

**Министерство образования и науки, молодежи и спорту**

**Украины**

**Донбасская государственная машиностроительная академия**

Составитель Н.В.Климченкова

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**по дисциплине**

**«Электрические машины»**

для студентов специальности 7.092203 всех форм обучения

Утверждено

Декан ФАМИТ

\_\_\_\_\_ С.В. Подлесный

Утверждено

на заседании

методического семинара кафедры ЭСА

Протокол № 20 от 24.02. 2012

**Краматорск 2012**

**Министерство науки и образования, молодежи и спорта  
Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
по дисциплине  
«Электрические машины»**

для студентов специальности 7.092203 всех форм обучения

# 1. Трансформаторы.

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, передающий энергию из одной цепи в другую посредством электромагнитной индукции. Он применяется для различных целей, но чаще всего служит для преобразования напряжения и тока.

Трансформаторы бывают: силовые, измерительные, специального назначения. Кроме того, трансформаторы различаются по числу фаз на однофазные и трехфазные; по способу охлаждения на сухие и жидкостные. Условные обозначения трансформаторов (рис 1.1):

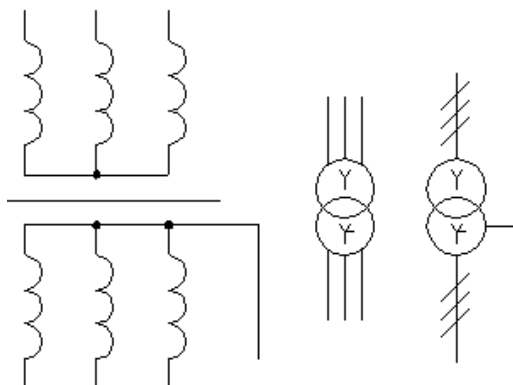


Рис.1.1 Условные обозначения трансформаторов: однофазного); трехфазного  
Основные соотношения для однофазного трансформатора.

Трансформатор состоит из двух или более обмоток, расположенных на общем сердечнике, который для улучшения магнитной связи между обмотками изготавливается из ферромагнитного материала.

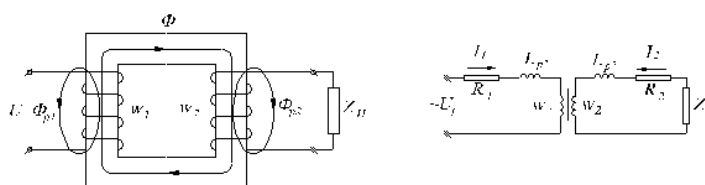


Рис.1.2 Устройство однофазного трансформатора (а) и его схема замещения (б)

При анализе электромагнитных процессов в катушке с сердечником мы выяснили, что при питании ее синусоидальным напряжением магнитный поток можно считать синусоидальным, несмотря на нелинейность зависимости  $B=f(H)$ :  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ .

Этот поток сцеплен с двумя обмотками  $w_1$  и  $w_2$  и индуцирует в них ЭДС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = a w_1 \Phi_m \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right) = E_{m1} \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = a w_2 \Phi_m \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right) = E_{m2} \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right)$$

$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m$ ;  $E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m$ .

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

Из последних двух выражений

Величина называется коэффициентом трансформации трансформатора.

При номинальной нагрузке КПД трансформатора достигает 98%. Это дает возможность считать одинаковыми первичную и вторичную полные мощности трансформатора:

$$S_1 = U_1 I_1 \quad S_2 = U_2 I_2.$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}.$$

Тогда

Как и в цепи катушки с ферромагнитным сердечником, заменим несинусоидальный ток трансформатора эквивалентным синусоидальным и, учитывая индуктивности рассеивания первичной обмотки  $L_{p1}$  и вторичной обмотки  $L_{p2}$ :  $x_{p1} = \omega L_{p1}$ ;  $x_{p2} = \omega L_{p2}$ ,

а также  $R_1$  - активное сопротивление первичной обмотки;  $R_2$  - активное сопротивление вторичной обмотки;  $Z_n$  - сопротивление нагрузки,

запишем уравнения для обеих цепей по 2-му закону Кирхгофа в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 R_1 + jx_{p1} \dot{I}_1 - \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 R_2 + jx_{p2} \dot{I}_2 - \dot{E}_2 + \dot{U}_n &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Холостой ход трансформатора. При холостом ходе трансформатора имеем

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{10} R_1 + jx_{p1} \dot{I}_{10} - \dot{E}_1 &= \dot{U}_1; \\ -\dot{E}_2 + \dot{U}_n &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Первое из уравнений ничем не отличается от уравнения катушки с ферромагнитным сердечником. Следовательно, векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода будет аналогичной векторной диаграмме катушки.

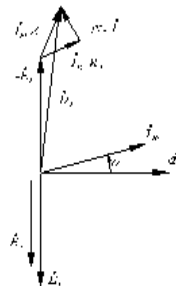


Рис.1.3 Векторная диаграмма трансформатора в режиме х.х

Следует иметь ввиду, что на векторной диаграмме не отображены количественные соотношения между напряжениями  $I_{10}R_1$ ,  $I_{10}x_{p1}$  и ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . На самом деле, напряжения  $I_{10}R_1$ ,  $I_{10}x_{p1}$  составляют всего несколько процентов  $E_1$ . В свою очередь ток холостого хода  $I_{10}$  составляет всего от 10 до 4%

номинального тока трансформатора. Поэтому с помощью опыта холостого хода определяется коэффициент трансформации:

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Этот коэффициент указывается на щитках трансформаторов как отношение высшего напряжения к низшему 6000/230 В: .

Мощность потерь в обмотках трансформатора в режиме холостого хода пренебрежимо мала, так как ток  $I_{10}$  достаточно мал. Все потери в этом режиме работы трансформатора определяются потерями в сердечнике.

Режим нагрузки трансформатора

Поток в магнитопроводе в режиме холостого хода трансформатора  $\dot{\Phi}_m = \frac{\dot{I}_{10} w_1}{R_m}$  . При подключении сопротивления нагрузки  $Z_n$  во вторичной цепи появляется ток  $I_2$  . В соответствии с законом Ленца МДС  $I_2 \cdot w_2$  будет направлена так, чтобы ослабить поток  $\Phi$  , который ее вызвал. Величина ЭДС  $E_1 = U_1$  и не зависит от режима работы трансформатора:  $(E = 4,44 w f \Phi_m)$  .

При  $E_1 = U_1$  компенсация уменьшения потока производится за счет увеличения тока  $I_1$  , в соответствии с равенством  $\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_{10} w_1$  . Из уравнения видно, что увеличение  $I_2$  приводит к увеличению  $I_1$  . В

результате геометрическая сумма  $(\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2)$  остается постоянной и равной  $\dot{I}_{10} w_1$  . Последнее

выражение можно записать как  $\dot{I}_1 = (-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}) + \dot{I}_{10} = \dot{I}_2^l + \dot{I}_{10}$  , где  $\dot{I}_2^l = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$  .

Таким образом, первичный ток равен векторной сумме тока холостого хода и приведенного вторичного тока. Ток холостого хода  $I_{10}$  составляет лишь несколько процентов от тока  $I_1$  в режиме номинальной

нагрузки. Поэтому  $I_1 \approx I_2^l$  или  $I_1 = -\frac{w_2}{w_1} I_2$  , или  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}$  . Уравнения для первичной и вторичной цепей трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} -\dot{I}_2 R_2 - jx_{p2} \dot{I}_2 + \dot{E}_2 - \dot{U}_n &= 0; \\ \dot{I}_1 R_1 + jx_{p1} \dot{I}_1 - \dot{E}_1 &= \dot{U}_1; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \dot{I}_2^l; \quad \dot{I}_2^l = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \end{aligned} \right\}$$

Построение векторной диаграммы начинают с вектора магнитного потока  $\Phi$  . Вектор тока  $I_{10}$  опережает вектор магнитного потока  $\Phi$  на угол магнитного запаздывания. Вектор  $E_2$  отстает от вектора  $\Phi$  на 90 градусов. Вектор  $I_2$  составляет угол  $\phi$  с ЭДС  $E_2$  (при условии индуктивного характера  $I_2$  нагрузки вектор тока

будет располагаться в третьей четверти). Величина  $\phi$ , с учетом параметров вторичной обмотки

трансформатора, определяется выражением  $\phi = \arctg \frac{x_{p2} + x_n}{R_2 + R_n}$ .

Чтобы построить вектор  $U_n$  необходимо из вектора  $E_2$  вычесть векторы  $jx_{p2} \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_2 R_2$ : из конца вектора  $E_2$

опускаем перпендикуляр на вектор  $\dot{I}_2$  и откладываем  $-j\dot{I}_2 x_{p2}$ , затем из начала вектора  $-jx_{p2} \dot{I}_2$  проводим

прямую, параллельную току  $\dot{I}_2$  и откладываем вектор  $-\dot{I}_2 R_2$ . Полученную точку соединяем с началом

координат. В результате получаем вектор напряжения  $\dot{U}_n$  на нагрузке (рис. 1.4).

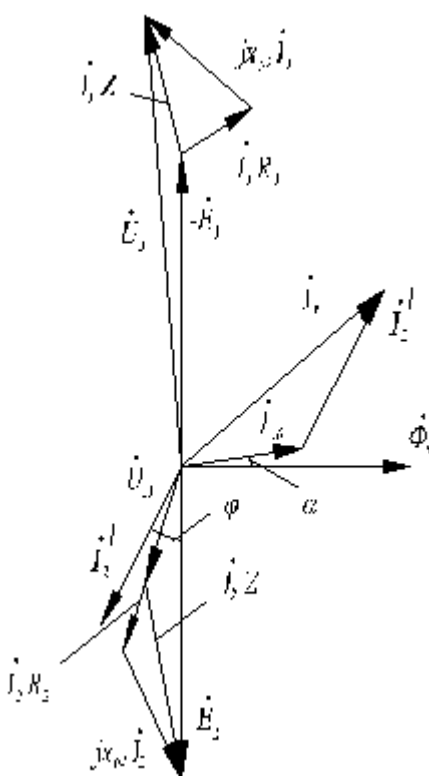


Рис.1.4 Векторная диаграмма

Эквивалентная схема и параметры приведенного трансформатора

При расчетах необходимо сопоставить параметры первичной и вторичной цепей трансформатора. Если коэффициент трансформации велик, например, более 100, то изобразить векторные диаграммы первичной и вторичной цепей невозможно, т. к. при конкретных величинах векторов напряжения, токов и падений напряжений первичной (вторичной) цепи векторная диаграмма вторичной (цепи) вырождаются в точку. Эту проблему можно решить, если пользоваться приведенной схемой замещения трансформатора, в которой число витков вторичной обмотки равно числу витков первичной, но при этом не изменяются энергетические соотношения. Положим, что вторичная обмотка приводится к первичной, тогда

$$E_2 = I_2 w_2 = w_1 I_2' \quad I_2' = \frac{w_2}{w_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2; \quad I_2' = \frac{I_2}{k}; \quad E_2' = k E_2; \quad r_2 I_2^2 = r_2' I_2'^2; \quad r_2' = \frac{r_2}{I_2^2 / I_2'^2} = k^2 r_2;$$

$$r_2' = k^2 r_2; \quad Q = U_2 I_2 \sin \varphi = I_2^2 Z \sin \varphi = I_2'^2 x_{\varphi 2} = I_2'^2 x_{\varphi 2}' = \frac{I_2'^2}{k^2} x_{\varphi 2}'; \quad x_{\varphi 2}' = k^2 x_{\varphi 2}; \quad Z_n' = k^2 Z_n.$$

Эквивалентную схему замещения трансформатора заменяем схемой замещения приведенного трансформатора

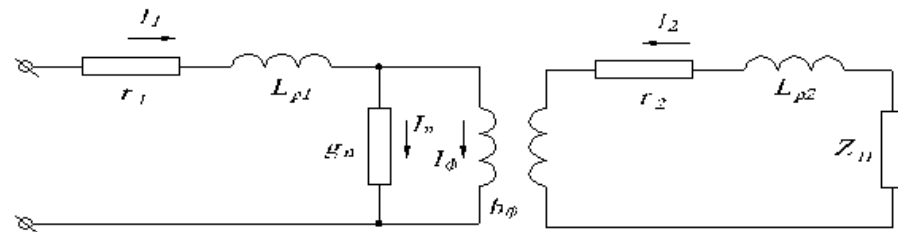


Рис 1.5 Эквивалентная схема приведенного трансформатора

$$b_{\phi} = \frac{I_{\varphi}}{E_1} \quad b_{\phi} = \frac{I_{\varphi}}{E_1}$$

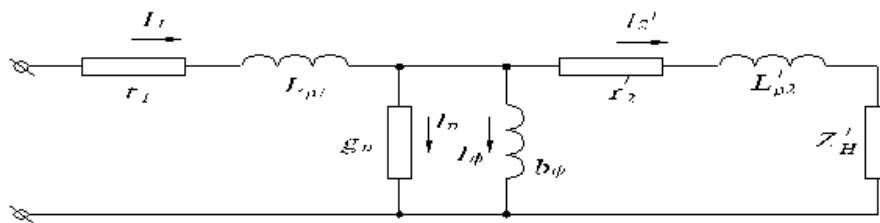


Рис.1.6. Схема замещения приведенного трансформатора с учетом потерь в магнитопроводе

Режимом короткого замыкания называется режим, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко. Если при опыте холостого хода определяются потери в сердечнике трансформатора, то при опыте короткого замыкания определяются потери в обмотках трансформатора. На первичную обмотку трансформатора подается напряжение такой величины, при которой ток в первичной цепи равен номинальному. При этом измеряется мощность, потребляемая трансформатором из сети, напряжение, ток (рис.1.7):

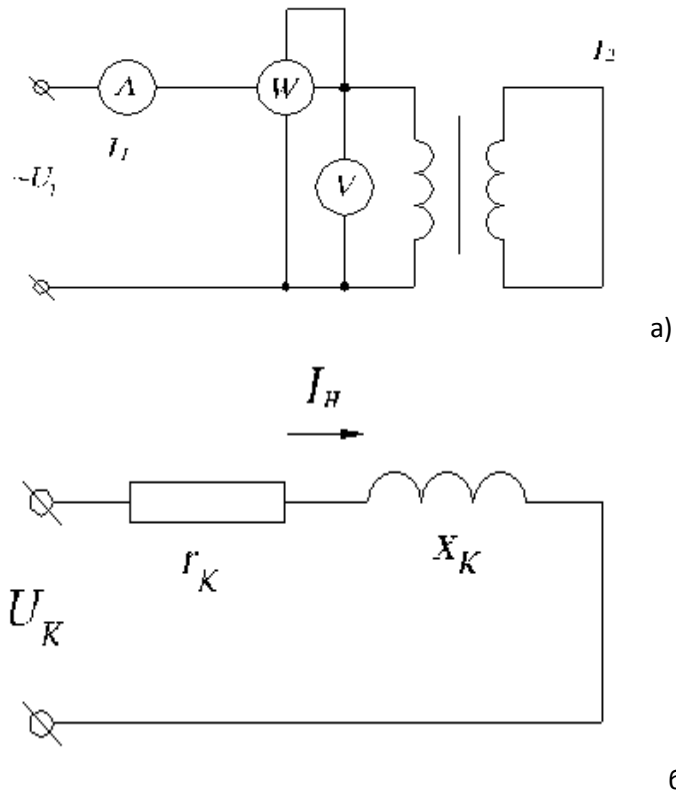


Рис.1.7. Схемы измерения тока, напряжения и мощности в режиме к. з. трансформатора (а), схема замещения приведенного трансформатора в режиме к.з. (б)

Величина  $U_k$  составляет 5-10% номинального напряжения. Так как поток прямо пропорционален напряжению питания трансформатора, а потери в сердечнике пропорциональны квадрату потока, то в режиме короткого замыкания потерями в сердечнике можно пренебречь. Током холостого хода также пренебрегают, так как его величина незначительна по сравнению с  $I_{ном}$ . Поэтому  $g_0$  и  $b_0$  в схеме замещения трансформатора в режиме короткого замыкания отсутствуют.

Параметры трансформатора определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= \frac{U_k}{I_k}; r_k = \frac{P_k}{I_{ном}^2}; x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}; \\ r_1 &\approx r_2' \approx \frac{r_k}{2}; x_1 \approx x_2' \approx \frac{x_k}{2}. \end{aligned} \right\}$$

Особенности работы трехфазных трансформаторов.

Все соотношения, которые мы получили для однофазных трансформаторов, справедливы и для трехфазных трансформаторов, точнее для одной фазы трансформатора, нагруженного симметрично.

Возьмем три однофазных трансформатора и подключим их к трехфазной цепи (рис.1.86).



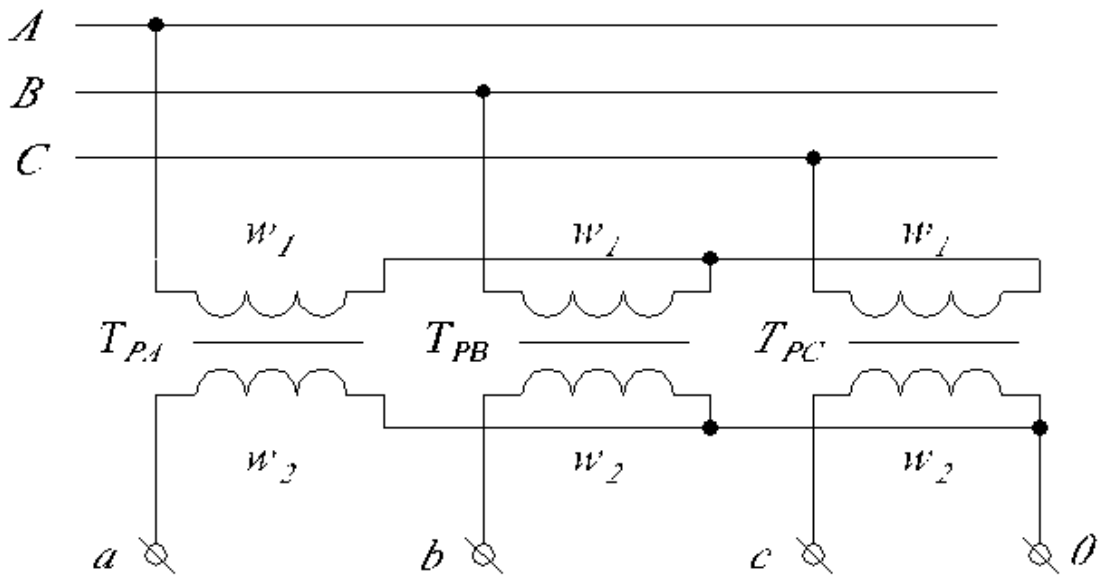


Рис.1.86. Трехфазный трансформатор, состоящий из трех однофазных

В результате на выводах а, b и с получим три фазных напряжения  $e_a, e_b, e_c$  (по отношению к выводу 0) и величина этих напряжений определяется отношением  $w_1/w_2$  - коэффициентом трансформации трансформатора. Вместо трех однофазных трансформаторов можно взять один трехфазный (рис.1.9а).

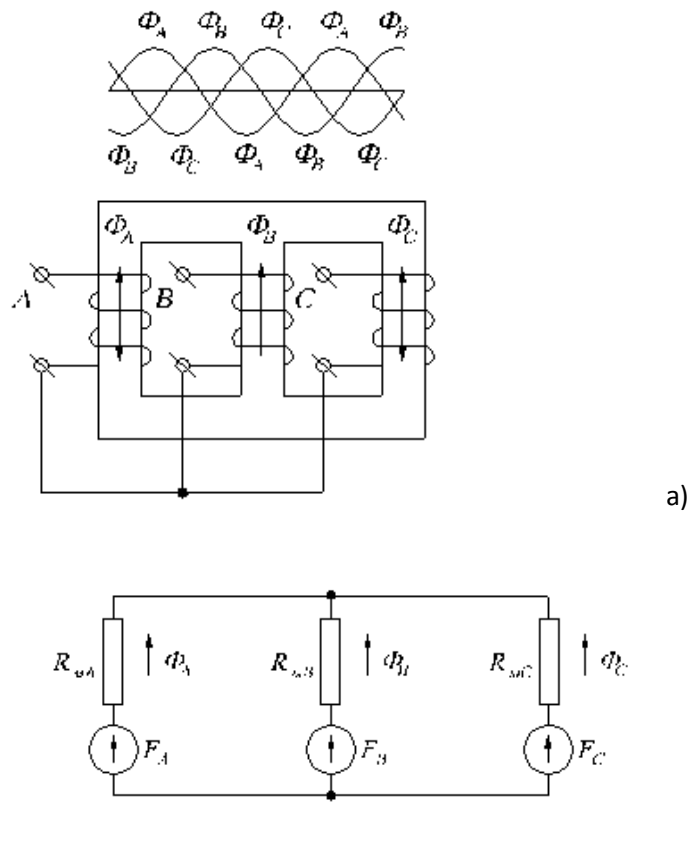


Рис.1.9. Устройство трехфазного трансформатора (а) и его схема замещения магнитной цепи (б)

На каждый из стержней магнитопровода наматывается одна первичная обмотка и одна или несколько вторичных обмоток трансформатора. Магнитное сопротивление отличается от магнитных сопротивлений и (рис. 1.9б), что приводит к некоторой асимметрии намагничивающих токов. Однако эту асимметрию в основных соотношениях каждой из фаз для симметричного режима работы трансформатора можно не учитывать. Трансформаторная группа из трех трансформаторов дороже, чем трехфазный трансформатор той же мощности, она занимает больше места и ее КПД ниже. Но в случае аварии в группе трансформаторов, как правило, выходит из строя лишь один из трех трансформаторов. Таким образом, группа из трех трансформаторов обеспечивает большую эксплуатационную надежность. Большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняются трехфазными. Начиная с мощности  $3 \times 600 = 1800$  кВА, допускается применение трех трансформаторов, вместо одного.

Обмотки трансформатора соединяются звездой (Y) или треугольником ( $\Delta$ ). Соединение обмоток звездой целесообразнее при больших питающих напряжениях и малых токах. При больших токах применяют соединение треугольником. При больших напряжениях питающей сети и больших токах нагрузки наиболее целесообразный способ соединения обмоток трансформатора - (Y/). Отношение всегда равно трансформатора, а отношение линейных напряжений зависит от способа соединений обмоток трансформатора. Изменяя способ соединения обмоток трансформатора, можно регулировать выходное напряжение.

Согласно закону Ленца ток должен иметь противоположное току направление. При этом ток и напряжение на нагрузке могут совпадать по фазе с первичным током и напряжением или быть с ними в противофазе (рис.1.10).

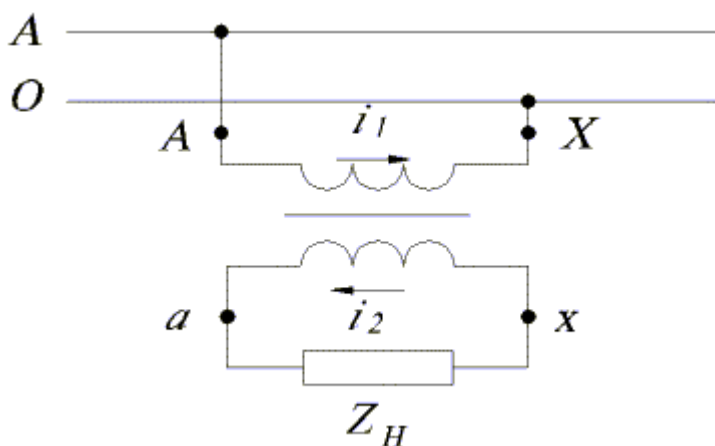


Рис.1.10. К определению направления тока во вторичной обмотке трансформатора

Все многообразие способов соединений согласно ГОСТ делится на 12 групп. При определении номера группы (рис.1.11) минутная стрелка часов устанавливается на цифре 12 и с ней совмещается вектор линейного высшего напряжения, а часовая стрелка совмещается с вектором линейного низшего напряжения. Отсчет угла производится от минутной стрелки к часовой по направлению их вращения.

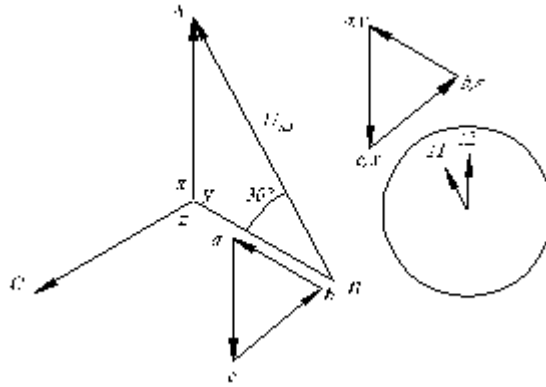


Рис.1.11. К определению номера группы трансформатора  
Автотрансформатор.

Автотрансформатор (рис. 1.12) имеет одну обмотку - обмотку высшего напряжения. Обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения.

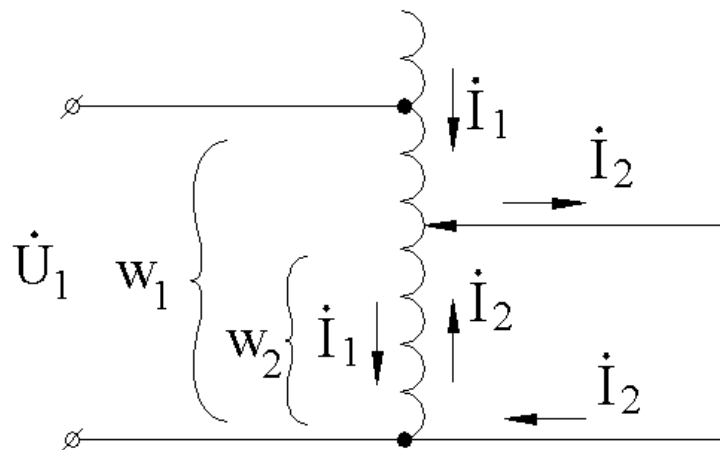


Рис. 1.12. Принципиальная схема автотрансформатора

Часть обмотки  $w_2$  можно выполнить тонким проводом, т. к. через нее протекает ток примерно равный разности величин  $I_1 - I_2$ , которая мала по сравнению с токами  $I_1$  и  $I_2$ . Это позволяет снизить габариты автотрансформатора по сравнению с трансформатором такой же мощности. Полная расчетная мощность

общей части обмотки:

$$S_2 = E_2(I_2 - I_1) = E_2 I_2 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)$$

Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяются для изоляции измерительных приборов от высокого напряжения и расширения пределов измерения вольтметров и амперметров (рис.1.13).

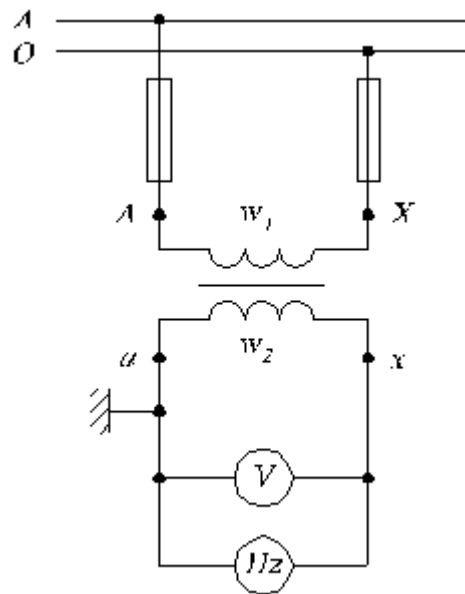
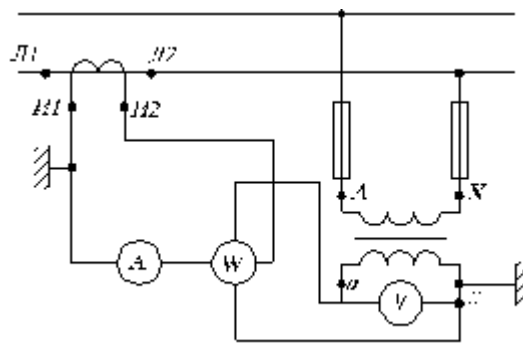


Рис.1.13. Схема включения измерительного трансформатора напряжения

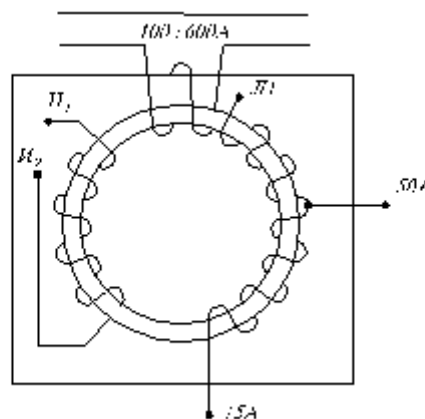
Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Соединение обмоток по группе 12. Вторичное номинальное напряжение у всех трансформаторов напряжения согласно ГОСТ равно 100 В. До 6 кВ трансформаторы напряжения изготавливаются сухими, т.е. с естественным охлаждением. Свыше 6 кВ трансформаторы напряжения изготавливаются жидкостными.

Измерительные приборы, работающие с измерительными трансформаторами, градуируются с учетом коэффициента трансформации.

Трансформатор тока со стороны первичной обмотки включается как амперметр (рис. 1.14а).



а)



б)

Рис. 1.14. Схема включения измерительного трансформатора тока (а) и его устройство (б)

## 2. Синхронные электрические машины

Общие сведения.

Электромагнитная схема синхронной машины имеет вид :

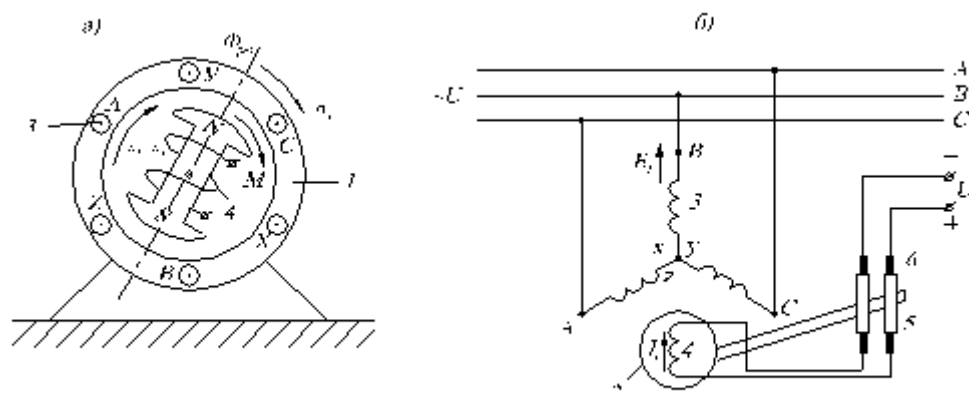


Рис.2.1. Электромагнитная схема синхронной машины (а) и схема ее включения (б)

Важным отличием синхронной машины от асинхронной является то, что главный магнитный поток в ней создается НС постоянного тока возбуждения  $I_{в}$ , который машина получает от источника  $U_{в}$ , т. е. в машине имеет место отдельное питание обмоток статора и ротора. Статор машины выполнен аналогично статору асинхронной машины. На нем расположена  $n$ -фазная (обычно трехфазная) обмотка. Обмотка ротора 4 состоит из одной или нескольких катушек, образующих многополосную систему с тем же числом пар полюсов  $p$ , что и обмотка статора 3. Обмотка ротора соединяется с внешним источником питания  $U_{в}$  посредством контактных колец 5 и щеток 6. При вращении ротора со скоростью  $n_2$  в обмотке статора индуцируется ЭДС, изменяющаяся с частотой

$$f_1 = (pn_2)/60,$$

где  $p$  - число пар полюсов машины.

При подключении обмотки статора к какой-либо нагрузке в ней протекает многофазный ток, который создает вращающееся магнитное поле. Скорость вращения этого поля:

$$n_1 = (60f_1)/p.$$

Из приведенных выше выражений следует  $n_1 = n_2$ , т. е. магнитные поля ротора и статора вращаются с одинаковой скоростью. Поэтому рассматриваемая машина получила название синхронной. В синхронной машине результирующий магнитный поток  $\Phi_{рез}$  создается совместным действием намагничивающих сил обмотки возбуждения и обмотки статора и вращается с той же скоростью, что и ротор.

Часть электрической машины, в которой индуцируется ЭДС, принято называть якорем, поэтому в синхронной машине статор является якорем, а ротор - индуктором. Синхронная машина может работать в качестве автономного генератора, питающего подключенную к ней

нагрузку, а так же подключаться параллельно к сети, к которой присоединены другие генераторы. При работе параллельно с сетью она может отдавать или потреблять электрическую энергию, т.е. работать генератором или двигателем. В результате взаимодействия тока ротора  $I_r$  с вращающимся магнитным полем, создается электромагнитный момент, который при работе машины в двигательном режиме является вращающим, а в генераторном - тормозящим.

Таким образом, синхронная машина имеет следующие особенности:

- ротор машины, как в двигательном, так и в генераторном режимах, вращается с постоянной скоростью, равной скорости вращения магнитного поля;
- частота изменения ЭДС  $E_1$ , индуцируемой в обмотке статора, пропорциональна скорости вращения ротора;
- в обмотке ротора ЭДС не индуцируется, а магнитное поле создается постоянным током, подводимым от внешнего источника, или постоянными магнитами.

Постоянство скорости вращения ротора синхронной машины обуславливает область ее применения: в качестве генераторов промышленной частоты на подстанциях или в дизель - генераторах, а в качестве двигателей в тех случаях, когда необходимо постоянство скорости вращения выходного вала машины.

В случае параллельной работы с другими синхронными машинами для включения синхронной машины в общую сеть требуется предварительная синхронизация, т. е. частота выходного напряжения должна быть строго равна частоте сети, а ЭДС машины - равной по величине и противоположной по фазе напряжению сети. При идеальной синхронизации машины с сетью токи в обмотках статора после подключения машины к сети, будут равны нулю. В таких условиях синхронная машина не отдает энергию в сеть и не потребляет ее, т. е. по отношению к сети она не является ни генератором, ни двигателем. Собственные потери синхронной машины, механические и магнитные, при этом покрывает первичный двигатель.

Если увеличивать момент, приложенный первичным двигателем к валу машины, то под действием возросшего момента ротор машины сместится вперед, и если раньше середина полюса ротора находилась против проводников данной фазы статора как раз в тот момент, когда напряжение сети на этой фазе достигло своего максимума, то теперь это условие нарушается, и так как ЭДС ротора и напряжение сети уже взаимно не уравновешиваются, то в обмотках статора возникает ток, создаваемый результирующим напряжением. Взаимодействие этого тока с полем машины создает тормозящую силу, воздействующую на ротор. При посредстве этой силы механическая мощность первичного двигателя будет превращаться в электрическую мощность, отдаваемую генератором в сеть. Поле ротора будет как бы вести за собой поле статора.

Если затем уменьшать вращающий момент на валу синхронной машины, то под действием тормозящего момента электромагнитных сил поле ротора будет уменьшать свой угол

опережения по отношению к полю статора, и вместе с уменьшением угла между осями полей будет уменьшаться и тормозящая сила взаимодействия токов статора и поля машины.

Наконец, когда напряжение сети будет уравниваться ЭДС статора, тогда машина перестанет отдавать энергию в сеть, ток в обмотке статора, а, следовательно, и тормозящая электромагнитная сила, становится равной нулю.

Если теперь приложить к валу машины вместо вращающего тормозящий момент механической нагрузки, то ротор сместится по отношению к вращающему полю в сторону отставания. Вновь возникнут токи в обмотках статора и создадут электромагнитные силы взаимодействия токов статора и поля ротора, но на этот раз силы будут стремиться сместить ротор вперед, т. е. создадут вращающий момент, при посредстве которого электрическая мощность сети превращается в механическую мощность на валу машины; таким путем синхронная машина переходит к работе двигателем. Режим машины меняется от генераторного к двигательному и обратно в зависимости от механического воздействия на вал машины, причем электромагнитные силы играют роль своеобразной упругой связи между полем ротора и полем статора. Можно сравнить их с пружинами, связывающими два шкива А и В - ведущий и ведомый .

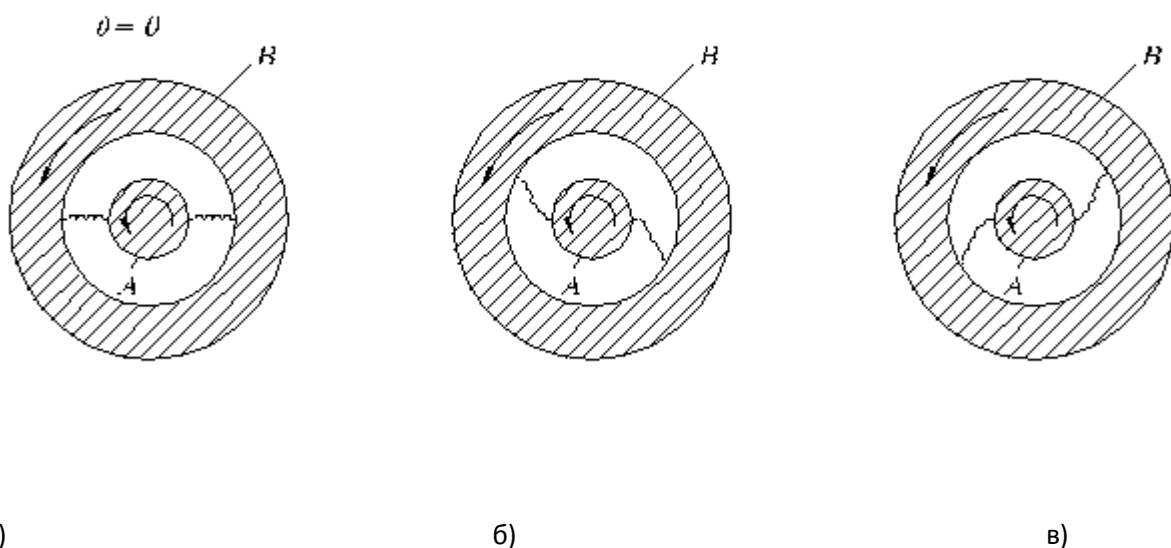


Рис. 2.2. Механическая модель образования синхронного момента в виде двух шкивов, соединенными пружинами ((а) - нет передачи энергии; (б) - передача энергии от шкива А к шкиву В; (в) - передача энергии от шкива В к шкиву А)

Шкив изображает в такой модели поле ротора, шкив В - поле статора. Всякое изменение механической силы на валу шкива А вызывает изменение относительного положения шкивов и изменение направления и степени натяжения пружин. При (рис. 2.2а) пружины свободны, т. к. нет передачи энергии между шкивами; при происходит передача энергии от шкива А к шкиву В, поэтому пружины натянуты от

шкива А к шкиву В (рис. 2.2б); при происходит обратный обмен энергией, поэтому пружины натянуты в обратную сторону (рис. 2.2в).

Таким образом, при параллельной работе синхронной машины с сетью скорость вращения машины жестко определяется частотой сети; изменение момента на валу меняет лишь угол между осями полей ротора и статора, в то время как в асинхронной машине в таких условиях меняется скорость вращения ротора (скольжение).

Реакция якоря в синхронном генераторе. Магнитное поле нагруженной синхронной машины возбуждается не только НС ротора, на это поле действует НС обмотки якоря, обтекаемой нагрузочным током.

В асинхронной машине ток статора изменяется автоматически вслед за изменение тока ротора и, таким образом, сохраняется практически постоянным поток в воздушном зазоре. В синхронной машине изменение тока статора не вызывают автоматического изменения постоянного тока возбуждения. Поэтому результирующее магнитное поле синхронной машины изменяется с изменением нагрузки, меняется относительное положение вращающегося поля статора к вращающемуся полю ротора, а, следовательно, и характер реакции якоря. Если рассматривать синхронный генератор, то при активной нагрузке ток в фазе статора достигает максимума в тот момент, когда против этой фазы находится середина полюса (2.3а).

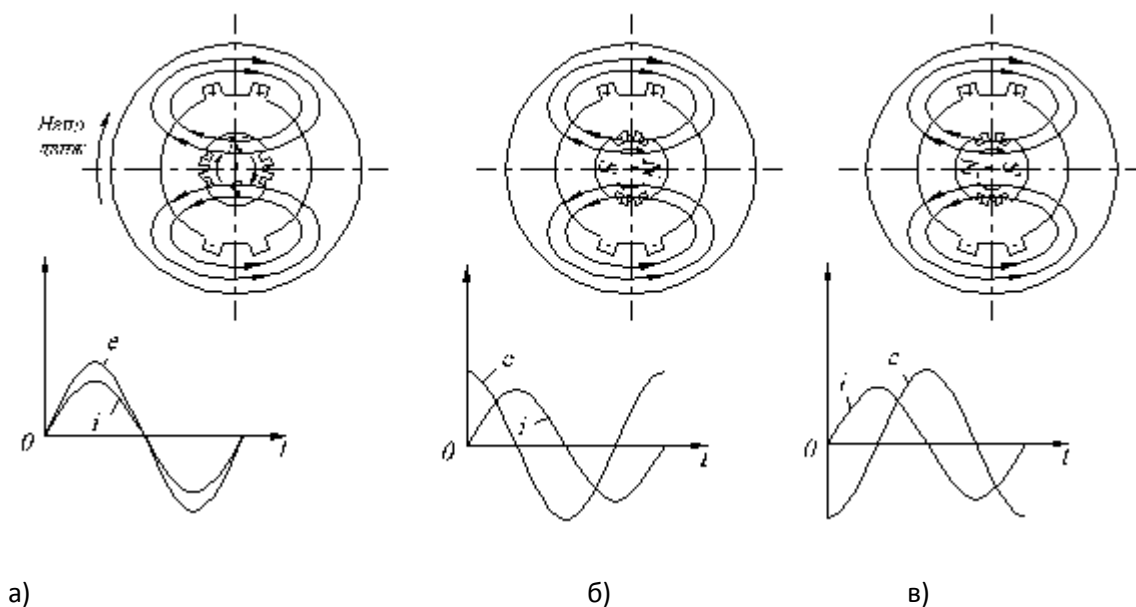


Рис. 2.3. Реакция якоря и кривые распределения индукций в неявнополюсной машине при различных условиях нагрузки

Поле статора будет в этом случае поперечным, ось потока полюсов ротора перпендикулярна оси поля статора - у набегающего конца полюса оно направлено против поля ротора и ослабляет это поле, а у сбегающего конца поля оно усиливает поле ротора. Реакция якоря в случае активной нагрузки генератора вызывает смещение оси результирующего поля в сторону вращения. Результирующий поток при этом



несколько изменяется вследствие влияния насыщения, а именно, он ослабляется у набегающего конца полюса больше, чем усиливается у сбегающего.

В идеальном случае чисто индуктивной нагрузке генератора (3.3б) величина тока в фазе статора будет достигать своего максимального значения только тогда, когда соответствующий полюс ротора уйдет вперед на 90 градусов; при индуктивной нагрузке поток статора направлен вдоль полюса ротора против потока ротора. Следовательно, при индуктивной нагрузке НС тока статора стремится возбудить размагничивающий продольный поток.

В идеальном случае чисто емкостной нагрузке генератора (3.3в) ток статора будет достигать максимума тогда, когда соответствующий полюс ротора будет находиться еще на расстоянии 90 градусов от середины фазы. В этом случае поток ротора будет намагничивающим продольным.

Условие синусоидальности распределения поля статора вдоль окружности статора существенно нарушается в случае явнополюсных роторов, у которых распределение поля статора вдоль окружности статора далеко не синусоидально.

Следовательно, в синхронной машине реакция якоря вызывает изменение магнитного поля машины и в результате - изменение ее ЭДС. В машинах с явными полюсами это явление еще осложняется искажением кривой ЭДС. Для синхронных генераторов подобное влияние величины тока и сдвига фаз нагрузки на напряжение машины весьма нежелательно. Чтобы свести влияние реакции якоря к минимуму, необходимо, чтобы НС якоря была мала по сравнению с НС ротора. Для осуществления этого условия необходимо увеличить магнитное сопротивление машины.

Лучше и проще всего повышение магнитного сопротивления осуществляется путем увеличения воздушного зазора машины. Однако при этом необходимо соответствующее увеличение НС ротора, но в синхронной машине это увеличение намагничивающего тока допустимо, т. к. энергия магнитного поля ротора остается неизменной, а возбудитель синхронной машины должен давать энергию только для покрытия тепловых потерь в цепи ротора. В асинхронной машине условия иные, там намагничивающий ток должен поддерживать колебания энергии магнитного поля машины - он является реактивным током, ухудшающим  $\cos\phi$  установки, и желательно сделать его возможно меньшим.

Явление реакции якоря относится и к синхронным двигателям, но, т. к. в этих двигателях форма кривой ЭДС практически малозначительна, то реакция якоря в них имеет второстепенное значение.

#### Электромагнитный момент синхронной машины

Для получения выражения электромагнитного момента синхронной машины рассмотрим ее векторную диаграмму в несколько упрощенном виде (рис 2.4):

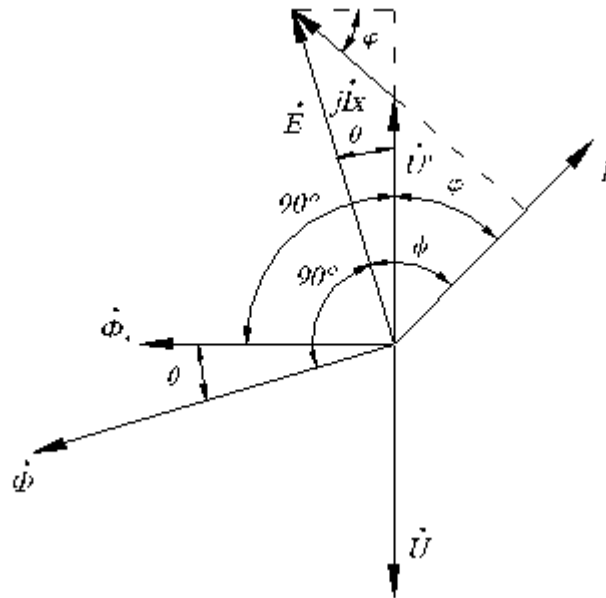


Рис. 2.4. К определению электромагнитного момента синхронной машины

Построение упрощенной векторной диаграммы начнем с вектора напряжения сети, направив его вниз по оси ординат. Это напряжение уравнивается частью ЭДС, индуцируемой потоком ротора в обмотке статора (якоря). Эту часть ЭДС обозначим  $U'$ , она равна по величине и противоположна по направлению вектору напряжения сети  $U$ . В действительности на зажимах машины существует только одно напряжение  $U$ , но построение условного вектора делает диаграмму машины более наглядной. Если пренебречь небольшим активным падением напряжения, то можно записать:  $\dot{E} = \dot{U}' + jx\dot{i}$ .

Мощность синхронной трехфазной машины:  $P = 3EI \cos \psi$ . Из прямоугольного треугольника, гипотенузой которого является вектор  $E$ , а частью катета  $-U$ , можно записать:  $Ix \cos \varphi = E \sin \theta$ . На основании той же векторной диаграммы  $E \cos \psi = U' \cos \varphi$ . Это дает возможность представить электрическую мощность синхронной машины в виде:

$$P = 3EI \cos \psi = 3U' I \cos \varphi = 3EU' \frac{\sin \theta}{x}$$

$$M_{э,м} = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot 60f}{60 \cdot p}} = \frac{3p}{2\pi f} EU' \frac{\sin \theta}{x}$$

Электромагнитный момент синхронной машины:

Эта зависимость носит название угловой характеристики синхронной машины (рис. 2.5.).

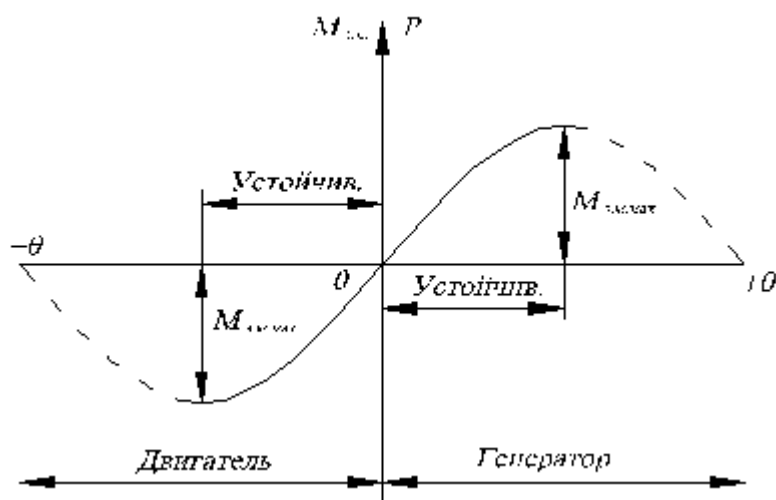


Рис. 2.5. Угловая характеристика синхронной машины

Если  $\theta > 0$ , то мощность и момент положительны, машина работает в режиме генератора и отдает электрическую мощность, а электромагнитный момент при этом является тормозящим моментом, который преодолевает первичный двигатель. Работа, совершаемая первичным двигателем, преобразуется в электрическую работу, отдаваемую генератором в сеть. При увеличении создаваемого первичным двигателем вращающего момента, ротор машины, вследствие сообщаемого ему ускорения, увеличивает угол  $\theta$  и после нескольких колебаний около синхронной скорости восстанавливается равновесие вращающегося момента первичного двигателя и тормозящего электромагнитного момента генератора. Таким же образом восстанавливается это равновесие при уменьшении вращающего момента первичного двигателя посредством уменьшения угла  $\theta$  и вызываемого этим снижением тормозящего электромагнитного момента.

Работа синхронного генератора устойчива при изменении угла  $\theta$  в пределах от 0 до 90 градусов.

Кривая  $M_{эм} = F(\theta)$  за точкой  $\theta = 90$  соответствует области неустойчивой работы синхронного генератора. В этих условиях вращающий момент первичного двигателя превышает максимальный тормозящий момент генератора, т. к. увеличение  $\theta$  свыше 90 приводит к уменьшению тормозящего электромагнитного момента  $M_{эм}$ . Избыток вращающего момента создает дальнейшее ускорение ротора, что обуславливает дальнейшее возрастание  $\theta$  и новое уменьшение тормозящего момента и т. д. пока генератор не выпадет из синхронизма. В таком случае нарушается автоматическая связь между частотой сети и скоростью вращения ротора; ЭДС машины и напряжение сети перестают уравновешивать друг друга, и токи в обмотках статора могут достигнуть весьма больших значений токов короткого замыкания, т. к. мгновенные значения ЭДС статора и напряжение сети могут теперь складываться, а не вычитаться, как при нормальной работе. При выпадении генератора из синхронизма его отключают от сети приборы автоматической защиты.

Уменьшение вращающего момента первичного двигателя вызывает соответствующее уменьшение угла  $\theta$ , и когда  $\theta$  станет равным нулю, тогда первичный двигатель будет лишь покрывать потери синхронной

машины; в этих условиях при  $\theta=0$  машина не будет отдавать энергию в сеть как генератор и потреблять ее из сети как двигатель. Этот режим является промежуточным между режимами генератора и двигателя.

Если приложить к валу синхронной машины тормозящий момент, то он вызовет некоторое замедление вращения ротора, вследствие чего угол  $\theta$  станет отрицательным. Это значит, что ротор отстанет на угол  $\theta/p$  от результирующего поля машины, и последнее станет ведущим, а ротор - ведомым. Перемена знака  $\theta$  вызовет изменение знака электрической мощности  $P$  и электромагнитного момента  $M_{эм.}$ ; машина переходит в режим двигателя; она потребляет энергию из сети, ее электромагнитный момент стал вращающим моментом, уравновешивающим механический тормозящий момент, приложенный к валу машины.

В этом случае для построения упрощенной векторной диаграммы синхронного двигателя удобно использовать векторы  $U$  и  $\dot{U}$  (Рис. 2.6).

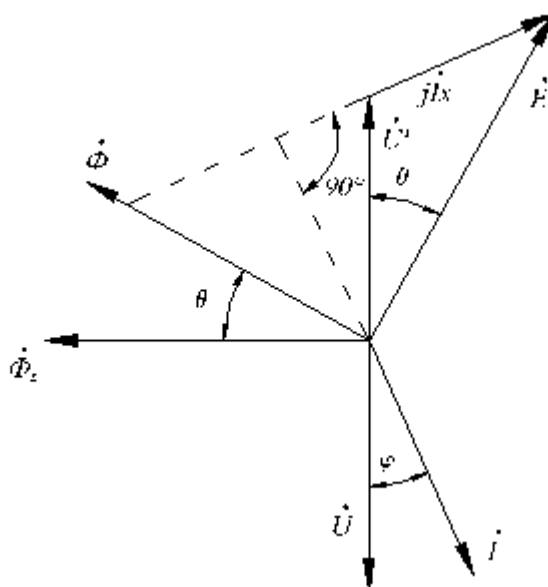


Рис. 2.6. Упрощенная векторная диаграмма синхронного двигателя

Практически синхронная машина работает сравнительно далеко от предела статической устойчивости, соответствующего  $\theta=90$  градусов. У синхронных генераторов угол  $\theta$  при номинальной нагрузке не превышает 20 градусов, а у двигателей, как менее ответственной машины, этот угол достигает 30 градусов. Форма угловой характеристики синхронной машины объясняется картиной взаимодействия потоков  $\Phi_v$  и  $\Phi$  в синхронной машине (рис. 2.7).

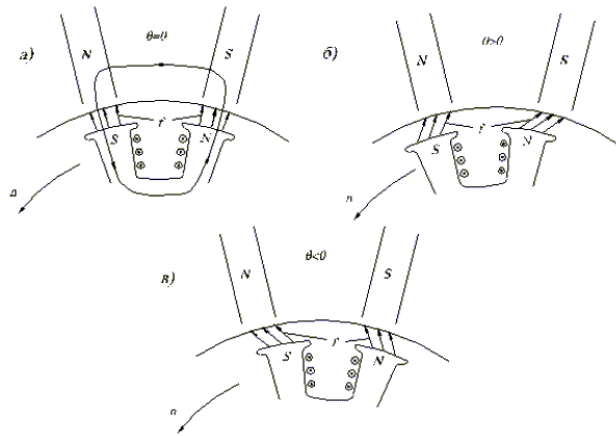


Рис. 2.7 – Взаимодействие потоков в синхронной машине

Подключение синхронной машины к сети. При подключении синхронного генератора применяют два способа: точная синхронизация и самосинхронизация.

Первый способ требует предварительную синхронизацию включаемого генератора, которая осуществляется следующим образом (рис. 2.8).

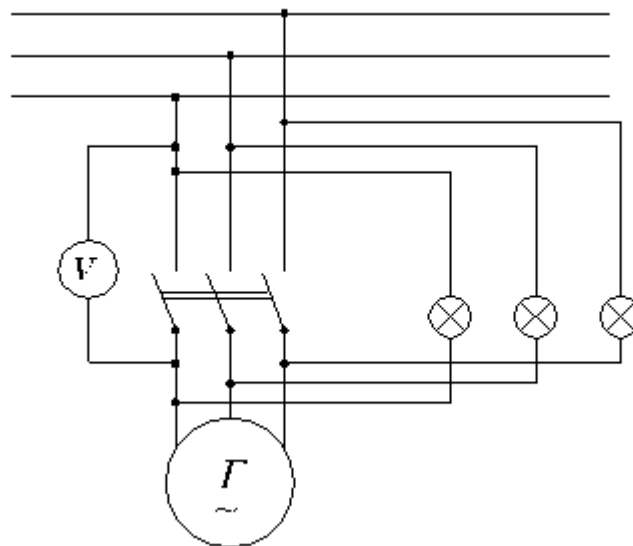


Рис. 2.8. Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа

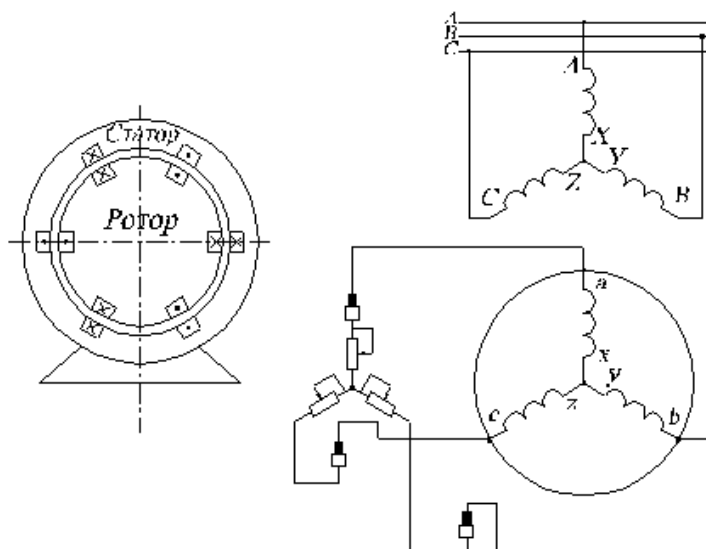
Скорость машины Г доводится примерно до синхронного числа оборотов и ее возбуждение регулируется так, чтобы вольтметр на ее зажимах показал значение, равное напряжению сети. При этом последовательность фаз машины должна соответствовать последовательности фаз сети. Перед подключением машины к сети необходимо более точное регулирование частоты вращения машины и фазы ее ЭДС. Для этой цели используют синхроскопы. В простейшем случае синхроскоп составляется из ламп накаливания. Чем меньше частота генератора отличается от частоты сети, тем медленнее будут происходить колебания света фазных ламп. Достигают совпадения частот, при котором промежутки времени между следующими друг за другом вспышками ламп будут не менее 3...5 сек. Затем в момент полного затухания ламп замыкается рубильник.

Сущность метода самосинхронизации состоит в том, что генератор включается на сеть без возбуждения, когда его скорость отличается от синхронной на 2...3%. Обмотка ротора во время такого включения должна быть замкнута накоротко или на некоторое сопротивление. Сейчас же после включения генератора на сеть в ротор подается постоянный ток возбуждения, и генератор сам доходит до синхронной скорости под действием электромагнитных сил.

Вращающий момент синхронного двигателя при пуске равен 0, поэтому пуск двигателя состоит из двух этапов: первый этап - синхронный пуск с помощью короткозамкнутой обмотки, расположенной на роторе, и второй этап - втягивание в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. Во время первого этапа асинхронного пуска обмотка возбуждения отключается от источника постоянного тока и замыкается на активное сопротивление, превышающее активное сопротивление обмотки возбуждения в 10...15 раз. Не следует оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, т. к. вращающееся поле может индуцировать в ней весьма значительную ЭДС, опасную для изоляции. Но с другой стороны, нецелесообразно было бы замыкать эту обмотку накоротко, т. к. в ней возникает значительный однофазный ток, который будет тормозить ротор по достижении им половины синхронной скорости.

### 3. Асинхронная электрическая машина

Самым распространенным двигателем в промышленности является асинхронный двигатель. На рис.3.1 показаны конструкция и схема включения статорных и роторных обмоток трехфазного асинхронного двигателя.



3.1 Конструкция (а) и схема включения статорных и роторных обмоток (б) трехфазного асинхронного двигателя

В неподвижном статоре расположены три катушки, создающие круговое вращающееся магнитное поле, а во вращающемся роторе - три катушки, замкнутые накоротко или на внешние сопротивления через контактные кольца и щетки. Если число катушек обмотки статора равно 3, т. е. на каждую фазу одна катушка, то за одну минуту вектор сделает  $60f$  оборотов вокруг оси статора. При необходимости иметь меньшую скорость применяются многополюсные обмотки. Каждая обмотка имеет одну пару полюсов. Если к каждой фазе подключить катушек, то общее число катушек обмотки статора будет равно . Для характеристики размещения обмотки вдоль рабочего зазора двигателя введено понятие полюсного деления :

$$r = \frac{\pi D}{2p}, \text{ где } D - \text{внутренний диаметр статора.}$$

За один период переменного тока вращающееся магнитное поле поворачивается на двойное полюсное деление  $2r$ , а полный оборот вокруг оси машины оно делает за периодов. Следовательно: за время  $t$  с - 1 оборот; за 1с. - [оборотов]; за минуту в 60 раз больше, т. е. [об/мин],

$$n_1 = \frac{60}{pT} = \frac{60f_1}{p}$$

где  $f_1$ - частота питающей сети.

Вращающийся магнитный поток  $\Phi$  индуцирует в обмотках статора и ротора ЭДС и .

Так как обмотка ротора замкнута, то в ней возникает ток , который, взаимодействуя с магнитным полем, вызовет появление вращающегося момента . В результате ротор начнет вращаться в сторону вращения магнитного поля. Величина ЭДС и частота ее изменения зависят от скорости пересечения

вращающим магнитным полем проводников обмотки ротора, т. е. от разности скоростей вращения магнитного поля и ротора. При равенстве этих скоростей ЭДС, частота, ток и момент будут равны нулю. По этой причине электрические машины, работающие на этом принципе, называют асинхронными.

Относительная разность скоростей вращения поля и ротора

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_s}{n_1}$$

называется скольжением. Нетрудно видеть, что

$$n_2 = n_1(1 - s)$$

В заторможенном режиме асинхронная машина работает в режиме трансформатора; ее схема замещения подобна схеме замещения приведенного трансформатора. Ток холостого хода асинхронной машины значительно выше, чем у трансформатора, так как в ней имеется рабочий зазор. Поэтому этот режим работы машины редко применяется.

В рабочем режиме частота равна

$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s$$

$$E_{2s} = 4,44 w_2 f_2 \Phi_m = 4,44 w_2 f_1 s \Phi_m = s E_2$$

Энергетическая диаграмма работы машины имеет вид (рис.3.2.):

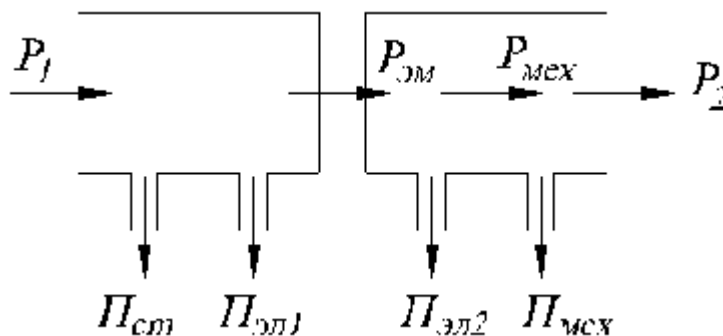


Рис.3.2. Энергетическая диаграмма работы электрической машины

Мощность, потребляемую из электрической сети можно определить, используя выражение:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

В ротор передается электромагнитная мощность  $P_{эм} = P_1 - P_{эм} - P_{ст}$  (рис.3.2).

Часть этой мощности расходуется на покрытие электрических потерь в обмотке ротора; оставшаяся часть превращается в механическую мощность  $P_{мех} = P_{эм} - P_{эл2}$

Потери в сердечнике ротора из-за малой величины частоты (1-3 Гц) практически отсутствуют. Для электромагнитной мощности можно написать:  $P_{эм} = M \omega_1$  где  $\omega_1$ - угловая скорость вращения магнитного поля.

Схема замещения цепи ротора при его вращении имеет вид (рис.3.3):



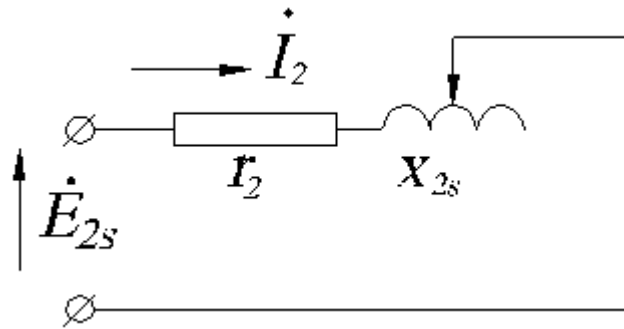


Рис.3.3. Схема замещения цепи ротора

Из рис.3.3 можем записать:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_2} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}$$

Так как  $x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = s 2\pi f_1 L_2 = s x_2$  (здесь - индуктивное сопротивление заторможенного ротора),

$$I_2 = \frac{s E_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}$$

то

Теперь схему замещения ротора можно представить в виде (рис.3.4):

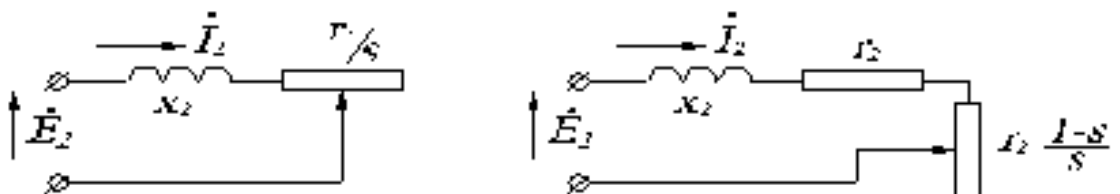


Рис.3.4. Схема замещения роторной цепи машины при вращении ротора без выделения (а) и с выделением (б) сопротивления механической мощности

Величина определяется выражением

$$M = \frac{P_{м2}}{\omega_1 s} = \frac{3 I_{2\Sigma}^2 r_2^1}{\omega_1 s} = \frac{3 U_1^2 r_2^1}{\omega_1 s \left[ \left( r_1 + \frac{r_{2\Sigma}^1}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]}$$

Критическое скольжение, соответствующее максимуму момента определяется дифференцированием полученного выражения по  $s$  и последующим приравнением к нулю результата:

$$s_k = \pm \frac{r_{2\Sigma}^1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$$

Подставив полученное выражение в зависимость  $M$ , получим

$$M_k = \frac{3 U_1^2}{2 \omega_1 \left[ r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right]}$$

С учетом последних двух зависимостей, выражение для М может быть представлено в виде так

$$M = \frac{2M_k(1+as_k)}{s/s_k + s_k/s + 2as_k}, \quad a = r_1 / r_{2\Sigma}$$

называемой уточненной формулы Клосса:

На рис. 3.5 построена зависимость момента от скольжения  $M=F(s)$ .

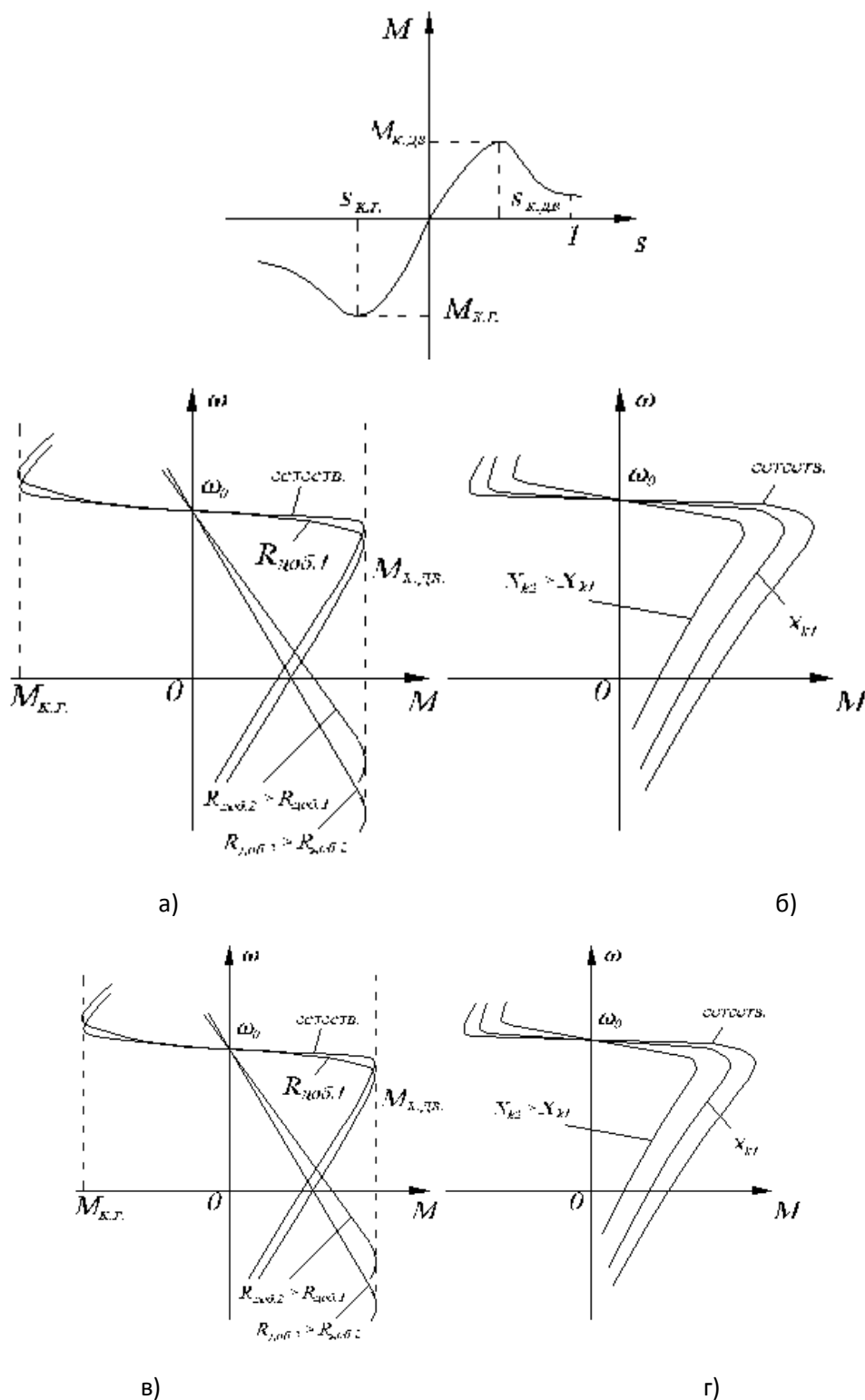


Рис. 3.6. Механические характеристики асинхронной машины при различных способах управления изменениями: активного сопротивления в цепи ротора (а), реактивного сопротивления в цепи статора (б), напряжения (в) и частоты (г) питающей цепи

Максимум момента не зависит от величины суммарного сопротивления в цепи фазы ротора, а критическое скольжение увеличивается пропорционально суммарному сопротивлению :

$$s_k = \pm s_{2\Sigma}^j / \sqrt{r_1^2 + x_k^2}$$

Из характеристик рис. 2.16а видно, что при пуске двигателя выгодно иметь большое сопротивление т.к. при этом обеспечивается большая величина пускового момента. Увеличение сопротивления в цепи ротора ограничивает также ток в двигателе в режиме противовключения. Плавным изменением сопротивления при торможении противовключением и последующем пуске в противоположном направлении можно обеспечить постоянство тормозного и пускового моментов двигателя в этих режимах.

Модуль жесткости рабочего участка механической характеристики обратно пропорционален величине , поэтому реостатные характеристики двигателя при больших добавочных сопротивлениях имеют невысокую жесткость.

При введении в цепь ротора добавочных индуктивных сопротивлений, уменьшаются величины и . Влияние добавочных сопротивлений, включенных в цепь статора , аналогично влиянию добавочных индуктивностей (рис.3.6б).

В пределах рабочего участка механической характеристики асинхронной машины, когда ток статора существенно не превышает номинальное значение, ЭДС двигателя  $E$  незначительно отличается от напряжения сети:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 a_1 f_1 \Phi_{\text{макс}}$$

Устойчивость работы электродвигателя - способность двигателя восстанавливать установившуюся скорость вращения при небольших кратковременных возмущающих воздействиях (по питающей сети, по моменту нагрузки).

$$M = M_{\text{см}} + J \frac{d\omega_2}{dt}$$

Условие равновесия моментов, приложенных к ротору двигателя:

где

$M$ - электромагнитный момент двигателя;

$M_{\text{ст}}$ - статический момент нагрузки (с учетом механических потерь в двигателе);

$$J \frac{d\omega_2}{dt}$$

- динамический момент, зависящий от момента инерции вращающихся масс и ускорения ротора .

В статике ротор вращается с установившейся скоростью.

Условие имеет место при двух величинах скольжения и , соответственно в точках А и В (рис. 3.7).

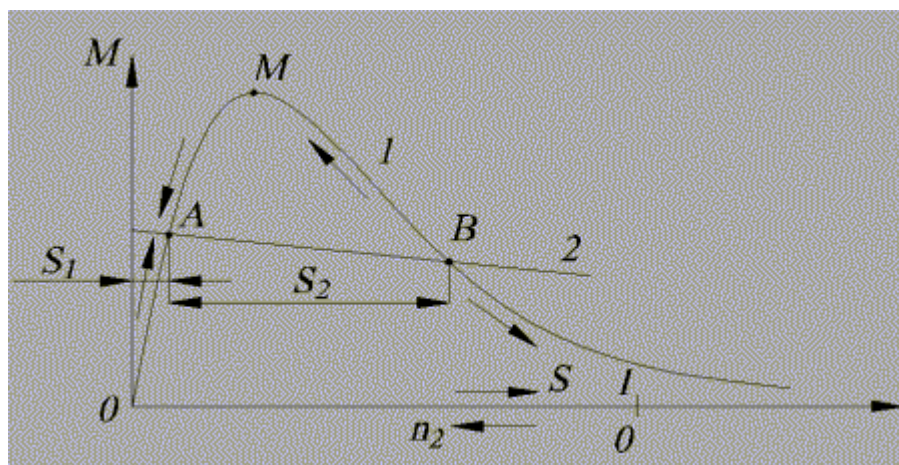


Рис. 3.7 - К устойчивости работы асинхронного двигателя

При малейшем изменении момента нагрузки и появляющемся в результате этого отклонения скорости вращения от установившегося значения появляется избыточный замедляющий или ускоряющий момент, увеличивающий это отклонение. При случайном увеличении статического момента ротор двигателя замедляется и скольжение возрастает. Так как точка В соответствует ниспадающему участку механической характеристики, то при этом момент двигателя также уменьшается, что приведет к еще большему увеличению модуля разности и увеличению скольжения. Этот процесс будет протекать до полной остановки двигателя. При случайном уменьшении статического момента ротор ускоряется, скольжение уменьшается. Момент двигателя вследствие уменьшения скольжения возрастает, что приводит к увеличению разности, а значит и к дальнейшему снижению скольжения. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока машина не перейдет в режим работы, соответствующий точке А. В этой точке режим работы машины устойчив, так как случайное увеличение и замедление ротора (увеличение скольжения) приведет к возрастанию момента и уменьшению модуля разности. Наоборот, случайное уменьшение статического момента и ускорение ротора (уменьшение скольжения) приведет к уменьшению модуля разности. В результате разность, в обоих случаях, начнет уменьшаться и когда момент станет равным, двигатель снова будет работать с

установившейся скоростью. Условие устойчивой работы асинхронного двигателя:  $\frac{dM}{ds} > \frac{dM_{cm}}{ds}$ .

Это условие выполняется для всех практически встречающихся механизмов, если двигатель работает на участке ОМ механической характеристики. Следовательно, двигатель может работать устойчиво только в диапазоне скольжений ротора. Для расширения диапазона устойчивой работы точку М механической характеристики асинхронной машины надо сдвигать вправо. Это можно осуществить в случае применения двигателя с фазовым ротором включением в цепь ротора дополнительного активного сопротивления.

Приведенное выше условие является необходимым, но недостаточным. Когда двигатель работает при скольжении, меньшем, но близком к нему, случайная перегрузка двигателя может привести к его остановке, если на краткое (или длительное) время. Поэтому максимальный момент иногда называют опрокидывающим моментом. Для того чтобы двигатель работал надежно, его номинальный режим

выбирают таким, чтобы  $\frac{M_{max}}{M_{ном}} \geq 1,7$ . Так как величина момента пропорциональна квадрату питающего напряжения, то даже сравнительно небольшое изменение питающего напряжения может привести к существенному снижению.

Характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости скорости вращения (или скольжения), момента на валу, тока статора, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности от полезной мощности при и . Характеристики определяются либо экспериментальным, либо расчетным (по схеме замещения) путями. Они строятся только для зоны устойчивой работы двигателя, т. е. от скольжения, равного нулю, до скольжения, превышающего номинальное на 10-20%. Перечисленные выше характеристики имеют вид (рис.3.8):

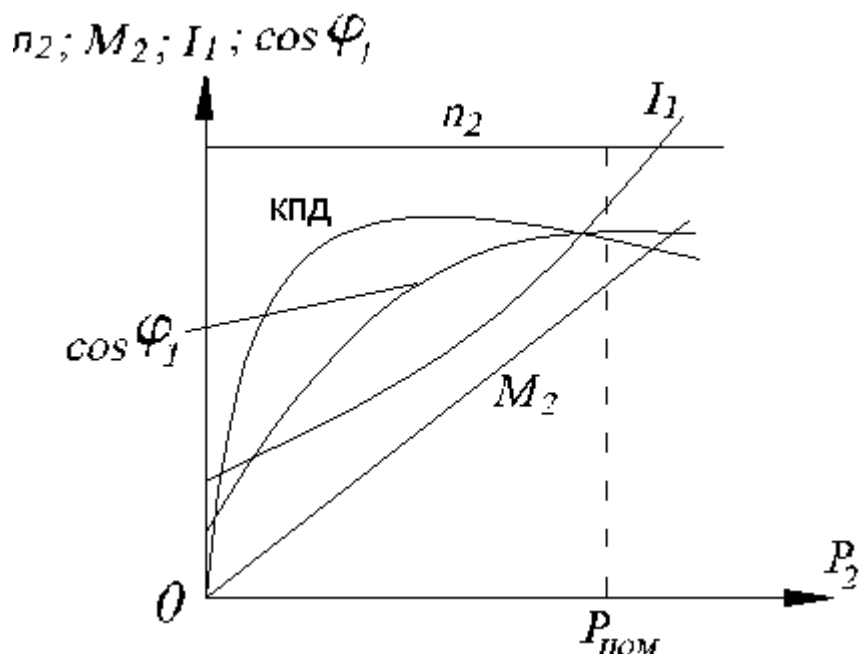


Рис. 3.8. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Скорость вращения ротора в режиме полной нагрузки лишь на 2-8% меньше скорости холостого хода, т.к. при проектировании асинхронной машины с целью уменьшения потерь в обмотке ротора стремятся снизить скольжение двигателя в номинальном режиме его работы до величины  $0,02 \div 0,06$ . Следовательно, скоростная характеристика асинхронного двигателя является довольно "жесткой".

Вращающий момент на валу машины определяется выражением  $M_2 = \frac{P_2}{\omega_2}$ , где  $\omega_2$  — угловая скорость вращения ротора. Так как  $\omega_2$  изменяется незначительно (вследствие жесткости скоростной характеристики), то зависимость момента от мощности имеет практически линейный характер.

Момент несколько меньше электромагнитного момента  $M_{эм}$ , где  $M_{тр}$  — момент, обусловленный трением в двигателе.

Зависимость тока статора асинхронного двигателя от полезной мощности имеет примерно такой же характер, как в трансформаторе ток - статора зависит от тока нагрузки. Но величина тока холостого хода двигателя значительно больше, чем у трансформатора (20-40% у асинхронного двигателя и 5-10% у трансформатора).

Зависимость коэффициента полезного действия асинхронного двигателя такая же, как и у трансформатора.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки возрастает от значения  $\cos\phi=0,18$  до некоторой максимальной величины, которая для двигателей малой мощности составляет  $0,6-0,85$ , а для двигателей средней и большой мощности  $0,85-0,92$ . При дальнейшем росте нагрузки несколько уменьшается.

Пуск в ход асинхронных двигателей.

Практически используются следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск); понижение напряжения, подводимого к двигателю при пуске; подключение к обмотке ротора пускового реостата.

Прямой пуск применяется для двигателей малой и средней мощности. Обычно при прямом пуске действующее значение пускового тока превосходит номинальное значение в четыре - шесть раз, а пусковой момент примерно равен:  $1,1-1,2 M_{ном}$ . Прямой пуск самый распространенный способ пуска в ход асинхронных двигателей. Недостатками его являются: большой пусковой ток и сравнительно малый пусковой момент, достоинство - простота.

Пуск асинхронного двигателя при пониженном напряжении применяют для двигателей большой мощности. Понижение напряжения может осуществляться тремя способами:

а) путем переключения обмотки статора при пуске с нормальной схемы "треугольник" на пусковую схему "звезда". В этом случае фазовое напряжение уменьшается в раз, что обуславливает уменьшение фазовых токов в раз и линейных токов в 3 раза. По окончании процесса пуска обмотку статора переключают на нормальную схему "треугольник".

б) путем включения в цепь статора на период пуска добавочных активных или реактивных сопротивлений.

в) путем подключения двигателя к сети через понижающий автотрансформатор. Секции трансформатора в процессе пуска переключаются соответствующей аппаратурой. Недостатком всех этих способов является значительное уменьшение пускового момента, который пропорционален квадрату приложенного напряжения. Поэтому пуск асинхронного двигателя при пониженном напряжении может применяться только при пуске двигателей без нагрузки.

Пуск с помощью пускового реостата применяется для двигателей с фазовым ротором. Этим способом можно осуществить пуск двигателя при и резко уменьшить пусковой ток. Двигатели с фазовым ротором применяют только при тяжелых условиях пуска (когда необходимо развивать максимально

возможный пусковой момент), при малой мощности электрической сети или при необходимости плавного регулирования скорости вращения.

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

Скорость вращения асинхронного двигателя определяется зависимостью

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s)$$

Следовательно, ее можно регулировать, изменяя питающего напряжения, число пар полюсов и величину скольжения. Последнее можно осуществить изменяя  $r_2$  и  $U_1$ .

Регулирование путем изменения частоты питающего напряжения. Применяемые ранее электромашинные преобразователи частоты очень громоздки, сложны в эксплуатации и дороги. Поэтому они практически полностью вытеснены полупроводниковыми преобразователями частоты, которые в настоящее время обеспечивают достаточную надежность в работе. При применении этого способа регулирования необходимо обеспечить (при изменении частоты питающей сети и питающего напряжения) постоянство потока намагничивания асинхронной машины.

Регулирование путем изменения числа пар полюсов позволяет получить ступенчатое изменение скорости вращения. Для двукратного изменения скорости отдельные катушки, составляющие данную фазу, переключаются с последовательного согласного соединения на встречное или с последовательного на параллельное. Обмотку ротора в этом случае выполняют короткозамкнутой. Если нужно иметь три или четыре скорости, то на статоре располагают еще одну обмотку, при переключении которой можно получить еще две скорости. Асинхронные электродвигатели с переключением числа пар полюсов называются многоскоростными. Недостатки этого способа регулирования скорости вращения: большие габариты и вес по сравнению с двигателями нормального исполнения, а, следовательно, и большая стоимость; большая величина ступеней регулирования (при частоте 50 Гц скорость вращения поля  $n$ , при переключениях изменяется в отношении 3000:1500:1000:750).

Регулирование путем включения в цепь ротора добавочных сопротивлений. Этот способ применяется для двигателей с фазовым ротором, он позволяет плавно изменять скорость вращения двигателя. Недостатки: плохие энергетические характеристики асинхронной машины и чрезмерно "мягкая" механическая характеристика машины, что в некоторых случаях (при пульсациях нагрузочного момента) недопустимо.

Регулирование путем изменения питающего напряжения. Для двигателей нормального исполнения этот метод неприменим, т.к. пропорционально квадрату уменьшения напряжения питающей сети уменьшается величина момента двигателя. Он применяется для двигателей малой мощности, которые имеют значительные активные сопротивления роторной обмотки, т.к. в этом случае скольжение резко возрастает и максимум момента сдвигается в зону близкую и даже в область. Снижение КПД двигателя, связанное с увеличением потерь мощности для этих типов двигателей не имеет существенного значения.

## 4.Машины постоянного тока

Область применения машин постоянного тока.

Машина постоянного тока как и любая электрическая машина обратима: может работать как генератор и как двигатель. Причем двигатели нашли большее применение, чем генераторы.

В табл. 4.1 приведены характеристики некоторых электрических машин постоянного тока.

Характеристики электрических машин постоянного тока

Назначение	Использование	P, кВт	I, А	U, В	Примечание
Двигатели	Трамвай	40+50	75+100	550	Имеют преимущества перед двигателями переменного тока: 1) широкое регулирование частоты вращения; 2) развивают большой пусковой момент
	Электровоз	600+900	400+600	1500	
	Прокатный стан	11500	11500	1000	
	Атомоход «Ленин»	18000	18000	1000	
Генераторы	Для электролиза	60+120	10000	6+12	Чаще используются генераторы переменного тока с выпрямителями
	Тепловоз (старые модификации)	2700	3600	750	

Принцип действия генератора постоянного тока, основное уравнение эдс и напряжения

Возможность построения механического генератора появилась после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции в 1831 г.

Если проводник перемещать в магнитном поле так, чтобы он пересекал магнитные линии, то на концах проводника появится разность потенциалов – эдс (электродвижущая сила).

Простейшим генератором является рамка на оси, помещенная в магнитном поле (рис. 4.1), которую вращают.

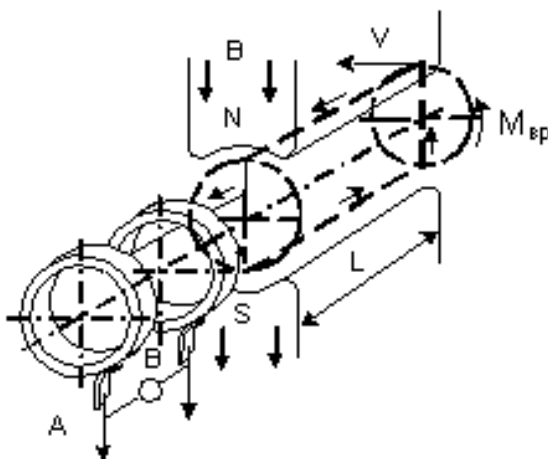


Рис.4.1. Схема работы машины переменного тока

Концы проводников соединены с кольцами, которые вращаются вместе с рамкой. На кольцах помещены неподвижные щетки. Присоединенный к щеткам вольтметр покажет разность потенциалов, т.е.



эдс рамки, которая будет изменяться как по величине, так и по направлению. Направление эдс определяется по правилу правой ладони, состоящему в следующем.

Ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии магнитной индукции были направлены в ладонь, а большой палец отводят относительно других пальцев в плоскости ладони на 90 градусов и направляют по движению проводника; тогда остальные пальцы руки покажут направление наведенной в проводнике эдс. В общем случае  $e = B l v$ , если  $l v = \text{const}$   $t$ , то  $e \equiv B$ . С некоторым приближением допускаем, что индукция под полюсами изменяется по синусоидальному закону, тогда

$$e = B l v \sin \alpha = E_{\max} \sin \omega t$$

где  $\alpha$  – угол поворота, так как  $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ , то при  $\omega = \text{const}$  вместо  $\alpha$  можно горизонтальную ось обозначать осью времени  $t$ .

Частота наводимой переменной эдс  $f = \frac{1}{T}$ , где  $T$  – период полного цикла изменения эдс (рис. 4.2).

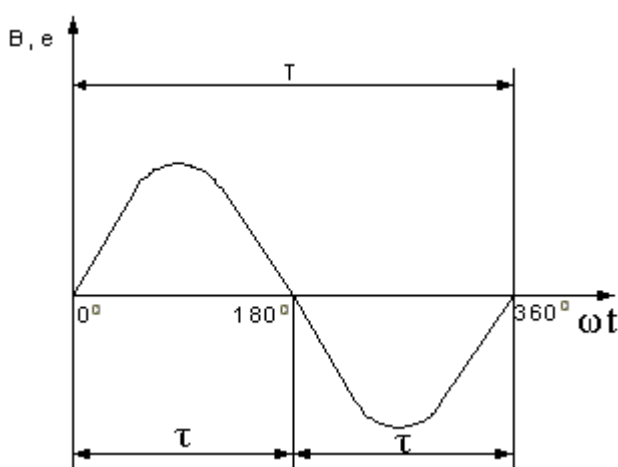


Рис. 4.2. Синусоида индукции или эдс

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор. Для этого проводники простейшего генератора соединяют с двумя медными полукольцами, названными коллекторными пластинами (рис. 4.3).

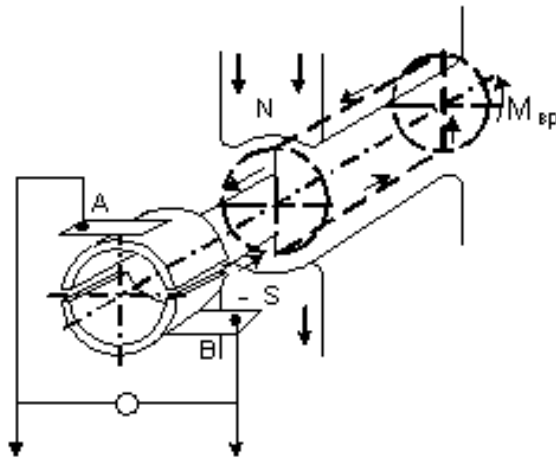


Рис.4.3. Схема работы машины постоянного тока

Пластины жестко связаны с валом рамки, но изолированы друг от друга. Щетки на коллекторных пластинах устанавливаются так, чтобы они переходили с одной коллекторной пластины на другую в тот момент, когда эдс равна нулю. Таким образом, щетка контактирует с полукольцом одного направления эдс. В этом случае ток на щетках и по внешнему участку цепи, через потребитель, протекает в одном направлении, но величина его изменяется с течением времени; эдс и ток имеют пульсирующую форму (рис. 4.4). Если взять  $p$  рамок (обмотка якоря) и  $2p$  коллекторных пластин (коллектор), то увеличится и число пульсирующих эдс за период времени  $T$  (рис. 4.5). Если пульсаций менее 2 %, то ток считается постоянным.

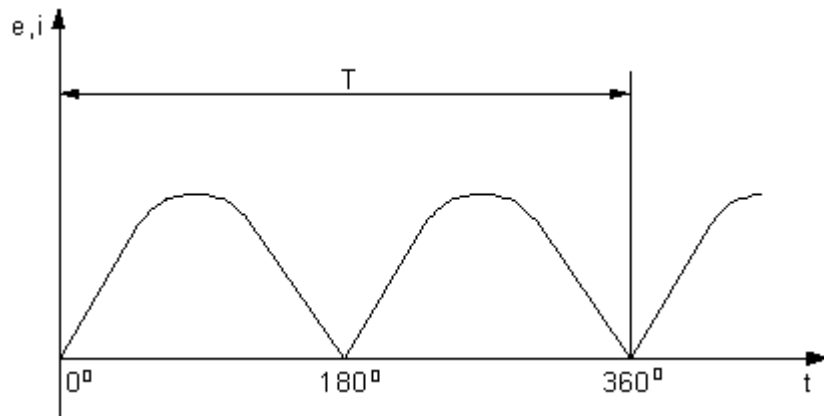


Рис.4.4. Выпрямленная эдс и ток

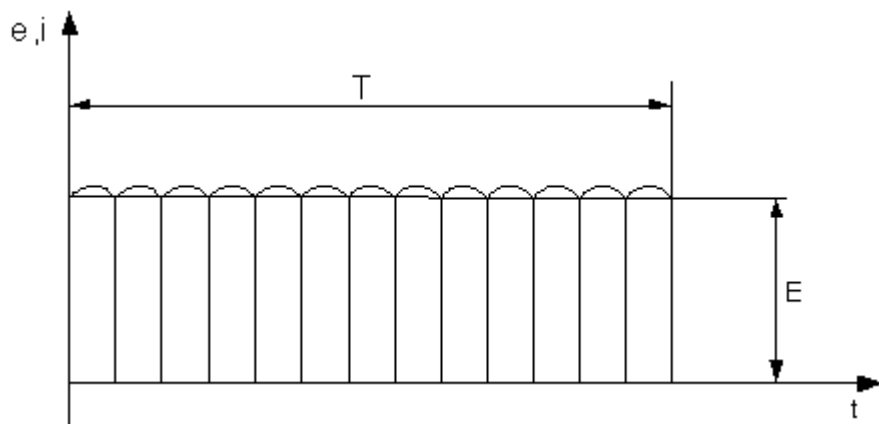


Рис.4.5. Выпрямленная эдс и ток в реальном генераторе

Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразовывает переменную эдс витков якоря в постоянную эдс на щетках и цепи. Совокупность витков составляет обмотку якоря. Если к щеткам подсоединить потребитель электрической энергии, то потечет электрический ток, который в обмотке якоря будет создавать падение напряжения. Вследствие этого напряжение на зажимах генератора будет меньше эдс на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря

$$U = E_a - I_a r_a$$

где  $a$  – индекс параметров якорной обмотки. Формула является основным уравнением эдс и напряжения генератора. Но на проводник с током в магнитном поле действует выталкивающая сила  $F$ , направленная навстречу вращению. Ток в обмотке якоря будет создавать противодействующий вращению момент. Чем больше, тем больше необходимо усилий для преодоления противодействующего момента

$$M_{пр} = F \frac{D_a}{2} \quad F = B I I_a$$

Принцип действия двигателя постоянного тока, основное уравнение напряжения и эдс

В силу обратимости электрических машин принцип действия электрического двигателя можно рассмотреть по рис.4.3, только к щеткам необходимо подвести напряжение сети. На проводник с током, помещенный в магнитное поле действует выталкивающая сила, определяемая правилом левой руки (см. рис.4.3).

$$F = B I I_a$$

Это действие можно проследить по рис. 4.6. С правой стороны магнитные линии складываются (поле усиливается), с левой – наоборот, появляется сила  $F$  согласно правилу левой руки.

Если поместить рамку с током в магнитное поле, то появляется вращающий электромагнитный момент (рис. 4.7)

$M_{пр} = F \frac{D_a}{2}$ . Рамка повернется только до горизонтального положения. Чтобы направление вращения было в одну сторону, необходимо периодически менять направление тока.

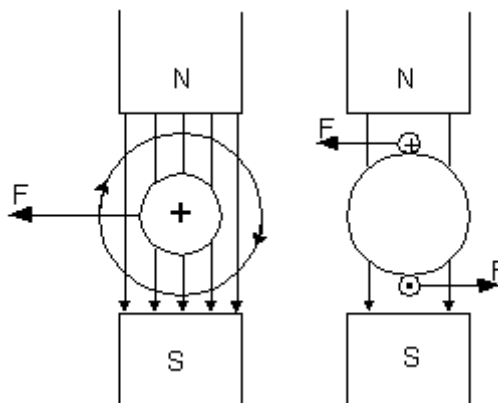


Рис. 4.6. Выталкивающая сила, действующая на проводник с током

Рис. 4.7 Вращающий момент, действующий на рамку с током

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный в обмотке якоря и работает таким образом в качестве механического инвертора.

Так как проводники все время пересекают магнитное поле, то в них наводится эдс, величина которой определяется равенством  $E_a = k \Phi \omega$  и которая направлена встречно подводимому напряжению, поэтому эту эдс еще называют противоэлектродвижущей силой (противоэдс) в двигателе.

Основное уравнение эдс и напряжения двигателя  $U = E_a + I_a r_a$ .

Обмотки кольцевого якоря и их недостатки

На начальном этапе электромашиностроения использовался кольцевой якорь. Это полый цилиндр, по внешней и внутренней поверхности которого наматываются витки обмотки; каждый виток соединен с коллекторной пластиной. Недостатки такого якоря:

- а) плохое использование меди, ибо активной частью витка является та часть его, которая расположена на внешней поверхности якоря;
- б) невозможно механизировать процесс намотки;
- в) завышенные габариты (внутренние слои в несколько витков).

Якорные обмотки барабанного типа

Якорные обмотки барабанного типа отличаются от кольцевого тем, что обе стороны одного витка располагаются на его внешней поверхности; увеличивается использование меди обмотки; механизмуется процесс намотки. Витки заготавливаются заранее на шаблонах, и обмотчик не обматывает якорь машины, а укладывает готовые элементы обмотки в пазы. В витке индуцированные эдс должны действовать согласовано, а для этого активные стороны витка должны находиться под полюсами разной полярности.

Необходимо чтобы ширина витка составляла  $y_1 \cong \tau$ , где  $\tau$  – полюсное деление;  $\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$ .

Полюсное деление – это часть длины поверхности якоря, приходящаяся на один полюс (рис. 4.8).

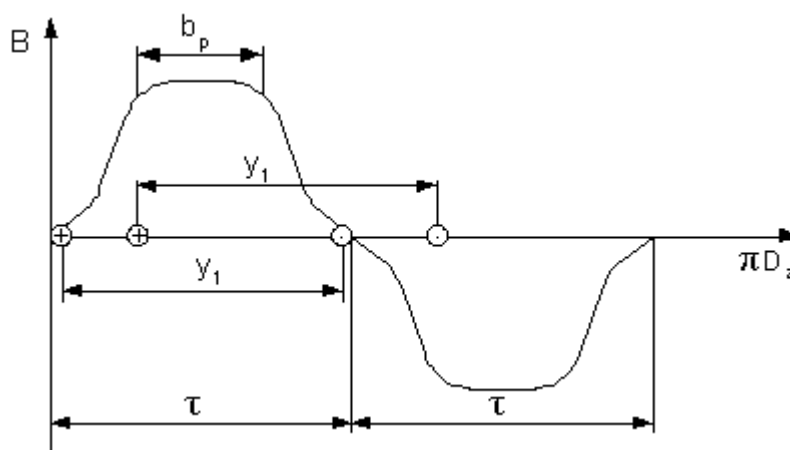


Рис. 4.8. Секции барабанного якоря

Секция обмотки – часть обмотки, находящаяся между двумя следующими друг за другом при обходе обмотки коллекторными пластинами. Секция может состоять из одного витка и множества витков.

Обмотки барабанного типа в основном – двухслойные. В пазу может располагаться несколько активных сторон секций (рис. 4.9). Одна сторона секции располагается в верхней части, другая – в нижней

части другого паза (двухслойная обмотка). Здесь обмотки расположены в два слоя, но в одном реальном пазу (рис. 4.9, в) располагаются три элементарных паза ( $1Z = 3Z\epsilon$ ).

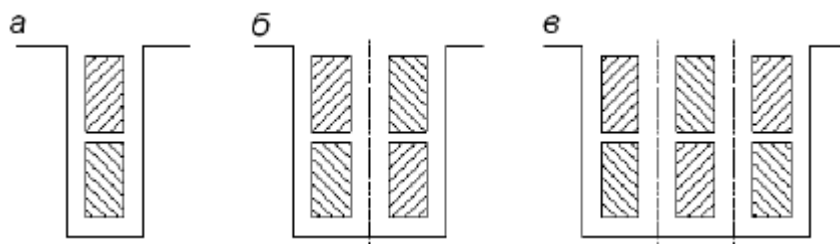


Рис. 4.9. Пазы якоря, состоящие из элементарных пазов:

а – одного; б – двух; в – трех

Если все стороны секции одного слоя переходят вместе из одного реального паза в другой, их объединяют общей изоляцией и называют катушкой обмотки. Обмотки якорей подразделяются на петлевые и волновые (рис. 4.10). Существуют так же обмотки, которые представляют собой сочетание этих двух обмоток.

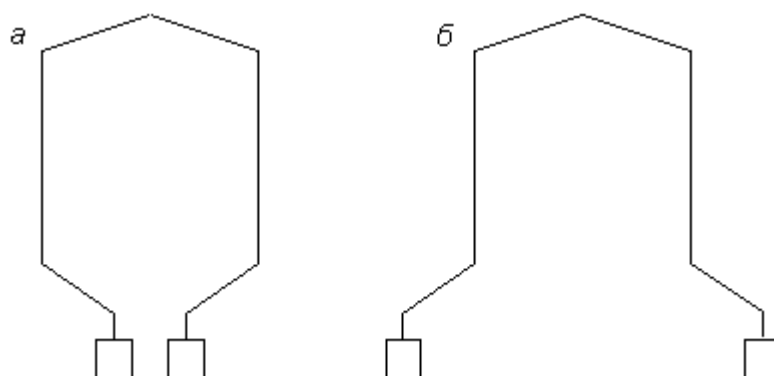


Рис. 4.10. Одновитковая секция: а – петлевой обмотки; б – волновой обмотки

Если число активных проводников обмотки  $N$ , то витков всего  $N/2$ , а если в секции  $w$  витков, то число секций  $N/2w = S$ . Число секций в машине должно быть равно числу коллекторных пластин  $K$  и числу элементарных пазов  $Z\epsilon$ .

Простая петлевая обмотка.

Чтобы эдс второй секции действовала согласно с эдс первой секции, надо чтобы начальные стороны обеих секций находились под полюсом одинаковой полярности. При петлевой обмотке начальные стороны обеих секций находятся под одним полюсом (рис. 4.11).

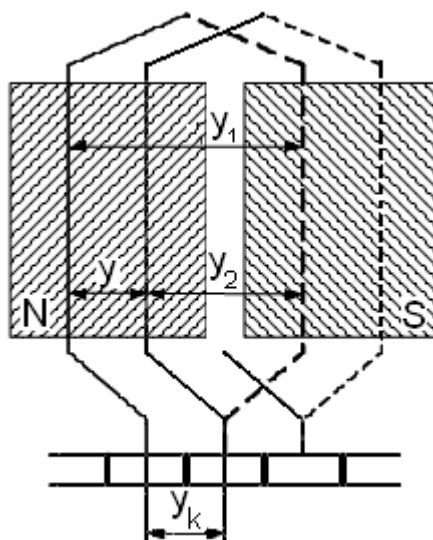


Рис. 4.11. Простая петлевая обмотка

Ширина секции, выраженная в элементарных пазах, называется первым частичным шагом –  $y_1$ , т.е. это расстояние между начальной и конечной сторонами секции;  $y_2$  – второй частичный шаг, расстояние между конечной стороной одной секции и начальной следующей секции;  $y_k$  – шаг по коллектору измеряется в коллекторных (пластинах) делениях, показывает смещение мест отпаек секций  $y = y_k = y_1 - y_2$ , где  $y$  – результирующий шаг, показывает смещение следующих друг за другом секций в пазах. При  $y_k = 1$  – обмотка простая. При  $y_1 > y_2$  – обмотка получается правой неперекрывающейся. При  $y_1 < y_2$  – обмотка получается

левой перекрывающейся

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P}$$

В случае, если первый частичный шаг  $y_1$  равен целому числу, то  $y_1 = t$  и если же  $y_1$  не равен целому числу, то его округляют до ближайшего целого числа, лучше в сторону уменьшения, так как тогда обмотка

получается укороченной

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} \pm \xi = \text{целое число}$$

Реальные обмотки могут быть представлены в виде схем: радиальные, плоские развернутые.

Простая волновая обмотка

Волновые обмотки это такие обмотки, у которых начальная сторона второго витка помещена под следующий полюс той же полярности (рис. 4.12).

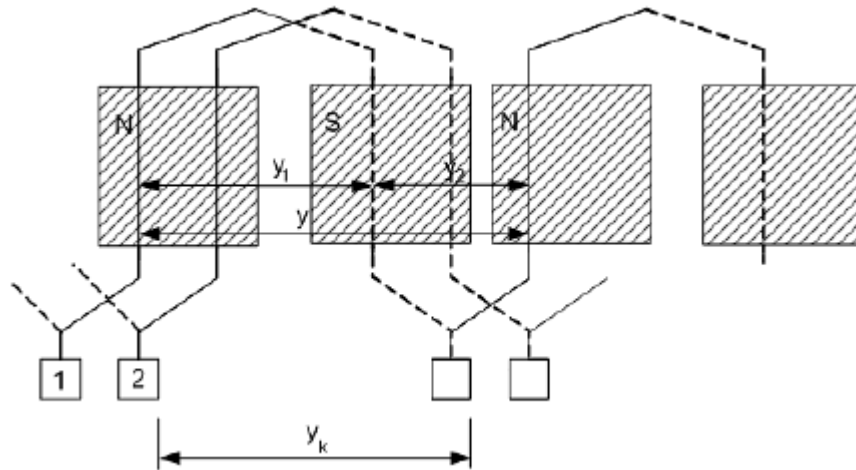


Рис.4.12 Простая волновая обмотка

В результате за один обход по якорю укладывается Р секций с результирующим шагом  $y$

$$y_1 + y_2 = y = y_k$$

Результирующий шаг не должен быть равным  $2\tau$ , ибо за Р результирующих шагов происходит один обход всей окружности якоря, и если  $y = 2\tau$ , то обмотка замкнется сама на себя, а остальные секции останутся вне ее. Поэтому надо, чтобы конец первого обхода не совпадал с ее началом, и происходило смещение хотя бы на один элементарный паз и коллекторное деление

$yP \pm 1 = Z_э$ . Где "+" – перекрещивающаяся правоходовая; "-" – неперекрещивающаяся левоходовая обмотка.

$$y = \frac{Z_э \mp 1}{P}$$

Откуда результирующий шаг . Первый частичный шаг определяется так же, как и у

простой петлевой обмотки:  $y_1 = \frac{Z_э}{2P} \pm \xi$

Пример выполнения простой петлевой обмотки

Дано: число активных проводников  $N = 48$ . Число витков в секции обмотки  $w = 2$ . Элементарных пазов в одном реальном  $u = 1$  (рис. 4.13).

Число полюсов  $2p = 4$ . Обмотка – простая петлевая  $y_k = 1 = y$ ;

число секций:  $S = N/2w = 48/2 \cdot 2 = 12$ ;

число элементарных пазов:  $Z_э = S = 12$ ;

число коллекторных пластин:  $K = Z_э = S = 12$ ;

число реальных пазов:  $Z = Z_э / u = 12/1 = 12$ .

Первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{Z_э}{2P} \pm \xi = \frac{12}{4} \pm \xi = 3$$

где  $x = 0$ ;

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - y_k = 3 - 1 = 2.$$

Так как  $y_1 > y_2$ , то обмотка правая неперекрещивающаяся.

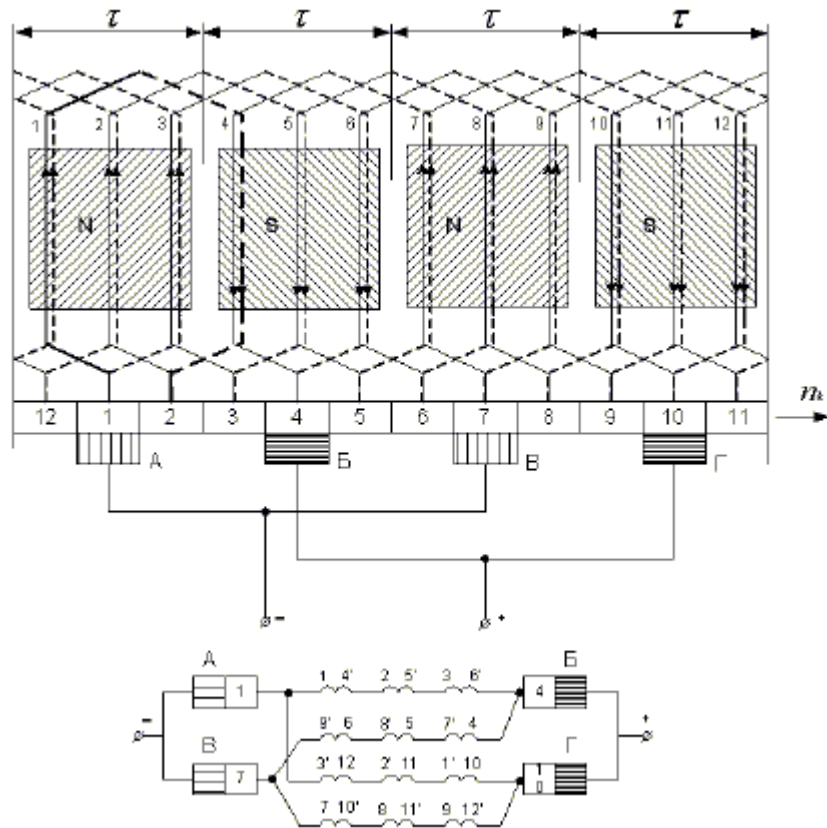


Рис. 4.14 Схема простой петлевой обмотки: а – плоская развернутая схема; б – схема параллельных ветвей

Схемы обмоток бывают:

- 1) радиальные (вид с торца со стороны коллектора);
- 2) плоские развернутые.

Рассмотрим построение схемы обмотки плоской развернутой.

Производим разрез якоря и коллектора по аксиальной оси и разворачиваем в плоскость. Имеем 12 пазов, в каждом верхний (----) и нижний (- - - -) слои обмотки и 12 коллекторных пластин (рис. 4.14).

Порядок выполнения плоской развернутой обмотки при условии, что на схеме  $w = 1$ : первую коллекторную пластину соединяем с верхним слоем паза 1; с 1-го паза в 4-й (нижний слой, так как  $y_1 = 3$ ) и на 2-ю коллекторную пластину (так как  $y_k = 1$ ); с коллекторной пластины 2 в паз 2 (верхний слой), (так как  $y_2 = 2$ ); затем в паз 5` (нижний слой) и на 3-ю коллекторную пластину; далее процесс выполнения обмотки аналогичен.

Расстановку щеток выполняем из условий:

щетка должна собирать эдс или ток;

щетка ставится там, где секция переходит в другую полярность магнитного потока, когда стороны секций находятся на геометрической нейтрали.



## Уравнильные соединения

Ввиду того, что машины имеют магнитную несимметрию, распределение потенциала вдоль параллельных ветвей неодинаковое. Например, воздушные зазоры под нижними полюсами меньше чем под верхними, следовательно, магнитный поток под верхними полюсами будет меньше чем под нижними. А следовательно, и эдс в верхних обмотках якоря будет меньше чем в нижних. Это приводит к появлению уравнильных токов, которые будут замыкаться через щетки, загружая при этом одну щетку и разгружая другую.

Для устранения этого явления применяют уравнильные соединения первого рода – это проводники, соединяющие между собой точки нормально одинакового потенциала параллельных ветвей. Конструктивно это выполняется двумя способами:

припаивают проводники в шлицы коллектора;

припаивают проводники с противоположной стороны к головкам секций.

В простых петлевых обмотках применяются уравнители первого рода, а в волновых – уравнители второго рода.

## Коммутация в машинах постоянного тока

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки из одной параллельной ветви в другую с изменением направления тока в них на обратное.

Коммутация считается хорошей, когда процесс изменения тока в секциях не сопровождается искрообразованием между щетками и коллектором и поверхность коллектора остается чистой, не поврежденной при длительной работе машины.

## Степени искрения

На основании ГОСТ 183–74 состояние коммутации оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки, различается пять классов коммутации (табл. 4.2).

## Классы коммутации

Степень искрения      Состояние коллектора и щеток

Отсутствие искрения (темная коммутация)      Отсутствие почернения

на коллекторе и нагара на щетках

Слабое точечное искрение, примерно на поверхности щетки

Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках

Искрение примерно на половине и более поверхности щетки. Появление следов почернения на коллекторе, но легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках

Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки

и перегрузки. Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием коллектора бензином, а также следов нагара на щетках

Значительное искрение с наличием вылетающих крупных искр.

Допускается при прямом безреостатном пуске

Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

Если степень искрения не указана в стандартах на отдельные виды машин, то при номинальном режиме работы должна быть не выше 1 S.

Причины искрения

Искрение может быть вызвано:

- а) механическими причинами;
- б) электрическими причинами.

К механическим причинам можно отнести геометрическое несовершенство выполнения коллектора и щеточного аппарата:

- эллиптическая форма коллектора;
- выступление отдельных коллекторных пластин;
- недостаточная балансировка коллектора;
- вибрация щеток и другие причины.

К электрическим причинам можно отнести:

повышение напряжения между коллекторными пластинами выше допустимого предела, когда искрение перерастает в круговой огонь;

повышение напряжения и плотности тока в момент разрыва контура между щеткой и коллекторной пластиной.

Анализ электрических причин искрения представляет наиболее трудную задачу при изучении процессов коммутации.

Коммутация – это весьма сложный процесс, зависящий от большого количества факторов, поэтому точный и строгий анализ этого явления представляет чрезвычайно трудную задачу. Следовательно, существующие теории коммутации имеют ряд условных допущений, позволяющих дать основу некоторой математической модели.

Классическая теория коммутации (теория Арнольда)

В основу классической теории Арнольда заложены следующие допущения.

Полное механическое совершенство коллектора и щеток при любых скоростях вращения.

Постоянство удельного сопротивления контакта между щеткой и коллектором, а также независимость его от плотности тока в контакте и величины контактной поверхности.

Обычно анализ коммутации начинают с простейшего случая:

ширина щетки равна ширине коллекторной пластины;

сумма эдс в коммутирующем контуре равна нулю.

Коммутируемая секция находится между второй и третьей коллекторными пластинами (рис. 4.15).

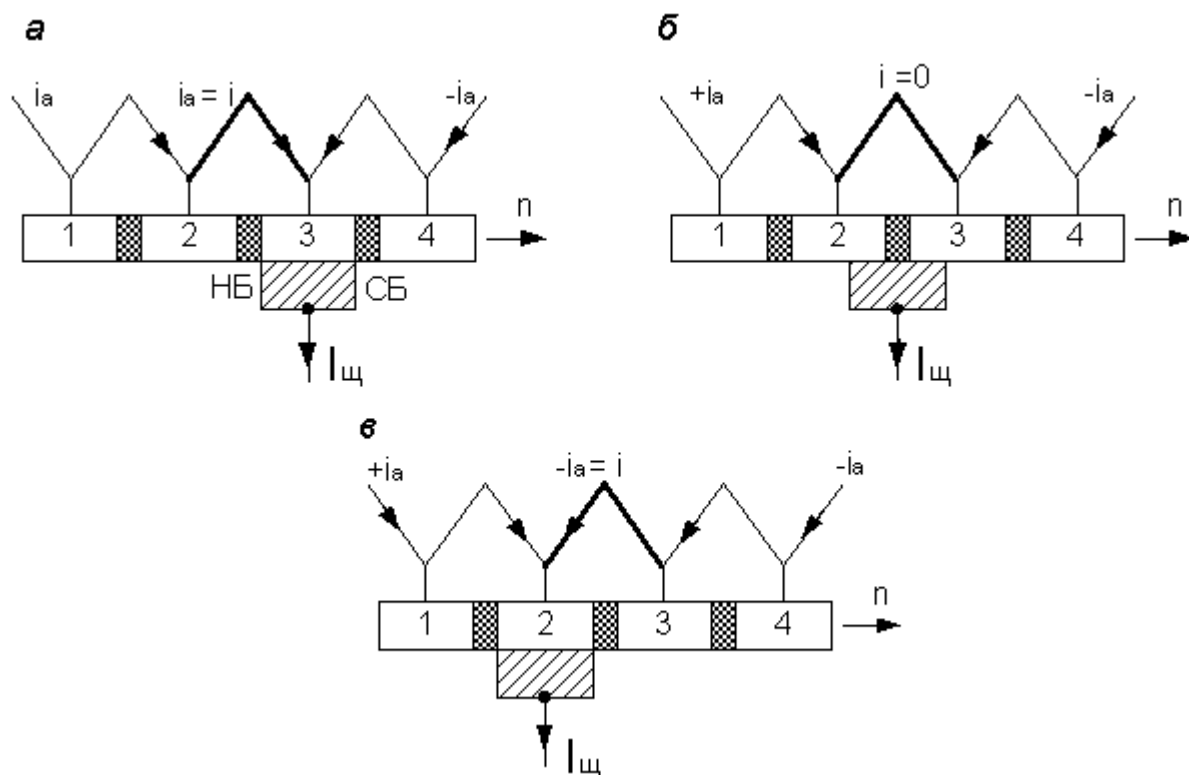


Рис. 4.15. Анализ коммутации:  $\pm i_a$  – ток в одной и другой параллельных ветвях; НБ и СБ – набегающий и сбегающий края щетки;  $i$  – ток, который протекает в коммутируемой секции;  $T$  – период коммутации; а –  $i = +i_a$ , при  $t = 0$ ; б –  $i = 0$ , при  $t = T$ ; в –  $i = -i_a$ , при  $t = T$

Если считать что в коммутируемой секции за время изменения тока с  $+i_a$  на  $-i_a$  не возникает никакой эдс (то есть  $S_e = 0$ ), то тогда ток будет изменяться по уравнению

$$i = i_a \left(1 - 2 \frac{t}{T}\right)$$

А диаграмма изменения тока  $i$  согласно уравнения может быть представлена рис.4.16. При такой

$$j_{щ} = \frac{I_{щ}}{S_{щ}}$$

коммутации плотность тока под щеткой получается везде одинаковой

а коммутация называется прямолинейной.

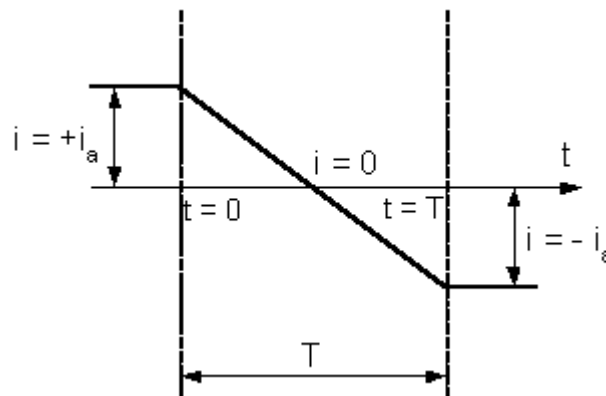


Рис.4.16 – Прямолинейная коммутация

Реактивная эдс в коммутируемой секции.

Величина периода коммутации очень мала, так как  $b_{щ} = b_{л}$ , а  $b_{л}=45$  мм и если линейная скорость коллектора 20 м/с, то процесс коммутации будет длиться всего

$$T = \frac{4 \text{ мм}}{20000 \text{ мм/с}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 0,0002 \text{ с.}$$

ледовательно, ток будет изменяться весьма быстро.

По законам электротехники всякому изменению тока в обмотке препятствует эдс самоиндукции

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt}$$

де  $L_c$  – индукция секции, при прямолинейной коммутации – величина постоянная

$e_L = -L_c \frac{2i_a}{T} = -L_c \frac{I_{щ}}{T}$ . В результате, под влиянием эдс самоиндукции, прямолинейная коммутация замедляется (рис. 4.16). В начальный момент протекает тока меньше через набегающий край, плотность тока под набегающим краем уменьшается, а под сбегающим – наоборот возрастает по сравнению с плотностью тока при прямолинейной коммутации.

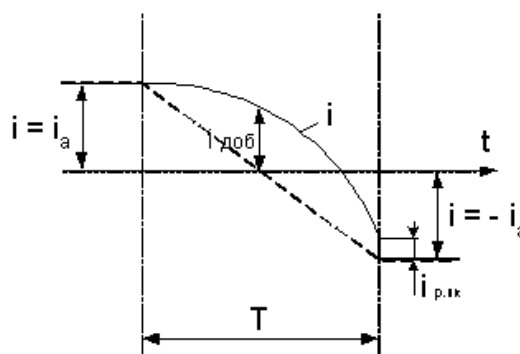


Рис.4.17-Замедленная коммутация