхронного генератора.

Режим нормального функционирования – когда выходные параметры генератора соответствуют

Аварийный режим – параметры генератора не соответствуют техническим данным и требованиям ГОСТ 19975.

## Лекція № 3.2

**Тема лекції: МАГНІТНЕ ПОЛЕ СИНХРОННОЇ МАШИНИ БЕЗ НАВАНТАЖЕННЯ ТА З НАВАНТАЖЕННЯМ. РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ**

### План лекції

- 1 Магнитное поле при холостом ходе
- 2 Нагрузочный режим. Реакция якоря
- 3 Количественный учет реакции якоря

### 1. Магнитное поле при холостом ходе

#### *Холостой ход*

При холостом ходе СГ ток в обмотке якоря отсутствует. В этом случае магнитное поле машины создается только индуктором. Это поле

можно разложить на две составляющие: основное поле, магнитные линии которого проходят через воздушный зазор и сцепляются с обмоткой якоря, и поле рассеяния полюсов, магнитные линии которого сцепляются только с обмоткой возбуждения.

## 2. Нагрузочный режим. Реакция якоря

При нагрузке генератора ток в обмотке якоря создает магнитодвижущую силу (МДС), основная волна которой вращается синхронно с индуктором и вступает во взаимодействие с его МДС. Поле генератора, обусловленное результирующей МДС, отличается от основного поля, как по величине, так и по форме, что в свою очередь влечет за собой изменение величины и формы наводимой в якоре ЭДС и всех величин, прямо или косвенно зависящих от них. Таким образом, воздействие МДС якоря на основную МДС индуктора, оказывает большое влияние на работу синхронной машины и называется **реакцией якоря**.

## 3. Количественный учет реакции якоря

**Количественный учет реакции якоря неявнополюсного СГ с ненасыщенной магнитной цепью** (блок схема правая часть). В данном случае для количественной оценки реакции якоря пользуются **методом наложения**

**Суть метода:** считают, что МДС индуктора и якоря создают самостоятельные магнитные потоки, которые существуют независимо друг от друга и индуктируют в обмотке якоря самостоятельные ЭДС. Реальный поток в воздушном зазоре машины при нагрузке представляет собой геометрическую сумму двух отдельных потоков. Поэтому определение ЭДС от потока в воздушном зазоре машины при нагрузке сводится к отысканию ЭДС от отдельных потоков, созданных основными гармоническими МДС индуктора и якоря.

**При насыщенной магнитной системе машины с неявновыраженными полюсами** использовать метод наложения для количественного учета влияния реакции якоря нельзя, так как нет пропорциональной связи между потоками и создающими их МДС.

В этом случае результирующий поток можно найти только по результирующей МДС ( $F_{\Sigma}$ ), равной геометрической сумме амплитуд основных гармонических МДС индуктора ( $F_b$ ) и якоря ( $F_a$ ). ЭДС якоря определяется по характеристике, холостого хода, по результирующей МДС ( $F_{\Sigma}$ ).

## Лекція № 3.3

**Тема лекції: РІВНЯННЯ КОЛА ЯКОРЯ СМ. ВЕКТОРНІ ДІАГРАМИ**

### План лекції

- 1 Синхронные индуктивные сопротивления
- 2 Уравнение напряжений и векторные диаграммы

## 1. Синхронные индуктивные сопротивления.

Параметры синхронной машины это коэффициенты перед переменными в уравнениях, описывающих процессы преобразования энергии в синхронных машинах. К параметрам относятся активные и индуктивные сопротивления обмоток статора.

Активные сопротивления фазы обмотки якоря ( $R_a$ ), обмотки возбуждения ( $R_b$ ) и демпферной обмотки ( $R_d$ ) определяются по электрическим потерям в соответствующих обмотках.

## 2. Уравнение напряжений и векторные диаграммы.

### *Неявнополюсный СГ.*

Учитывая, что в фазной обмотке якоря СГ кроме ЭДС реакции якоря и ЭДС рассеяния индуцируется ЭДС ( $E_0$ ) магнитным потоком индуктора (ЭДС холостого хода), а обмотка обладает активным сопротивлением ( $R_a$ ), согласно второму закону Кирхгофа уравнение цепи якоря неявнополюсного генератора запишутся в виде:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_{\sigma a} = \dot{U}_a + \dot{I}_a R_a$$

или

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_a + jx_a \dot{I}_a + jx_{\sigma a} \dot{I}_a + \dot{I}_a R_a$$

Согласно данному уравнению, откладывая вектора, для ненасыщенной магнитной цепи находят вектор  $E_0$ .

Учитывая, что  $E_\delta$  создается результирующим потоком, который пропорционален МДС ( $F_\delta$ ), строят диаграмму МДС СГ. Согласно уравнению:

$$\dot{F}_\delta = \dot{F}_B + \dot{F}_a$$

### **Явнополюсный СГ.**

Аналогично уравнению для неявнополюсного СГ запишем уравнений фазы якоря генератора с явновыраженными полюсами.

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} = \dot{U}_a + \dot{I}_a R_a$$

или

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_a + jx_{ad} \dot{I}_{ad} + jx_{aq} \dot{I}_{aq} + jx_{\sigma a} \dot{I}_a + \dot{I}_a R_a$$

Этим уравнением будем пользоваться при построении векторной диаграммы. В выбранных масштабах откладываем вектор тока ( $\dot{I}_a$ ) и под углом  $\varphi$  к нему вектор напряжения ( $\dot{U}_a$ ).

## Лекція № 3.4

**Тема лекції: ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА. КУТОВІ І U- ПОДІБНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМ**

## План лекції

- 1 Характеристика холостого хода
- 2 Характеристика холостого хода
- 3 Внешняя характеристика
- 4 Регулировочная характеристика
- 5 Нагрузочная характеристика

Рабочие свойства СГ оцениваются характеристиками, т.е. зависимостями одних параметров от других при определенных принятых условиях.

### 1. Характеристика холостого хода.

Зависимость  $E_0 = f(I_g)$  снимается в восходящей и нисходящей ветвях при условии  $I_a = 0$ ;  $f = const$ . При использовании характеристики холостого хода обычно рекомендуется брать нисходящую ветвь.

Восходящая ветвь идет ниже нисходящей так как существует поток остаточного магнетизма.

Прямолинейный участок – магнитная цепь ненасыщена, второй участок – магнитная цепь насыщается, третий участок – магнитная цепь насыщена.

### 2. Характеристика короткого замыкания.

Зависимость  $I_k = f(I_g)$  при  $Z_n = 0$  и  $f = const$ , ток короткого замыкания не должен превышать номинального значения.

Прямолинейная так магнитная цепь ненасыщена.

В режиме короткого замыкания действует размагничивающая реакция якоря.

Вследствие значительной индуктивности обмотки якоря при коротком замыкании синхронный генератор обладает, практически чисто индуктивным характером нагрузки. МДС якоря в этом случае является продольно-размагничивающей.

### 3. Внешняя характеристика.

Зависимость  $U_a = f(I_a)$  при  $I_g = const$ ,  $\cos \varphi = const$ ,  $f = const$  показывает как изменяется  $U_a$  при изменении тока якоря СГ.

Характеристика определяется видом реакции якоря. При активно-индуктивной нагрузке ( $\varphi > 0$ ) в машине действует продольно-размагничивающая реакция якоря, которая вместе с падением напряжения на сопротивлениях обмотки уменьшает напряжение на выводах машины при росте тока якоря.

### 4. Регулировочная характеристика.

Зависимость  $I_g = f(I_a)$  при  $U_a = const$ ,  $f = const$ ,  $\cos \varphi = const$  показывает как надо изменять ток возбуждения при изменении тока якоря генератора, чтобы напряжение оставалось постоянным.

Различие характеристик объясняется неодинаковым действием реакции якоря при разных  $\cos\varphi$ . При активно-индуктивной нагрузке для компенсации влияния продольно-размагничивающей реакции якоря и падения напряжения на сопротивлениях самого якоря с увеличением тока якоря необходимо соответственно увеличить ток возбуждения. При активно-емкостной нагрузке для сохранения  $U_a = \text{const}$  с увеличением тока якоря в пределах рабочих значений необходимо уменьшить ток возбуждения.

#### **4. Нагрузочная характеристика.**

Зависимость  $U_a = f(I_a)$ . при  $I_a = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ .

Нагрузочные характеристики показывают, как изменяется напряжение генератора при изменении тока возбуждения и неизменных значениях тока якоря и характере нагрузки.

Так как характеристика холостого хода является нагрузочной характеристикой при токе якоря равном нулю, то, используя ее и реактивный треугольник, можно построить нагрузочную характеристику при чисто индуктивной нагрузке. Для этого реактивный треугольник ABC перемещают параллельно самому себе так, чтобы его вершина А скользила по характеристике холостого хода, тогда вершина С опишет нагрузочную характеристику. Это соответствует реальности, так как стороны реактивного треугольника при неизменном токе якоря остаются постоянными.

### **Лекція № 4.1**

**Тема лекції: ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ. РІВНЯННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.**

#### **План лекції**

- 1 Определение и классификация электромашин постоянного тока
- 2 Принцип действия и элементы конструкции коллекторных генераторов и двигателей постоянного тока
- 3 Уравнения машин постоянного тока

#### **1. Определение и классификация электромашин постоянного тока**

Электрическая машина постоянного тока по своей физической природе является преобразователем энергии более сложного типа в сравнении с машиной переменного тока.

#### **1. Принцип действия и элементы конструкции коллекторных генераторов и двигателей постоянного тока.**

Машины постоянного тока применяются в качестве электродвигателей и генераторов. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получить как жесткие, так и мягкие механические

характеристики. Поэтому их широко используют для привода различных устройств, а учитывая обратимость машины постоянного тока, для запуска авиационного двигателя.

Генераторы постоянного тока используются как источники электрической энергии.

Основными частями машины постоянного тока являются обмотка возбуждения, расположенная на явно выраженных полюсах, крепящихся к корпусу статора, который, являясь частью магнитопровода, выполняется из магнитопроводящего материала. Полюса изготавливаются шихтованными (из стальных штампованных листов).

### **3. Уравнения машин постоянного тока**

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение для генератора имеет вид:

$$E_a = U_a + I_a R_a.$$

Иными словами, ЭДС, индуцируемая в якоре, уравнивается напряжением на нагрузке  $U_a$  и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря  $I_a R_a$ .

Для двигателя:

$$U_a = E_a + I_a R_a.$$

Приложенное напряжение внешней сети уравнивается ЭДС индуцируемой в обмотке якоря  $E_a$  и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря  $I_a R_a$ .

## **Лекція № 4.2**

### **Тема лекції: ОБЕРНЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. СХЕМИ ЗБУДЖЕННЯ. РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ.**

#### **План лекції**

- 1 Обмотка якоря машины постоянного тока
- 2 Особенности магнитных цепей электромашин постоянного тока
- 3 Электромагнитная мощность и электромагнитный момент электромашин постоянного тока
- 4 Магнитное поле и особенности реакции якоря в электромашине постоянного тока

#### **1. Обмотка якоря машины постоянного тока**

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и подсоединенных к коллектору.

Элементом обмотки якоря является секция (катушка), присоединенная к двум коллекторным пластинам. Расстояние между активными частями секции должно быть равно или мало отличается от величины полюсного деления  $\tau$ .

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

### Простые петлевые и волновые обмотки, их свойства и области применения.

Простая петлевая обмотка.

В простой петлевой обмотке якоря каждая секция присоединена к двум рядом лежащим коллекторным пластинам.

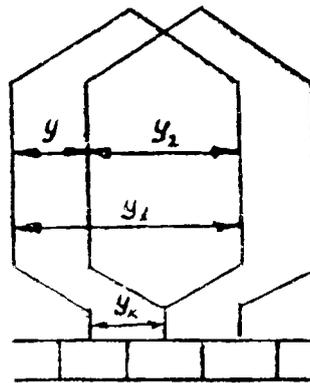
Любая обмотка характеризуется шагами:

$y_1$  - первый частичный шаг, расстояние между -активными сторонами секций;

$y_2$  - второй частичный шаг, расстояние между второй активной стороной одной секции и первой активной стороной другой секции;

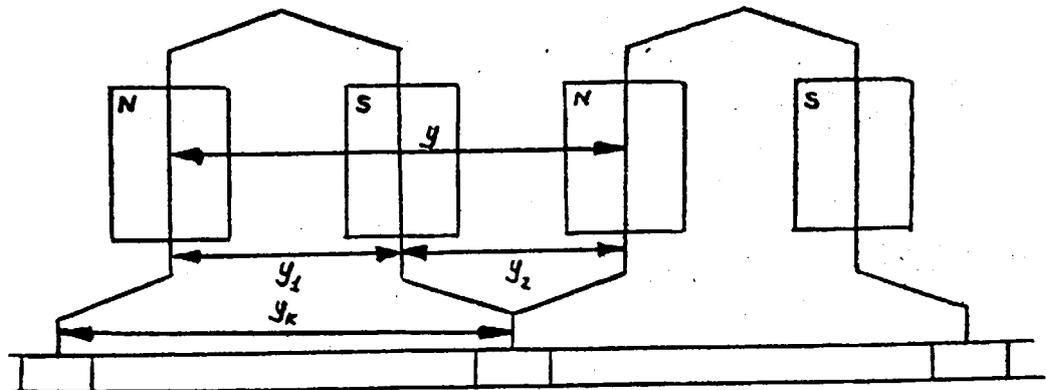
$y$  - результирующий шаг, расстояние между первыми активными сторонами рядом лежащих секций";

$y_k$  - шаг по коллектору, расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец одной секции.



### Простая волновая обмотка.

Простую волновую обмотку получают при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов.



Концы секций простой волновой обмотки присоединены к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстоянии шага обмотки по коллектору ( $y_k$ ). За один обход по якорю укладывают столько

секций, сколько пар полюсов имеет машина. При этом конец последней по обходу секции присоединяется к пластине, расположенной рядом с исходной. Если же эта пластина находится справа от исходной, то обмотку называют правоходовой, если же пластина находится слева от исходной, то называется левоходовой.

## 2. Особенности магнитных цепей электромашин постоянного тока

Магнитная цепь машины постоянного тока состоит из станины (ярма), сердечников полюсов с полюсными наконечниками, воздушного зазора, зубцовой зоны и сердечника якоря.

МДС обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме холостого хода определяется суммой магнитных напряжений на участках магнитной цепи.

$$F_B = 2F_\delta + 2F_Z + F_m + F_{a1} + F_{a2},$$

где  $F_\delta, 2F_Z, F_m, F_{a1}, F_{a2}$  МДС воздушного зазора, зубцового слоя, главного полюса, спинки якоря, станины (ярма) соответственно.

Порядок расчета МДС на участках магнитной цепи машины постоянного тока в принципе такой же, что и в случае с асинхронной машиной.

## 3. Электромагнитная мощность и электромагнитный момент электромашин постоянного тока.

Мгновенное значение ЭДС, индуцируемой в каждом активном проводнике:

$$e = B_\delta v_a l_a,$$

где  $B_\delta$  - индукция в рассматриваемой точке воздушного зазора;

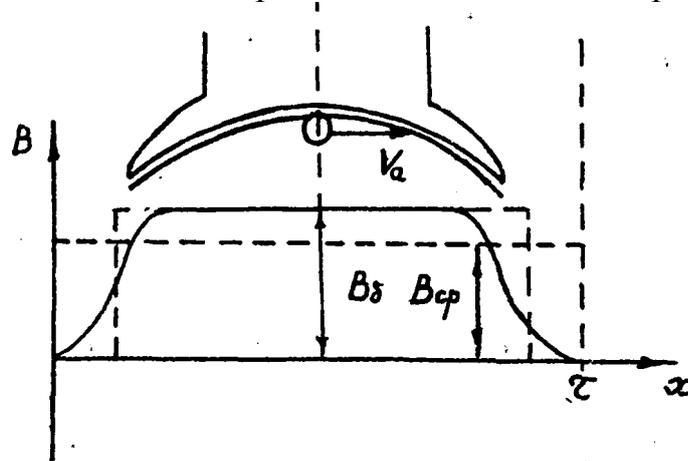
$v_a$  - окружная скорость якоря;

$l_a$  - длина проводника в магнитном поле.

Для  $N/2a$  последовательно соединенных проводников:

$$E = \sum^{N/2a} e = v_a l_a \sum^{N/2a} B_\delta,$$

где  $N$  - общее число активных проводников обмотки якоря.



Если принять закон распределения индукции под полюсом через  $B_{cp}$ , то можно записать:

$$\sum^{N/2a} B_{\delta} \cong (N/2a)B_{cp},$$

**Уравнение, определяющее главные размеры электромашины постоянного тока.**

Мощность, передаваемая электромагнитным путем – электромагнитная мощность, которая определяет габаритные размеры и массу машины.

$$P_{эм} = E_a I_a.$$

### **3. Магнитное поле и особенности реакции якоря в электромашине постоянного тока.**

При работе машины в режиме холостого хода ток в обмотке якоря отсутствует и в машине действует лишь МДС обмотки возбуждения ( $F_{во}$ ). Магнитное поле машины в этом случае симметрично относительно оси полюсов. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой кривую, близкую к трапеции.

При работе машины под нагрузкой по обмотке якоря проходит ток, вследствие чего возникает МДС якоря. Магнитное поле, созданное этой МДС, будет иметь вид, представленный пунктирной линией. Как видим МДС якоря направлена по линии щеток и положение ее определяется положением щеток. Наибольшее значение МДС якоря - на линии щеток, а по оси полюсов эта МДС равна нулю. Однако распределение магнитной индукции в зазоре от потока якоря совпадает с графиком МДС лишь в пределах полюсных наконечников. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабляется, что объясняется увеличением магнитного сопротивления потоку якоря.

## **Лекція № 4.3**

### **Тема лекції: КОМУТАЦІЯ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. УМОВИ САМОЗБУДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА З ПАРАЛЕЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ**

#### **План лекції**

- 1 Коммутация и виды коммутации
- 2 Способы улучшения коммутации
- 3 Условия самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением

#### **1. Коммутация и виды коммутации**

Процесс изменения тока в секциях обмотки якоря при переходе их из одной параллельной ветви в другую называют коммутацией. В более широком смысле под коммутацией понимают все явления и процессы, возникающие под щетками при работе коллекторных электрических машин.

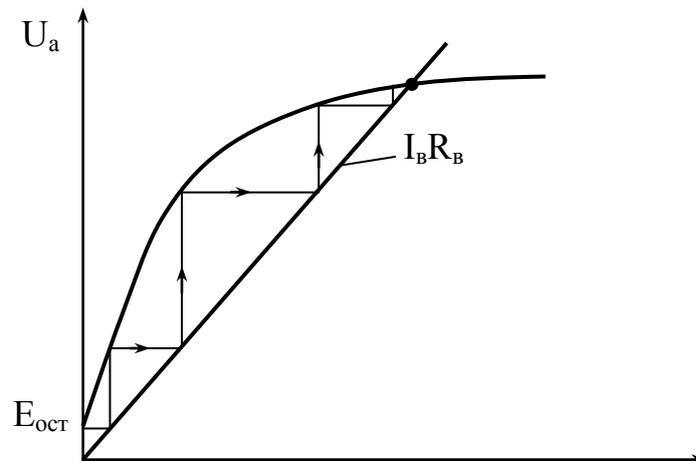
## 2. Способы улучшения коммутации

1. Размещение в межполюсном пространстве дополнительные полюсов с тем, чтобы наводимая полем добавочных полюсов в коммутируемой секции ЭДС вращения  $e_k$  компенсировала реактивную ЭДС  $e_p$ . В этом случае суммарная ЭДС равняется нулю и коммутация становится прямолинейной. Все машины постоянного тока мощностью свыше 1 кВт снабжаются добавочными полюсами число которых принимают равным числу главных полюсов или же вдвое меньшим.

## 3. Условия самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением

К условиям самовозбуждения относятся: наличие потока остаточного магнетизма; совпадение МДС возбуждения с МДС остаточного магнетизма; меньшее сопротивление цепи возбуждения по сравнению с критическим.

Рассмотрим процесс самовозбуждения. При вращении якоря поток остаточного магнетизма  $\Phi_{ост}$  индуцирует в якорной обмотке ЭДС  $E_{ост}$ , под действием которой в обмотке возбуждения протекает ток  $I_B$ .



Если МДС обмотки возбуждения имеет такое же направление как и поток, то она увеличивает поток главных полюсов. Это в свою очередь вызывает увеличение ЭДС генератора  $E_0$ , отчего ток возбуждения вновь увеличится. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора не будет уравновешено падением напряжения в цепи возбуждения, т.е.  $I_B R_B = E_0$ .

### Лекція № 4.4

**Тема лекції: ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ ЗБУДЖЕННЯ**

**План лекції**

- 1 Характеристики генераторов с независимым возбуждением
- 2 Характеристики генератора с параллельным возбуждением

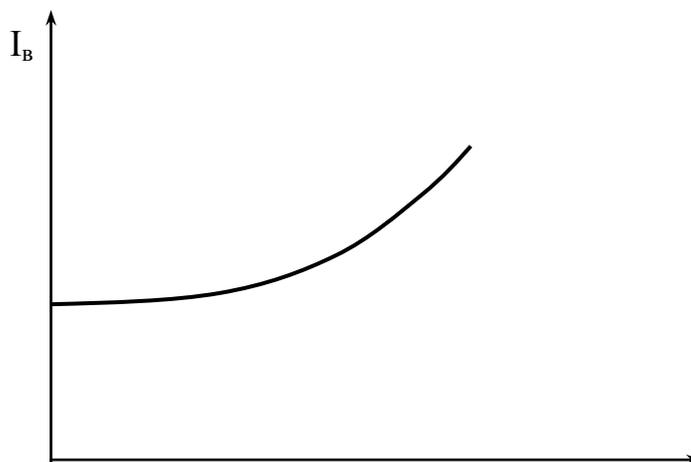
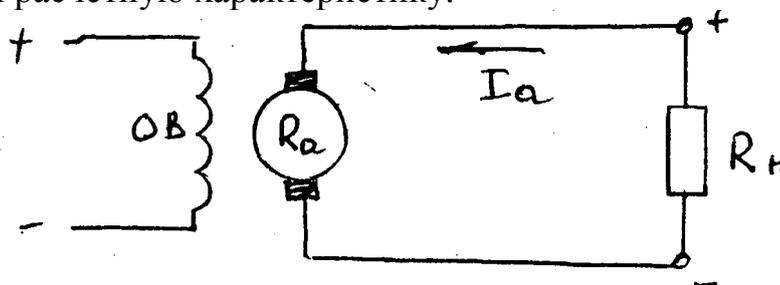
### 1. Характеристики генераторов с независимым возбуждением

Обмотка возбуждения питается от источника энергии постоянного тока. Уравнения генератора имеют вид:

$$E_a = U_a + I_a R_a$$

$$M_{вн} = M_{эм} + M_0$$

*Характеристика холостого хода (ХХХ):* зависимость  $U_0 = f(I_B)$  при  $I_a = 0$ ,  $n = \text{const}$  имеет восходящую 1 и нисходящую 2 ветви. Нисходящая ветвь располагается выше восходящей, что объясняется увеличением магнитного потока остаточного магнетизма. Проводя между кривыми 1 и 2 среднюю линию 3, получим расчетную характеристику.



Возрастающий характер регулировочной характеристики объясняется необходимостью компенсации размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения на активном сопротивлении.

### 2. Характеристики генератора с параллельным возбуждением

Нагрузочная и регулировочная характеристики генератора параллельного возбуждения практически не отличаются от соответствующих характеристик генератора независимого возбуждения. Это объясняется тем, что в генераторе параллельного возбуждения помимо причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в епи якоря), действует еще и третья причина -

уменьшение тока возбуждения, вызванное снижением напряжения от действия первых двух причин.

## **Лекція № 4.5**

### **Тема лекції: ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ПРИНЦИП ДІЇ. РІВНЯННЯ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.**

#### **План лекції**

- 1 Области применения и классификация
- 2 Принцип действия
- 3 Уравнения напряжений и моментов

#### **1. Области применения и классификация.**

Двигатели постоянного тока применяются на ЛА в качестве силовых исполнительных двигателей в системах перекачки топлива, в системах управления рулевыми поверхностями самолета, в преобразователях, в системах авиационной автоматики, в грузоподъемных механизмах.

Двигатели постоянного тока подразделяются по способу возбуждения:

- с независимым возбуждением;
- с параллельным возбуждением;
- с последовательным возбуждением;
- со смешанным возбуждением.

#### **2. Принцип действия.**

Если подвести к обмотке якоря напряжение от источника постоянного тока, то по ней начнет протекать ток  $I_a$  (дв). В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем индуктора появятся электромагнитные силы, создающие электромагнитный момент машины  $M_{эм}$ . Якорь машины приходит во вращение. После поворота якоря на  $180^\circ$  электромагнитный момент не изменяет своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока. При вращении якоря в его обмотке индуцируется ЭДС  $E_a$ , которая с падением напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря  $I_a R_a$  уравнивает приложенное напряжение.

#### **3. Уравнения напряжений и моментов.**

При работе машины постоянного тока в режиме двигателя уравнение электрического равновесия имеет вид:

$$U_c = E_a + I_a R_a$$

Из уравнения следует, что подведенное напряжение к двигателю уравнивается противоЭДС обмотки якоря и падением напряжения в

цепи якоря. Учитывая  $E_a = c_e n \Phi$ , можно получить формулу для определения частоты вращения  $n = \frac{U_a - I_a R_a}{c_e \Phi}$ .

## Лекція № 4.6

### Тема лекції: ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ ЗБУДЖЕННЯ

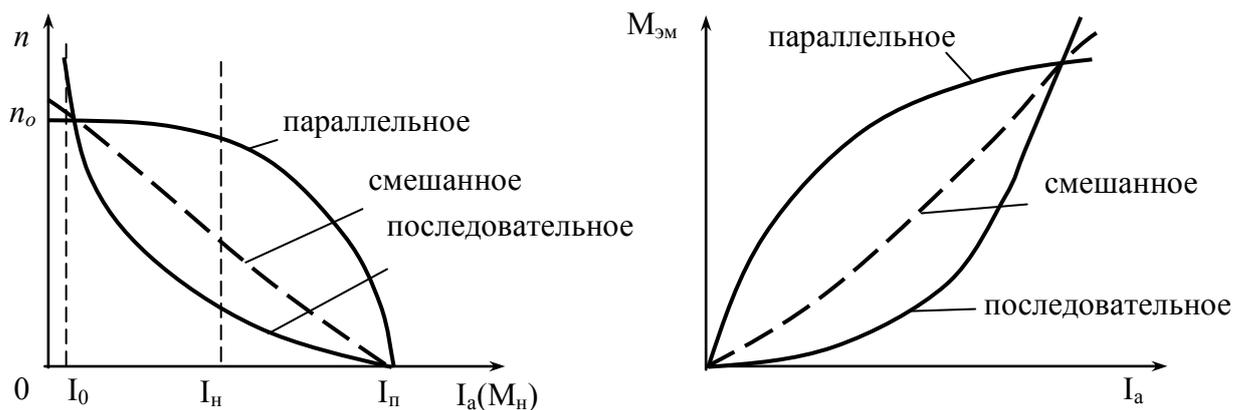
#### План лекції

- 1 Скоростная характеристика
- 2 Механическая характеристика
- 3 Моментная характеристика
- 4 Рабочие характеристики

#### 1. Скоростная характеристика.

Это зависимость частоты вращения от потребляемого тока при постоянном токе возбуждения и напряжении сети  $n = f(I_a)$  при  $I_B = const; U_C = const$ .

Для двигателя с параллельным возбуждением скоростная характеристика жесткая, т.е. при изменении нагрузки на валу (тока якоря) от режима холостого хода до номинального значения ( $I_n$ ) частота вращения изменяется незначительно. Это объясняется тем, что с увеличением падения напряжения на сопротивлении обмотки якоря ( $I_a R_a$ , - числитель выражения 16 уменьшается), уменьшается поток двигателя ( $\Phi$  - знаменатель выражения 16 также уменьшается), вследствие действия размагничивающей реакции якоря. Характеристика имеет характерные точки: точку холостого хода -  $n_0$  и точку короткого замыкания -  $I_n$  (пуск двигателя).



#### 2. Механическая характеристика

Механическая характеристика это зависимость частоты вращения от величины момента нагрузки на валу машины при постоянном токе возбуждения и напряжении сети  $n = f(M_{эм})$  при  $I_B = const; U_C = const$ .

Так как, момент холостого хода ( $M_0$ ) составляет не более 1...3% от номинального момента, то можно считать, что  $M_{эм} = M_{вн}$ . Поэтому, учитывая пропорциональную зависимость электромагнитного момента от тока якоря, механические характеристики двигателей с различным возбуждением имеют точно такой же вид и пояснения, как и скоростные характеристики.

### 3. Моментная характеристика

*Моментная характеристика* это зависимость электромагнитного момента двигателя от тока, потребляемого двигателем при изменении нагрузки с учетом постоянного тока возбуждения и напряжения сети  $M_{эм} = f(I_a)$  при  $I_B = const; U_C = const$ .

*Двигатель с параллельным возбуждением.* При малых нагрузках (ток якоря – мал) магнитный поток постоянный, поэтому зависимость прямолинейная. С увеличением нагрузки (ток якоря возрастает) действует размагничивающая реакция якоря, в результате чего магнитный поток двигателя уменьшается, и рост электромагнитного момента замедляется.

### 4. Рабочие характеристики.

Это зависимости потребляемой и полезной мощностей, потерь, КПД от тока двигателя при постоянном токе возбуждения и напряжении сети:  $P_1, P_2, \Delta P, \eta = f(I_a)$  при  $I_B = const; U_C = const$ .

Для построения и анализа рабочих характеристик умножим уравнение 14 на ток якоря двигателя:

$$U_c I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

где  $U_c I_a = P_1$  - полная (потребляемая мощность);

$E_a I_a = P_{эм}$  - электромагнитная мощность, т.е. мощность, передаваемая электромагнитным путем;

$I_a^2 R_a = \Delta p_m$  - потери в меди.

Электромагнитная мощность расходуется на приводную мощность (нагрузку  $P_2$ ) и мощность холостого хода (потери на трение  $\Delta p_0$ ):

$$P_{эм} = P_2 + \Delta p_0$$

## Лекція № 4.7

**Тема лекції:** СПОСОБИ ПУСКУ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### План лекції

- 5 Прямой пуск
- 6 Реостатный пуск
- 7 Пуск путем плавного повышения питающего напряжения

### 1. Прямой пуск

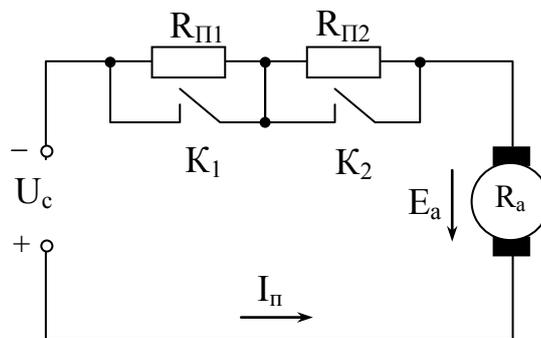
*Прямой пуск*, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети. В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен и в его обмотке не индуцируется ЭДС ( $E_a = 0$ ). Поэтому пусковой ток равен:

$$I_n = \frac{U_a}{R_a}.$$

Так как  $R_a$  невелико, то при прямом пуске  $I_{\text{п}} = (10 \dots 20)I_{\text{ном}}$ , что создает опасность поломки вала машины (большой пусковой момент) и вызывает сильное искрение под щетками. Поэтому пуск применяют в основном для двигателей малой мощности не более 0,7...1,0 кВт. При прямом пуске таких двигателей:  $I_{\text{п}} = (4 \dots 6)I_{\text{п}}$ .

### 2. Реостатный пуск

*Реостатный пуск*, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока.



В начальный период пуска контакторы  $K_1$  и  $K_2$  разомкнуты и в цепь якоря включены пусковые сопротивления  $R_{n1}$ ,  $R_{n2}$ . Пусковой ток равен  $(2 \dots 2,5)I_{\text{ном}}$ :

$$I_{\text{п}} = \frac{U_c}{R_a + R_{\text{п1}} + R_{\text{п2}}}$$

### 3. Пуск путем плавного повышения питающего напряжения.

На двигатель от специального регулируемого источника постоянного тока подается напряжение достаточное для создания требуемого пускового момента, и он приходит во вращение. В последующем напряжение плавно повышается до номинального значения и двигатель набирает обороты. При данном способе пуска отсутствуют недостатки присущие реостатному пуску.

Однако необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением.

## Лекція № 4.9

### Тема лекції: РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ТА НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ

#### План лекції

- 1 Регулирование частоты вращения
- 2 Включение и изменение добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря
- 3 Изменение магнитного потока
- 4 Изменение питающего напряжения

#### **1. Регулирование частоты вращения.**

Анализируя выражение для частоты вращения

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{c_e \Phi}$$

можно выделить следующие способы ее регулирования:

- 1) включением и изменением добавочного сопротивления ( $R_{доб}$ ) в цепь обмотки якоря;
- 2) изменением магнитного потока;
- 3) изменением питающего напряжения;

#### **2. Включение и изменение добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря.**

При включении сопротивления в цепь якоря частота вращения с ростом нагрузки уменьшается быстрее, чем при работе двигателя без реостата.

$$n = \frac{U_c - I_a (R_a + R_{доб})}{c_e \Phi} = \frac{U_c - I_a R_a}{c_e \Phi} - \frac{I_a R_{доб}}{c_e \Phi} ,$$
$$n = n_1 - \Delta n$$

где  $n_1 = \frac{U_c - I_a R_a}{c_e \Phi}$  - частота вращения двигателя при отсутствии

добавочных сопротивлений;

$\Delta n = \frac{I_a R_{доб}}{c_e \Phi}$  - изменение частоты вращения за счет включения

добавочных сопротивлений.

На рис.1 приведены скоростные и механические характеристики.

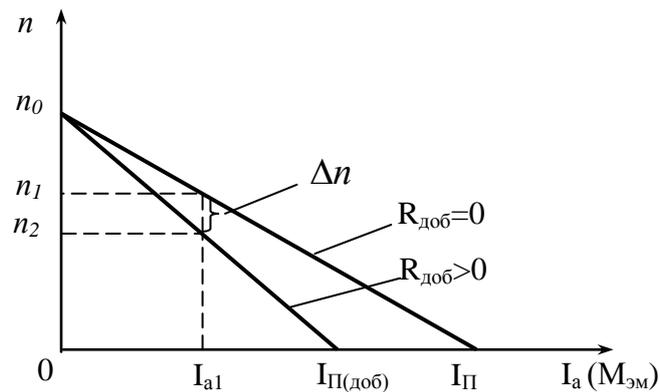


Рис.1

Для удобства построения этих характеристик находим характерные

точки ( $n_0 = \frac{U_c}{c_e \Phi}$  и  $I_{П} = \frac{U_c}{R_a + R_{доб}}$ ) и пренебрегаем размагничивающим

действием реакции якоря, тогда они имеют вид прямых.

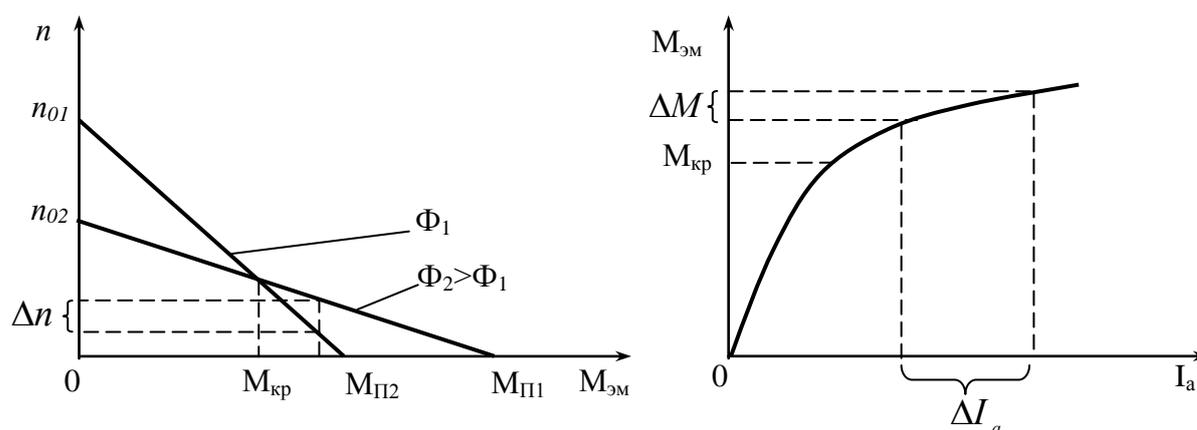
### 3. Изменение магнитного потока.

Чтобы изменить магнитный поток, необходимо регулировать ток возбуждения двигателя. В двигателях с параллельным возбуждением частота вращения и ее изменение обратно пропорциональны изменению магнитного потока.

Скоростные характеристики при различных магнитных потоках  $\Phi_1$   $\Phi_2$  ( $n_{01} = \frac{U_c}{\Phi_1}; n_{02} = \frac{U_c}{\Phi_2}$ ) пересекаются в точке пуска, так как в данном случае

пусковой ток не зависит от потока. Таким образом, увеличение магнитного потока вызывает уменьшение частоты вращения на величину  $\Delta n$ .

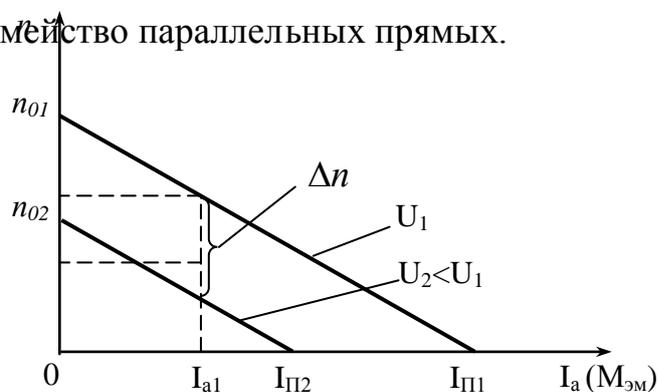
Механические характеристики двигателей с параллельным возбуждением при данном способе регулирования представлены на рис.



При работе электродвигателя на нагрузку, меньших  $M_{кр}$ , процесс регулирования частоты вращения не отличается от рассмотренного выше, т.е. уменьшение магнитного потока вызывает увеличение частоты вращения.

#### 4. Изменение питающего напряжения.

Изменение питающего напряжения ведет к пропорциональному изменению частоты вращения, поэтому скоростные и механические характеристики электродвигателя с параллельным возбуждением представляют собой семейство параллельных прямых.



Увеличение питающего напряжения вызывает увеличение частоты вращения ( $\Delta n$ ) электродвигателя и наоборот.

## Лекція № 4.10

### Тема лекції: РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

#### План лекції

- 1 Способи регулювання
- 2 Шунтирование обмотки якоря
- 3 Шунтирование обмотки возбуждения
- 4 Изменение питающего напряжения
- 5 Изменение направления вращения

#### 1. Способи регулювання

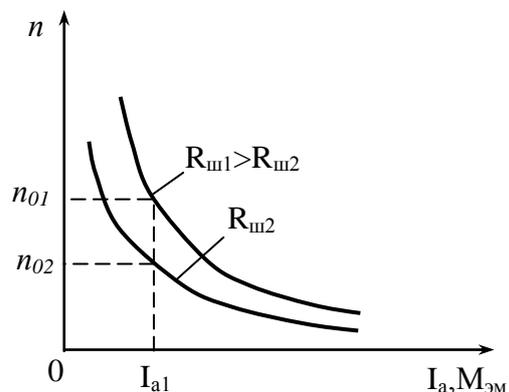
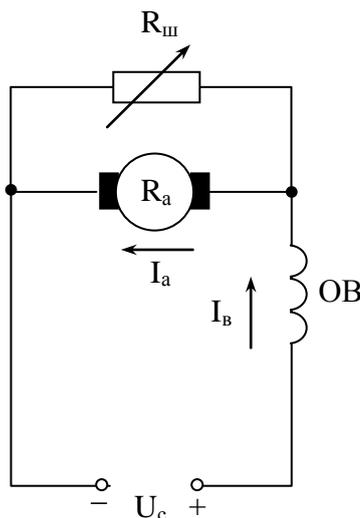
Так как обмотка возбуждения двигателя включена последовательно с обмоткой якоря, а ток возбуждения является током якоря, в двигателях с последовательным возбуждением применяются следующие способы регулювання частоты вращения:

- 1) шунтированием обмотки якоря;
- 2) шунтированием обмотки возбуждения;
- 3) изменением питающего напряжения.

#### 2. Шунтирование обмотки якоря.

При шунтировании обмотки якоря и изменении величины сопротивления шунта изменяется общее сопротивление ( $R_{об}$ ) двигателя:

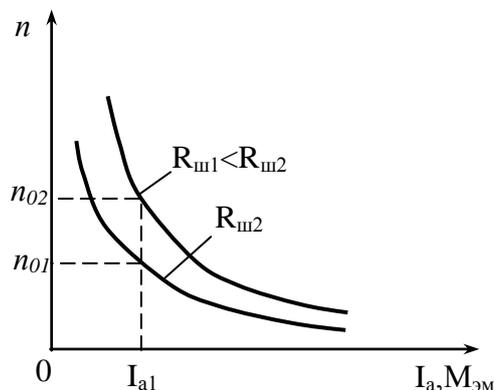
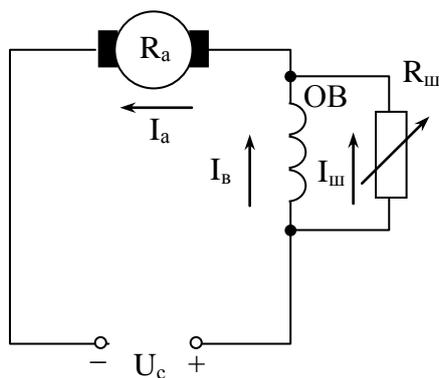
$$R_{об} = \frac{R_a \cdot R_{ш}}{R_a + R_{ш}}$$



В результате этого изменяется ток, потребляемый двигателем, который является током возбуждения ( $I_b$ ). Это ведет, как следует из выражения, к изменению частоты вращения. Например, увеличение сопротивления шунта вызывает уменьшение тока  $I_b$ , а значит и магнитного потока ( $\Phi$ ), обороты двигателя возрастают с  $n_{02}$  до  $n_{01}$ .

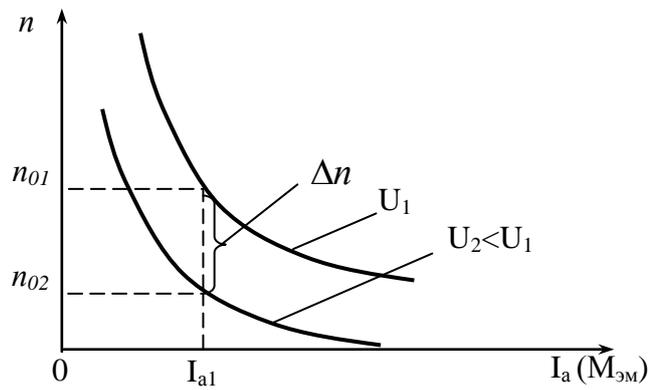
### 3. Шунтирование обмотки возбуждения.

При изменении сопротивления шунта изменяется величина тока замыкающегося через него, а значит и величина тока возбуждения. Обороты двигателя изменяются. Например, в случае увеличения сопротивления шунта, большая часть потребляемого тока ответвляется, через обмотку возбуждения, магнитный поток возрастает и обороты двигателя, согласно выражения, уменьшаются с  $n_{01}$  до  $n_{02}$ .



### 4. Изменение питающего напряжения.

Изменение питающего напряжения в двигателе с последовательным возбуждением ведет к пропорциональному изменению частоты вращения, поэтому скоростные и механические характеристики, как и для электродвигателя с параллельным возбуждением представляют собой семейство кривых.



Увеличение питающего напряжения вызывает увеличение частоты вращения ( $\Delta n$ ) электродвигателя и наоборот.

### 5. Изменение направления вращения.

Чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо изменить направление электромагнитного момента, действующего на якорь.

Как следует из выражения, это можно осуществить двумя способами:

- путем изменения направления тока ( $I_a$ ) в обмотке якоря;
- путем изменения направления магнитного потока, т.е. тока возбуждения.

Для этого переключают провода, подводящие ток к обмотке якоря или возбуждения.