

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

Санкт-Петербургский государственный горный институт
им. Г.В. Плеханова (технический университет)



1773

Алексеев В.В.

**КРАТКИЙ
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

"ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ"

Часть III

для специальности ЭР

Санкт-Петербург' 2007

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Асинхронные машины

Работа асинхронной машины (АМ) основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с индуцированными в к.з. обмотке ротора токами. Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели (АД).

При питании обмотки статора асинхронного двигателя трехфазным током создается вращающееся магнитное поле. Поэтому в АД отсутствует обмотка возбуждения, а на роторе расположена m -фазная к.з. обмотка.

Частота n_1 вращения магнитного поля статора АД, как это следует из рис.1.1 определяется тем, что вращающееся магнитное поле создается при питании обмотки статора, имеющей p пар полюсов, трехфазным током частотой f_1 . Следовательно, синхронная частота $n_0 = n_1 = 60f_1/p$.

Симметричная система токов обмотки статора рис.1.1 определяет возникновение кругового поля, обеспечивающего наибольший вращающий момент. При несимметричной системе токов магнитное поле становится эллиптическим. При отсутствии в одной из фаз тока, процесс формирования вращающегося поля нарушается и нормальный пуск двигателя становится практически невозможным.

Характерные особенности АМ – наличие скольжения $s = (n_1 - n_2)/n_1$, т. е. неравенство частот вращения поля n_1 и ротора n_2 , при котором в проводниках обмотки ротора индуцируется ЭДС и возникает электромагнитный момент, наличие зависимости частоты вращения ротора от нагрузки $n = f(M)$ и сравнительно большой ток холостого хода.

Принцип работы. В АМ на статоре 1 размещают трехфазную обмотку 2, секции которой размещают равномерно по окружности статора. (рис.1.2,а), а фазы обмотки статора $AХ$, $ВУ$ и $СΖ$ соединяют по схеме Y или D для включения в сеть (рис.1.2,б). Обмотку 4 ротора 3 выполняют 3-ех (m -фазной, при $m \geq 2$) и размещают равномерно вдоль окружности ротора. Фазы ее в простейшем случае замыкают накоротко. Воздушный зазор между ротором и статором для улучшения магнитной связи между обмотками делают по возможности малым.

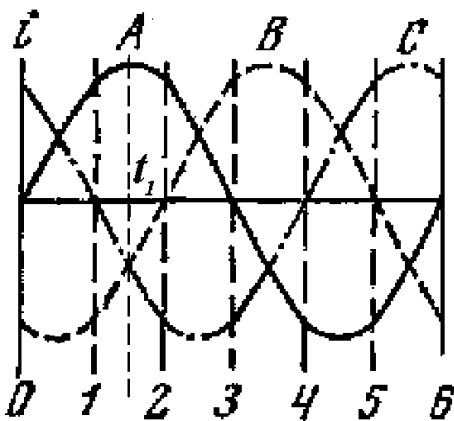


Рис.1.1. Система токов обмотки статора

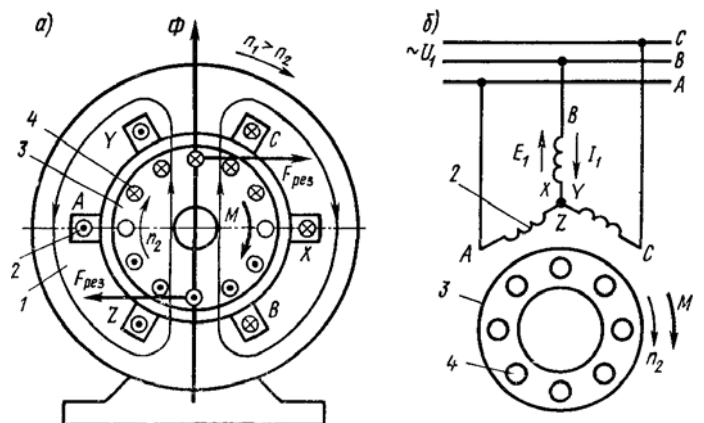


Рис.1.2. Электромагнитная схема АД

Вращающееся с частотой n_1 магнитное поле, создаваемое токами фаз статора A, B, C (рис.1.1), определяет направление токов в проводниках статора в момент t_1 на рис.1.2,а (крестики и точки). Силовые линии магнитного поля статора, полученные с использованием «правила буравчика» дают направление вектора поля Φ (вверх). При $n_1 > n_2$ ($n_2 = 0$) поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. На рис.1.2,а показано, согласно правилу правой руки, направление ЭДС (активной составляющей токов), индуцированных в проводниках короткозамкнутого ротора, с учетом того, что при этом проводники ротора перемещаются относительно потока Φ против часовой стрелки.

На проводники ротора с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Суммарное усилие $F_{рез}$, приложенное ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент M , увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент $M > M_c$, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения n_2 соответствует равенству электромагнитного момента тормозному, создаваемому приводимым во вращение механизмом и внутренними силами трения $M = M_2 + M_0$.

. Режимы работы. В двигательном режиме $1 > s > 0$.

В генераторный режим АМ автоматически перейдет, если ротор АМ разогнать с помощью внешнего момента до частоты, большей частоты вращения поля n_1 ($s < 0$).

Режим электромагнитного торможения получается, если изменить направление вращения магнитного поля (или ротора) $s > 1$. Динамическое торможение реализуется отключением от 3-ех фазной сети и включением двух фаз в сеть постоянного тока и (для АДФР) с введением в ротор активного сопротивления.

. По конструкции АД подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором АДКЗР (рис.1.2,б) и фазным ротором АДФР (последние называют также двигателями с контактными кольцами). Они отличаются лишь выполнением обмотки ротора, и имеют одинаковую конструкцию статора с трехфазной обмоткой.

Статор машины переменного тока состоит из корпуса и сердечника, в пазах которого располагается обмотка. Для машин малой мощности корпуса отливают из чугуна или стали, а для машин средней и большой мощности— выполняют сварными.

Сердечник статора изготавливают из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 или 0,35 мм. Листы штампуют в виде колец и изолируют с двух сторон лаком.

Двигатели с фазным ротором. Для нормальной работы ротор АДФР имеет трехфазную обмотку с тем же числом полюсов и фаз что и статор. Обмотку ротора обычно соединяют по схеме Y , три конца которой выводят к трем контактными кольцам, вращающимся вместе с валом машины. С помощью металлографитных щеток, скользящих по контактными кольцам, в ротор включают пусковой или

пускорегулирующий реостат. Наименьшие потери в роторе обеспечиваются в рабочем режиме при сопротивлении реостатов равных нулю.

Двигатели с короткозамкнутым ротором (рис.1.2). Обмотка ротора выполнена в виде беличьей клетки (БК) никаких выводов не имеет.

Обмотка ротора типа «беличья клетка» состоит из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами.

Стержни роторной обмотки вставляют в пазы сердечника ротора из электротехнической стали без какой-либо изоляции.

Беличья клетка представляет собой многофазную обмотку, соединенную по схеме Y и замкнутую накоротко. Число фаз обмотки m_2 равно числу пазов ротора z_2 , $p_2=p_1$. Один стержень – фазная обмотка, имеющая $w_2=1/2$ витков.

Основные выражения для АД получаются по аналогии с трансформатором с учетом, того, что вторичная короткозамкнутая обмотка – подвижная. Как следует из принципа работы асинхронного двигателя, обмотка ротора не имеет электрической связи с обмоткой статора. Между этими обмотками существует только магнитная связь, и энергия из одной обмотки передается в другую посредством магнитного поля. В этом отношении АД подобен трансформатору, в котором обмотка статора является первичной, а обмотка ротора – вторичной.

В неподвижной обмотке статора поток АД Φ , вращающийся со скоростью n_1 , наводит ЭДС E_1 , величина которой определяется выражением

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 W_s K_1, \quad (1.1)$$

В обмотке ротора. В процессе работы двигателя ротор вращается в сторону вращения магнитного поля статора со скоростью n_2 . Поэтому скорость вращения поля статора относительно ротора равна разности скоростей $n_1 - n_2$. Основной магнитный поток Φ обмотки статора, обгоняя ротор со скоростью $n_1 - n_2$, индуцирует в обмотке ротора ЭДС

$$E_{2S} = 4,44 w_2 f_1 \Phi_m k_2 s = 4,44 w_2 f_2 \Phi_m k_2 = E_2 s. \quad (1.2)$$

где k_2 —обмоточный коэффициент обмотки ротора; w_2 —число последовательно соединенных витков фазы обмотки ротора; f_2 —частота ЭДС E_{2S} (тока ротора) E_2 – ЭДС неподвижного ротора.

Основные уравнения ЭДС и токов АД согласно схеме замещения рис.1.3, по аналогии с трансформатором

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \\ 0 &= \dot{E}'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2/s. \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Где величина $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 m_2 w_2 k_{o\delta 2} / (m_1 w_1 k_{o\delta 1})$ представляет собой ток, ротора, приведенный к обмотке статора ($K_{o\delta 1} = K_1$; $K_{o\delta 2} = K_2$).

Величина r'_2/s представлена в виде

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + r'_2 \cdot \frac{1-s}{s}. \quad (1.4)$$

Эквивалентная схема замещения АД.

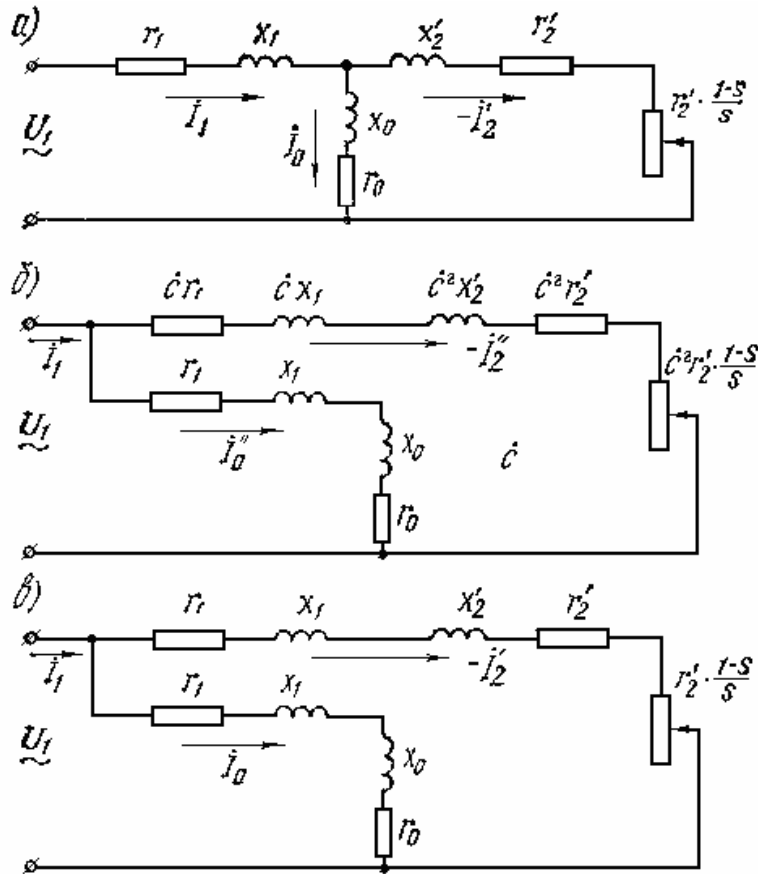


Рис. 1.3. Схема замещения асинхронного двигателя

. Согласно рис.1.3 асинхронная машина с электромагнитной связью статорной и роторной цепей заменена эквивалентной электрической схемой. Активное сопротивление $r'_2((1-s)/s)$ можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку неподвижного ротора. В этом случае асинхронная машина работает как трансформатор, имеющий активную нагрузку. Так как это сопротивление определяется скольжением, а, следовательно, механической нагрузкой на валу асинхронного двигателя, то охватываются все режимы работы АД от режима холостого хода ($s \approx 0$) до режима короткого замыкания ($s = 1$) асинхронного двигателя. На схеме замещения: r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора; x_0 – главное индуктивное сопротивление; x_1 – индуктивное (собственное) сопротивление фазы обмотки статора, обусловленное потоками рассеяния; $r'_2(1-s)/s$ – эквивалентное сопротивление, потери мощности в котором равны механической мощности, развиваемой двигателем; x'_2 – индуктивное, приведенное к числу витков обмотки статора, сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора; r_0 – сопротивление, потери мощности в котором равны мощности, теряемой в сердечнике статора.

Для упрощения расчетов Т-образная схема замещения асинхронного двигателя может быть преобразована в Г-образную по правилам, принятым в ТОЭ (рис.1.3,б). В Г-образной схеме сопротивления контуров статора и ротора соединены последовательно; они образуют рабочий контур, параллельно

которому включен намагничивающий контур. Здесь $\dot{I}_1 = \dot{I}_0'' + (-\dot{I}_2'')$; $\dot{I}_2'' = \dot{I}_2'/s$. Комплекс $\dot{C} = 1 + (r_1 + jx_1)/(r_0 + jx_0) = 1 + (Z_1/Z_0)$. Т.к. \dot{C} по модулю не превышает 1,02...1,05 ($P > 2$ кВт), то схему упрощают. На рис.1.3,в изображена упрощенная Г-образная схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром.

Величина тока в рабочем контуре

$$I_2' = U_1 / \{[(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2' s^{-1})^2]\}^{0,5} \quad (1.5)$$

или, используя выражение $x_k = x_1 + x_2'$,

$$I_2' = U_1 / \{[x_k^2 + (r_1 + r_2' s^{-1})^2]\}^{0,5}.$$

где U_1 —фазное напряжение, подводимое к обмотке статора.

Порядок построения векторной диаграммы асинхронного двигателя такой же, что и векторной диаграммы трансформатора.

На рис.1.4 представлена векторная диаграмма АД. Она имеет такой же вид как векторная диаграмма трансформатора с закороченной вторичной обмоткой. С учетом (1.4) векторную диаграмму асинхронного двигателя можно рассматривать как векторную диаграмму трансформатора, на зажимы вторичной обмотки которого включено переменное сопротивление. Иначе говоря, асинхронный двигатель в электрическом отношении подобен трансформатору, работающему на активную нагрузку $r_2'((1-s)/s)$.

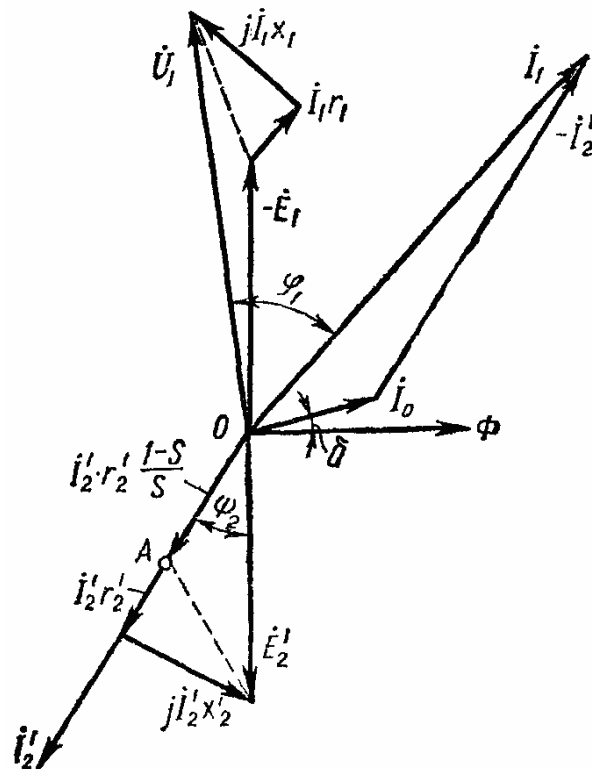


Рис.1.4. Векторная диаграмма АД при $\psi_2 = \arctg(x_2' s / r_2')$.

Мощность вторичной обмотки такого трансформатора

$$P_2' = I_2'^2 r_2'((1-s)/s) \quad (1.6)$$

представляет собой полную механическую мощность, развиваемую асинхронным двигателем.

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора (для удобства изображения векторной диаграммы), делают, как и для

трансформаторов. При этом обмотку ротора с числом фаз m_2 , обмоточным коэффициентом K_2 и числом витков фазы w_2 заменяют обмоткой с m_1 , K_1 и w_1 . При условии неизменных мощности и углах фазовых сдвигов векторов у приведенного ротора. Т.о., приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора аналогично приведению параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной.

Пересчет реальных параметров обмотки ротора на приведенные ведется по следующим формулам.

Приведенная ЭДС ротора при $s=1$

$$E'_2 = E_2 K_e \quad (1.7)$$

где $K_e = E_1 / E_2 = K_1 w_1 / K_2 w_2$ — коэффициент трансформации напряжения в асинхронной машине при неподвижном роторе ($s=1$). Приведенный ток ротора

$$I'_2 = I_2 (1/K_i) \quad (1.8)$$

где $K_i = m_1 K_1 w_1 / m_2 K_2 w_2 = K_e m_1 / m_2$ — коэффициент трансформации тока в асинхронной машине.

В отличие от трансформаторов в АД коэффициент трансформации по напряжению и по току не равны, так как в общем случае число фаз в обмотке статора и в обмотке ротора неодинаковы; лишь в двигателях с фазным ротором, у которых $m_1 = m_2$ эти коэффициенты равны.

Активное и индуктивное приведенные сопротивления обмотки ротора

$$r'_2 = r_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.9)$$

$$x'_2 = x_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.10)$$

В короткозамкнутой обмотке ротора $w_2=1/2$; $K_2=1$, $m_2 = Z_2$.

. Частота ЭДС в роторе из выражения (1.2) $f_2 = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60} = f_1 s$,

т.е. частота тока в обмотке ротора пропорциональна скольжению. Для большинства асинхронных двигателей эта частота невелика и при частоте сети $f_1=50$ гц она не превышает нескольких герц. Так, При скольжении $s=0,05$ и частоте 50 гц частота ЭДС в обмотке ротора равна $f_2 = 0,05 \cdot 50 = 2,5$ Гц.

. Зная режим работы АД т.е. скольжение s , число пар полюсов p , частоту питающей сети f_1 , можно определить не только синхронную частоту вращения n_0 , но и частоту вращения ротора n_2 АД: $n_0 = 60f_1/p$; $n_2 = (1-s) 60f_1/p$.

Намагничивающий ток статора АД. Ток I_1 в соответствии со схемой замещения рис.1.3 состоит из активной составляющей тока, пропорциональной полезной мощности и реактивной составляющей, которая в диапазоне рабочих нагрузок изменяется мало, так как она определяется главным образом током холостого хода, который составляет 20—40% от номинального тока. Этим АД отличается от трансформатора, в котором нет воздушного зазора. Основные недостатки АД связаны с потреблением реактивной мощности из сети.

Потери АД делятся на механические, магнитные и электрические.

Часть мощности P_1 на входе АД расходуется на покрытие магнитных потерь в сердечнике статора $p_{ст1}$, а также в обмотке статора на покрытие электрических потерь, обусловленных нагревом обмотки,

$$P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (1.11)$$

Оставшаяся часть мощности при помощи магнитного потока передается на ротор и поэтому называется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = P_1 - (P_{ст1} + P_{эл1}) = m_1 I_2'^2 r_2' / s. \quad (1.12)$$

Часть электромагнитной мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в обмотке ротора

$$P_{эл2} = m_2 I_2'^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2' \quad (1.13)$$

Остальная часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую мощность двигателя, называемую *полной механической мощностью*,

$$P_2' = P_{эм} - P_{эл2} \quad (1.14)$$

Воспользовавшись формулой (1.12), можно записать следующее выражение мощности электрических потерь в роторе

$$P_{эл2} = s P_{эм}, \quad (1.15)$$

т.е. *мощность электрических потерь в роторе пропорциональна скольжению*. Поэтому работа АД более экономична при малых скольжениях.

Следует отметить, что в роторе двигателя возникают также и магнитные потери, но ввиду небольшой частоты тока ротора ($f_2 = s f_1$) эти потери настолько малы, что ими обычно пренебрегают.

Механическая мощность на валу АД P_2 меньше полной механической мощности P_2' на величину *механических* и *добавочных* $p_{доб}$ потерь

$$P_2 = P_2' - (P_{мех} + P_{доб}) \quad (1.16)$$

Механические потери в асинхронном двигателе обусловлены трением в подшипниках и трением вращающихся частей о воздух. Добавочные потери вызваны наличием в двигателе полей рассеяния и пульсацией поля в зубцах ротора и статора. Они малы и составляют 1-5% от всех потерь.

Таким образом, *коэффициент полезного действия* асинхронного двигателя

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Sigma p) / P_1 = 1 - (\Sigma p / P_1).$$

где Σp – сумма потерь в асинхронном двигателе (рис.1.5),

$$\Sigma p = P_{ст1} + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{мех} + P_{доб} \quad (1.17).$$

Электрические потери в щеточном контакте пропорциональные току, малы по сравнению с электрическими потерями, а в АДКЗ равны нулю. Благодаря отсутствию коллектора КПД АД выше, чем у двигателей постоянного тока (83... 95% и верхний предел соответствует двигателям большой мощности).

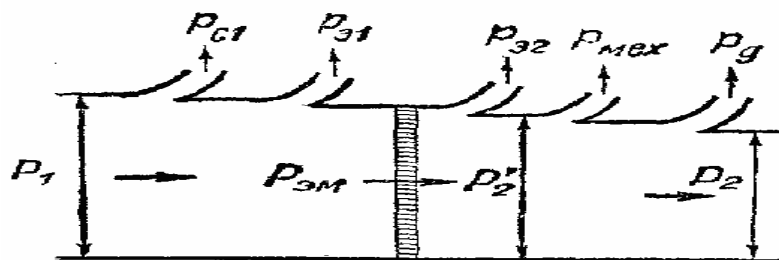


Рис.1.5. Диаграмма преобразования мощности в АД.

Механической характеристике асинхронного двигателя соответствует выражение, которое определяет зависимость электромагнитного момента АД от скольжения $M=f(s)$.

Электромагнитный момент АД M пропорционален электромагнитной мощности

$$M = P_{эм} / \omega_1, \quad (1.18)$$

подставив в (1.18) значение электромагнитной мощности (1.12), получим

$$M = m_1 r_2' I_2'^2 / \omega_1 s. \quad (1.19)$$

Т.е. *электромагнитный момент АД пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора*.

С учетом значения тока I_2 , из схемы замещения рис.1.3. получим

$$M = m_1 U_1^2 r_2' / \{ \omega_1 s [(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2' s^{-1})^2] \} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{s \cdot \omega_1 \cdot [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + x_k^2]}, \quad (1.20)$$

где для сокращения записей комплекс $[(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2' s^{-1})^2]^{0,5}$ обозначим как Z_k ; $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$.

Формула для пускового момента получается из выражения для электромагнитного момента АД

В момент пуска двигателя в ход $n_2=0$, $s=1$ и пусковой момент равен

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{\omega_1 \cdot [(r_1 + r_2')^2 + x_k^2]} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{\omega_1 \cdot Z_k^2}; \quad (1.21)$$

где полное сопротивление (к.з.) $Z_k = [(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2')^2]^{0,5}$.

Критическое скольжение АД, (рис.1.6) найдем из (1.20), определив $dM/dt=0$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{кр}} = +r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (1.22)$$

Так как r_1 обычно не более 10–12% от $(x_1 + x_2')$, то примерно $s_{\text{кр}} = +r_2' / (x_1 + x_2')$

Это скольжение соответствует максимальному (критическому) моменту, полученному из (1.20) подстановкой значения $s_{\text{кр}}$ из (1.22)

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{макс}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot [(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2})]} \approx \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot (x_1 + x_2')}. \quad (1.23)$$

После достижения моментом максимального значения скорость вращения ротора продолжает увеличиваться, а момент M начинает уменьшаться до тех пор, пока электромагнитный момент не станет равным сумме противодействующих моментов

$$M = M_0 + M_2 = M_{\text{ст}},$$

где M_0 —момент холостого хода; M_2 —полезный нагрузочный момент, т. е. момент на валу двигателя.

Формула для определения момента по данным каталога, не содержащим параметры схемы замещения АД АД – формула Клосса, позволяет построить участок ОА характеристики (рис.1.6)

$$M = 2 \cdot M_{\text{кр}} \left(\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}} \right) \quad (1.24)$$

Вид механической характеристики $M=f(s)$, асинхронного двигателя дан на рис.1.6.1.

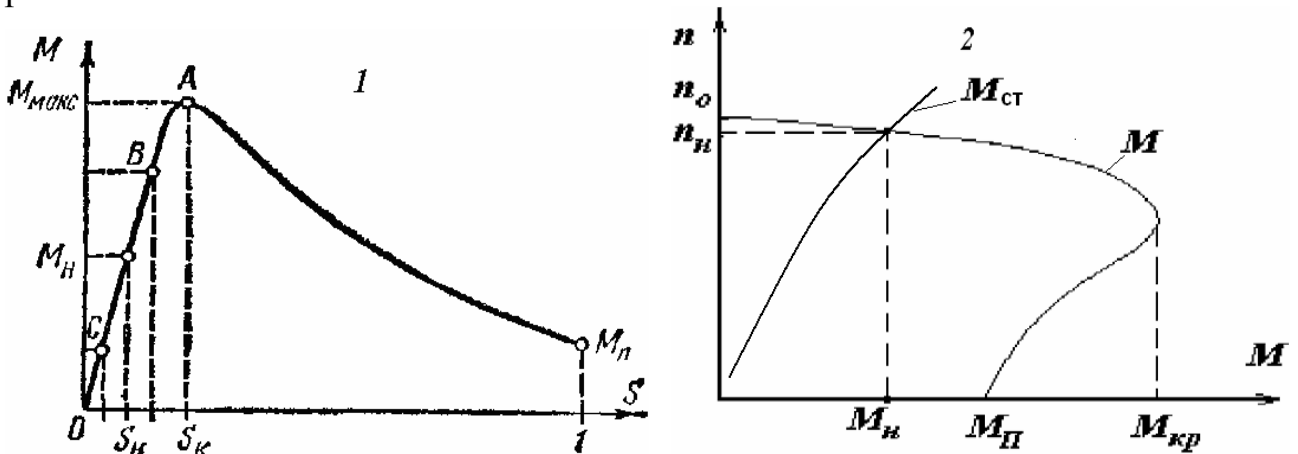


Рис. 1.6. Механическая характеристика АД

Кроме этого варианта механической характеристики для АД применяется «классический вид» механической характеристики $n=f(M)$ (рис.1.6.2).

При построении механической характеристики исходят из того, что все параметры, входящие в формулу для момента АД, за исключением скольжения s , являются постоянными.

. Значения параметров, характерные для АД общего применения серии 4А:
 $M_{II}/M_H = 1-1,9$; $I_{II}/I_H=4-7$ (ГОСТ-19523-74); $s_{ном} = 0,02 - 0,08$; $s_{кр} = 0,05 - 0,2$;
 $M_{макс}/M_H=1,7-2,5$.

. Фазный ток I_H m -фазного АД по паспортным данным определяется по формуле $I = P_{ном} / (m U_H \eta_{ном} \cos\varphi_{ном})$.

. Рабочей частью характеристики АД $M(s)$ рис.1.6 является участок $0 - M_H$. При номинальном противодействующем моменте на валу (номинальной нагрузке двигателя) установившийся режим работы двигателя определится точкой M_H, s_H .

Следует обратить внимание на то, что работа двигателя на рабочем участке механической характеристики, является наиболее экономичной, так как она соответствует малым значениям скольжения, а следовательно, и меньшим значениям электрических потерь в обмотке ротора.

. Условие устойчивого установившегося режима работы АД «в малом» (рис.1.6.2):

$$dM/dn < dM_{ст}/dn \text{ или } dM/d\omega_2 < dM_{ст}/d\omega_2. \quad (1.25)$$

Условие устойчивой работы «в малом» выполняется на рабочей части характеристики АД и вплоть до максимального момента для значительного числа рабочих механизмов. Условие (1.24) является необходимым, но не достаточным. При достижении электромагнитным моментом максимального значения, например при случайном существенном увеличении нагрузки, наступает предел устойчивой работы двигателя. Следовательно, для устойчивой работы асинхронного двигателя «в большом» необходимо выбирать номинальный момент, чтобы он был меньше максимального $M_H < M_{макс}$. В этом случае двигатель будет работать устойчиво не только при номинальной нагрузке, но будет способен выдерживать некоторые перегрузки, что необходимо для надежной работы двигателя в электроприводе. Другими словами, двигатель должен обладать *перегрузочной способностью*, которая определяется отношением максимального момента к номинальному $M_{макс} / M_H$. Для асинхронных двигателей общего применения это отношение $1,7-2,5$.

Для наглядного представления о параметрах и характеристиках ЭМ в XX веке широко использовалась, кроме векторной, *круговая диаграмма*. Она является по существу графическим вариантом векторной диаграммы для Г-образн. схемы замещения АД со значительным числом графических построений, что является основным ее недостатком. Этот недостаток определяет низкую точность определения параметров и сложность построений и измерений особенно при $I > I_H$.

Пуск АД. Способы пуска АД определяют величину пускового тока и пускового момента. Пусковой момент АД определяется выражением (1.21). При пуске стремятся получить по возможности малый пусковой ток при достаточном для пуска моменте. Практически используют следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск); понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске; подключение к обмотке ротора пускового реостата R_{II} для пуска двигателей с фазным ротором.

Только асинхронные двигатели малой и средней мощности, обычно рассчитываемые при проектировании на *прямой пуск*, пускают

непосредственным подключением обмотки статора к сети. При этом имеет место большой бросок пускового тока (4 — 7) $I_{\text{ном}}$ (рис.1.7).

Пусковой ток АДКЗР ограничивают понижением напряжения питания двигателей большой мощности, а также АД средней мощности при недостаточной мощности электрических сетей. Понижение осуществляется: переключением обмотки статора с помощью переключателя с нормальной схемы Δ на пусковую схему Y ; включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных активных (резисторов) или реактивных (реакторов) сопротивлений; подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор; подключением двигателя к сети через тиристорное устройство плавного пуска (амплитудное или фазовое понижение напряжения статора АД, сопровождающееся падением пускового момента при ограничении тока.

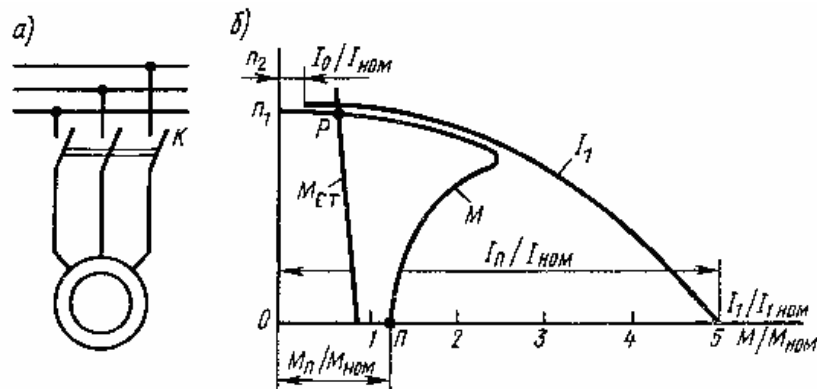


Рис.1.7. Схема прямого пуска АД и графики изменения моментов и тока

Понижение напряжения может осуществляться в таких схемах:

А). Переключением обмотки статора с помощью переключателя с нормальной схемы Δ на пусковую схему Y . (рис.1.8)

Б). Включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных активных (резисторов) или реактивных (реакторов) сопротивлений (рис.1.9, а и в).

В). Подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор, который может иметь несколько ступеней, переключаемых в процессе пуска соответствующей аппаратурой (рис.1.9, б).

Г). Подключением АД к сети через тиристорное устройство плавного пуска (рис.1.9, г).

Общим недостатком указанных методов пуска путем понижения напряжения является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения, поэтому их можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки или при пониженной нагрузке (рис.1.9,г).

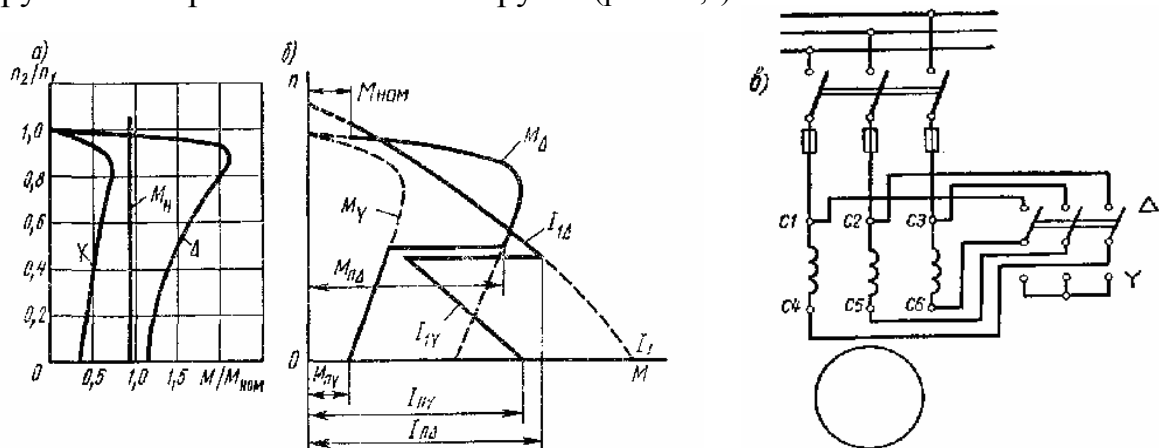


Рис.1.8. Механические характеристики (а), $n=f(M)$, $I=f(M)$ (б); схемы АД при пуске Δ - Y (в)

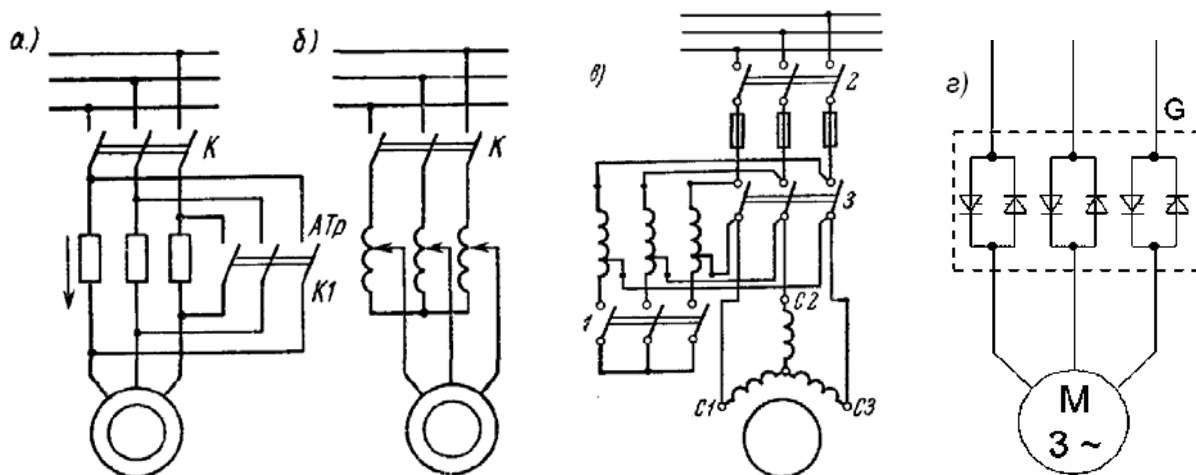


Рис. 1.9. Схемы включения асинхронного двигателя при пуске с понижением напряжения.

. Пусковой момент АД с фазным ротором увеличивается до максимального с помощью реостата $R_{\Pi} = R_{\text{доп}}$ в цепи ротора. Этот способ применяют для пуска двигателей с фазным ротором. При этом пусковой момент двигателя M_{Π} с увеличением сопротивления ротора r_2' до некоторого значения, увеличивается ($M_{\text{кр}} = \text{const}$; $s_{\text{кр}}$ — увеличивается) по сравнению с пусковым моментом при прямом пуске. Максимум пускового момента имеет место при $R'_{\Pi} + r_1 + r_2 \approx x_1 + x_2'$ (рис.1.10). Включение сопротивления R_{Π} увеличивает пусковой момент, но уменьшает пусковой ток двигателя, так как в этом случае

$$I_{\Pi} = U / \{ (R'_{\Pi} + r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2')^2 \}^{0.5}. \quad (1.26)$$

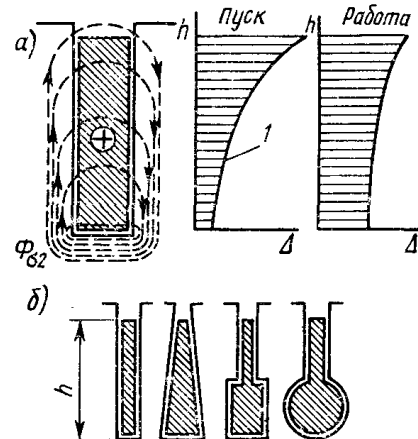
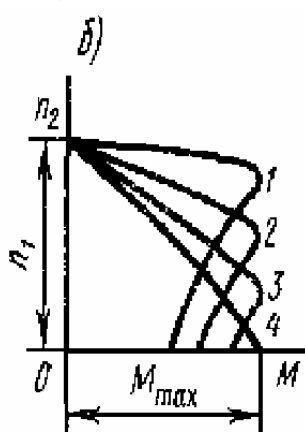
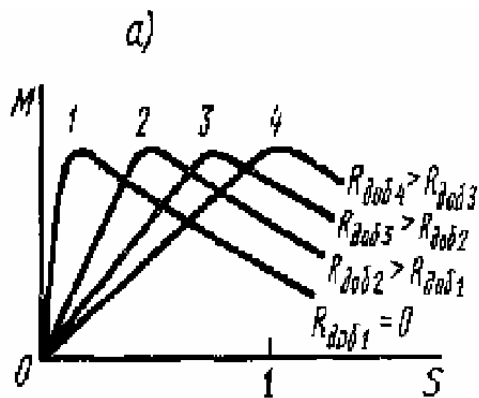


Рис.1.10. Характеристики $M(s)$ с реостатом в цепи ротора

Рис.1.11. Глубокие пазы ротора

Способы улучшения пусковых характеристик включают создание АД с повышенным пусковым моментом

. Асинхронные двигатели с вытеснением тока в роторе имеют большой пусковой момент при относительно малом пусковом токе. Одним из таких двигателей является двигатель с глубоким пазом. От нормального короткозамкнутого двигателя глубокопазный двигатель отличается только конструкцией ротора. Паза ротора этого двигателя представляют собой глубокие щели, в которые вложены стержни роторной обмотки в виде узких медных полос. С обеих сторон стержни приварены к замыкающим медным кольцам. Размеры паза (h_{Π} —высота паза; b_{Π} — ширина паза) имеют приблизительно соотношение $h_{\Pi} = (9 \dots 10) b_{\Pi}$ (рис.1.11, а, б).

В момент включения двигателя, когда частота тока в роторе имеет наибольшую величину $f_2 = f_1$, индуктивное сопротивление нижней части стержня значительно больше, чем верхней части, так как нижняя часть стержня сцеплена с большим числом линий магнитной индукции потока рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$. Происходит вытеснение тока в верхние слои. Плотность тока Δ в верхней части увеличивается. Это

равносильно увеличению активного сопротивления обмотки r_2' , что ограничивает величину тока в роторе и способствует росту пускового момента двигателя. Для усиления эффекта вытеснения пазы ротора делают фигурными (рис.1.11,б).

Факторы, определяющие скорость вращения ротора АД

. Скорость вращения ротора АД определяется формулой

$$n_2 = 60 f_1 (1 - s) / p, \quad (1.27)$$

из которой следуют три принципиально возможных метода регулирования асинхронных двигателей — изменение частоты f_1 (частотное регулирование), числа полюсов $2p$ и скольжения s .

Скольжение s обычно изменяют путем изменения потерь в роторе с помощью вводимого в цепь ротора реостата рис.1.10 (АДФР), но в некоторых случаях для этого изменяют величину питающего напряжения (АДКЗР).

Вид механических характеристик АД при разных способах регулирования скорости и изменение направления вращения

. Изменение частоты вращения при изменении величины питающего напряжения при постоянном значении нагрузки M_c и связанное с изменением формы механической характеристики показано на рис.1.12. Для АД нормального исполнения такое регулирование неприменимо, так как $M_{кр} = k_M U^2$; ($s_{кр} = 0,1 \dots 0,2 = \text{const}$). Метод можно использовать для двигателей малой мощности с большим активным сопротивлением ротора (микро-АД), но КПД их падает т.к. $P_{эл2} = sP_{эм}$.

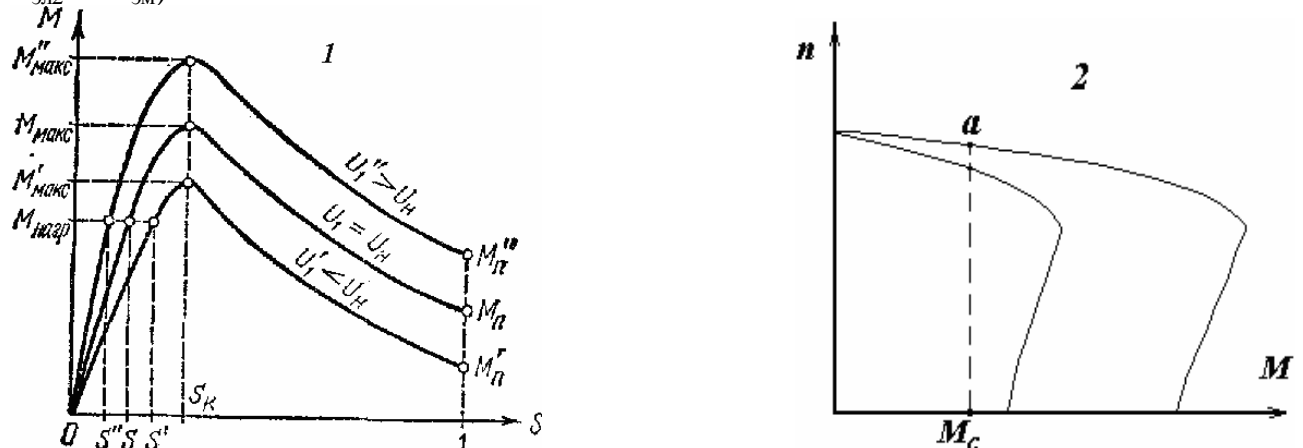


Рис.1.12. Механические характеристики при регулировании изменением питающего напряжения

. Регулирование скорости АД переключением числа полюсов. Такое регулирование позволяет получить ступенчатое изменение частоты вращения в соответствии с рядом синхронных скоростей. АД с изменением (переключением) пар полюсов называют *многоскоростными*. В АДФР для реализации метода пришлось бы переключать число пар полюсов на роторе, что недопустимо сложно. Чтобы не осуществлять переключения в обмотке ротора, последнюю выполняют короткозамкнутой

Наиболее часто употребляемые схемы соединений обмотки статора с переключением числа полюсов (в отношении 2:1) обеспечивают переключение при постоянном моменте (рис.1.13,а,б) и при приблизительно постоянной мощности (рис.1.13,в,г).

Многоскоростные двигатели имеют следующие недостатки:

Большие габариты и массу по сравнению с двигателями нормального исполнения, а следовательно, и большую стоимость. Кроме того, регулирование осуществляется большими ступенями; при частоте $f_1 = 50$ Гц частота вращения поля, при переключениях изменяется в отношении 3000:1500:1000:750.

Регулирование скорости АДФР возможно при включении в цепь ротора активных элементов (выпрямителей) — асинхронно-вентильные каскады (для мощных машин), или — преобразователей частоты (ПЧ) — машины двойного питания.

Плавное регулирование частоты вращения ротора АД в широких пределах при сохранении перегрузочной способности достигается при частотном регулировании. Чтобы получить требуемую характеристику двигателя, следует изменять не только частоту питающей сети f_1 , но и значение напряжения U_1 . Они должны иметь определенную зависимость, при которой обеспечивается устойчивая работа двигателя, не происходит чрезмерной нагрузки его по току и магнитному потоку и т. п. Это реализуется с помощью преобразователя частоты ТПЧ с системой автоматического регулирования.

Частотному способу регулирования скорости АД $U/f = \text{const}$ соответствуют семейство механических характеристик рис.1.14,а. Они построены на основании основного закона частотного регулирования Костенко:

$$U_{12}/U_{11} = (f_{12}/f_{11}) (M_{H2}/M_{H1})^{0,5}, \quad (1.28)$$

который при моменте нагрузки $M_{H1} = M_{H2} = \text{const}$ принимает вид

$$U_{12}/f_{12} = U_{11}/f_{11} = \text{const}, \quad \text{или} \quad U/f = \text{const} \quad (1.29)$$

т. е. питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте. При этом мощность двигателя увеличивается прямо пропорционально возрастанию частоты вращения двигателя.

Соотношения (1.29) являются приближенными, так как не учитывают активного сопротивления обмотки статора r_1 , входящего в точную формулу для $M_{кр}$. При учете активного сопротивления на низких частотах его влияние выражается в снижении критического момента (рис.1.14,б).

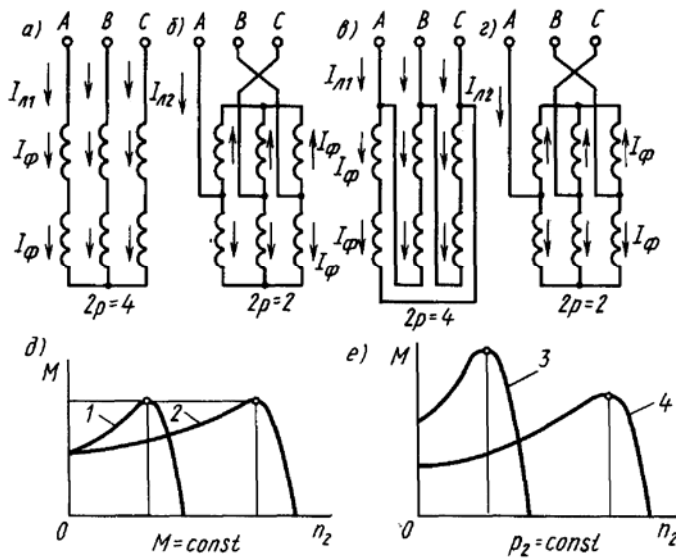


Рис. 1.13. Схемы соединения обмотки статора с переключением числа полюсов (а–с) в отношении 2:1 и механические характеристики двигателей при таком переключении (д, е)

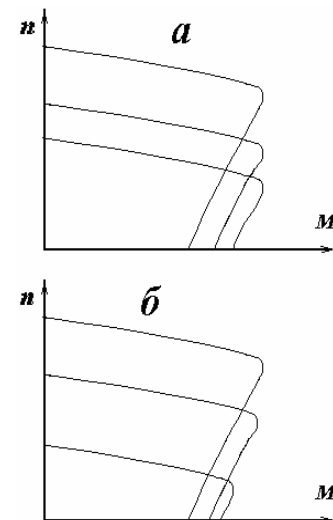


Рис.1.14. Характеристики при частотном регулировании

Изменение направления вращения. Для изменения направления вращения ротора электродвигателя надо изменить направление вращения магнитного поля. Для этого необходимо изменить порядок чередования тока в фазах обмотки статора. В трехфазных машинах это осуществляется путем переключения двух любых проводов, подводящих ток из трехфазной сети к фазам этой обмотки.

Генераторный режим асинхронной машины

Асинхронная машина из двигательного перейдет в генераторный режим, преобразуя механическую энергию первичного двигателя в электрическую, если ротор асинхронной машины, включенной в сеть с напряжением U_1 ,

вращать посредством первичного двигателя в направлении вращающегося поля статора, но со скоростью $n_2 > n_1$, (ротор будет обгонять поле статора).

При **генераторном режиме** асинхронной машины скольжение станет отрицательным и **может изменяться в диапазоне $0 < s < -\infty$, при этом частота ЭДС асинхронного генератора остается неизменной, так как она определяется скоростью вращения поля статора, т. е. остается такой же, что и частота тока в сети, на которую включен асинхронный генератор.**

Ввиду того, что в генераторном режиме асинхронная машина потребляет реактивную энергию из сети, необходимую для создания вращающегося поля статора, но отдает в сеть активную энергию, получаемую в результате преобразования механической энергии первичного двигателя. Следует обратить внимание, что **работа асинхронных генераторов возможна лишь при их совместной работе с синхронными генераторами, которые в этом случае необходимы как источники реактивной энергии.**

В отличие от синхронных, асинхронные генераторы не подвержены опасностям выпадения из синхронизма. Однако асинхронные генераторы не получили широкого распространения, что объясняется рядом их недостатков по сравнению с синхронными генераторами.

Одним из существенных недостатков асинхронных генераторов является значительная реактивная мощность, потребляемая ими из сети. Величина этой мощности пропорциональна намагничивающему току I_0 и может достигать **25—50% от номинальной мощности машины.**

Из этого следует, что для работы **3—4 асинхронных генераторов** необходимо использовать один синхронный генератор такой же мощности, что и мощность одного асинхронного генератора.

Если же асинхронные генераторы работают параллельно на общую сеть с несколькими асинхронными генераторами, то большая величина реактивной мощности возбуждения асинхронных генераторов значительно понизит коэффициент мощности всей электрической сети.

Асинхронный генератор может работать и в автономных условиях, т. е. без включения в общую сеть. Но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора **используется батарея конденсаторов, включенных параллельно нагрузке на выводы генератора.**

Непременным условием такой работы асинхронных генераторов является наличие остаточного намагничивания стали ротора, что необходимо для процесса самовозбуждения генератора. Небольшая ЭДС $E_{ост}$, наведенная в обмотке статора, создает в цепи конденсаторов (рис. 21.9), а следовательно, и в обмотке статора небольшой реактивный ток, усиливающий остаточный поток $\Phi_{ост}$. В дальнейшем процесс самовозбуждения развивается, как и в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения (см. раздел МПТ). Изменением емкости конденсаторов можно изменять величину намагничивающего тока, а, следовательно, и величину напряжения генераторов.

Из-за **чрезмерной громоздкости и высокой стоимости конденсаторных батарей** асинхронные генераторы с самовозбуждением не получили распространения. Асинхронные генераторы применяются лишь на электростанциях вспомогательного значения малой мощности, например в ветросиловых установках.

Обмотки статоров машин переменного тока (асинхронных и синхронных)

Существенное отличие обмоток статоров машин переменного тока от якорных обмоток МПТ заключается в том, что они незамкнутые и могут быть однослойными. Вместе с тем, обмотки статора машин переменного тока имеют много общего с обмотками якоря МПТ и представляет собой систему проводов,

определенным образом уложенных в пазах сердечника статора.

По способу укладки секций в паза обмотки статора бывают:

А. *Двухслойные* - когда в одном пазу лежат две стороны различных секций, например, петлевые (по аналогии с обмоткой якоря машины постоянного тока).

Б. *Однослойные* (концентрические и шаблонные).

Секция – элемент обмотки статора из одного или нескольких витков, имеющая активные стороны и лобовые части.

Шаг обмотки y – расстояние между активными сторонами секции.

Шаг называется *диаметральным или полным*, если он равен полюсному делению ($y = \tau = Z/2p = \text{ц.ч.}$), и *укороченным*, если шаг меньше полюсного деления ($y < \tau$) (рис.1.15). ЕДС $e_c < e_{cy}$.

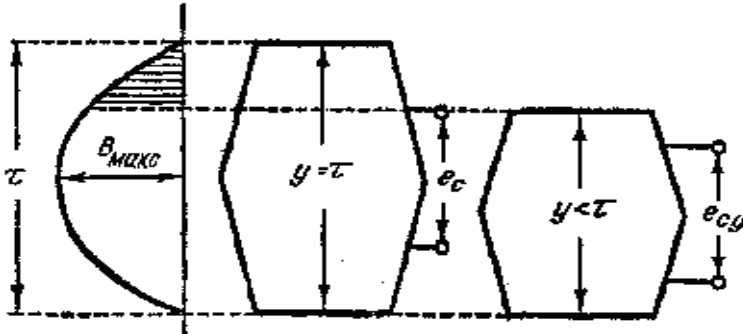


Рис.1.15. Секции обмотки

1) по числу фаз обмотки статора *бывают однофазные и многофазные* (гл. образом трехфазные);

2) в зависимости от размеров секций – обмотки с полным и обмотки с укороченным шагом.

По конструкции обмотки бывают:

а) *всыпные с мягкими катушками (ВМО)*;

б) *с жесткими катушками из прямоугольного изолированного провода.*

Мягкие катушки из круглого изолированного провода наматывают на шаблон для придания формы, укладывают, укрепляют и придают окончательную форму в изолированных пазах. Процесс изготовления ВМО может быть полностью механизирован.

Жесткие катушки (полукатушки) получают окончательную форму до укладки в изолированные паза, где их укрепляют и пропитывают.

Двухслойные обмотки имеют преимущественное распространение в машинах переменного тока (петлевые). *Простейшая трехфазная двухслойная обмотка* может быть выполнена тремя секциями, оси которых сдвинуты по окружности статора на $1/3$ двойного полюсного деления $-2\tau/3$. Каждая секция в этом случае представляет собой фазную обмотку (рис.1.16, где дан пример обмотки синхронной машины).

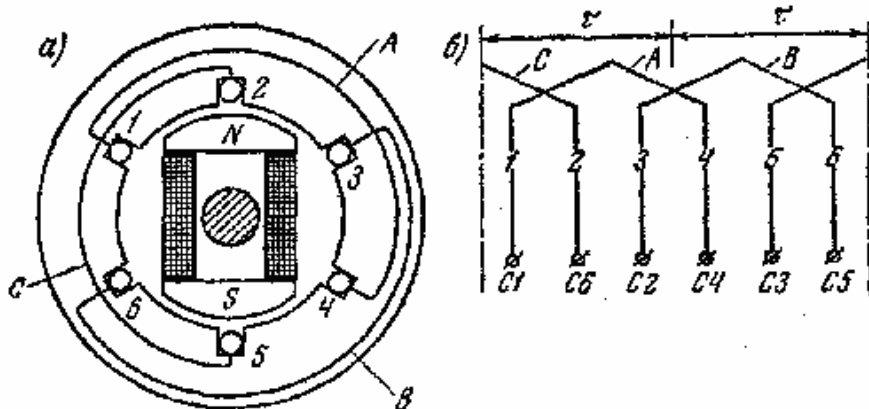


Рис.1.16. Трехфазная обмотка: расположение секций в сердечнике (а), развернутая схема (б)

Обычно в фазной обмотке нескольких секций, занимающих q пазов в пределах каждого полюсного деления. Таким образом, для образования трехфазной обмотки зубцовый слой сердечника статора в пределах каждого полюсного деления необходимо разделить на три зоны по q пазов в каждой.

Порядок чередования таких зон под каждым полюсом должен быть одинаковым. Секции, уложенные в пазы одинаковых зон, образуют фазные обмотки.

Для определения величины q , представляющей собой число пазов, приходящихся на полюс и фазу, следует пользоваться формулой

$$q = Z / (2pt), \quad (1.30)$$

где t – число фаз (для трехфазной обмотки $t = 3$).

Угол сдвига между осями фазных обмоток в трехфазной обмотке составляет 120 эл. градусов. Однако для построения схемы обмотки удобнее этот сдвиг выразить в пазах. Вся окружность статора составляет $360p$ эл. градусов, поэтому угол между соседними пазами

$$\alpha = 360p / Z. \quad (1.31)$$

Тогда сдвиг между фазными обмотками, выраженный в пазах, равен (рис.1.17)

$$\lambda = 120 / \alpha \quad (1.32)$$

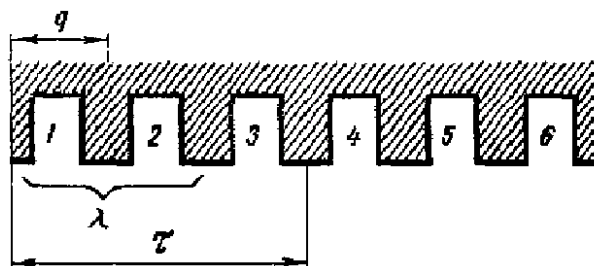


Рис.1.17. Развернутая поверхность статора ($q=1$; $\lambda=2$)

В более сложных случаях, отличных от простейшей обмотки возможны различные варианты. Например, в случае двухслойной обмотки статора трехфазной машины ($m = 3$), если $2p = 2$, $Z = 12$, шаг – полный: шаг обмотки $y = Z/2p = 12/2 = 6$ пазов; число пазов на полюс и фазу $q = 12/(2 \cdot 3) = 2$ паза; угол сдвига между соседними пазами $\alpha = 360p/Z = 360 \cdot 1/12 = 30$ эл. градусов; сдвиг между фазными обмотками $\lambda = 120/\alpha = 120/30 = 4$ паза.

Условное обозначение машин переменного тока на схемах (рис.1.18).

1. Машина асинхронная трехфазная с короткозамкнутым ротором.
2. Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором.
3. Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения на роторе.
4. Машина синхронная трехфазная неявнополюсная с обмоткой возбуждения на роторе.
5. Машина синхронная трехфазная явнополюсная с обмоткой возбуждения и с пусковой короткозамкнутой обмоткой на роторе.
6. Машина синхронная трехфазная с возбуждением от постоянных магнитов.
7. Машина индукторная.

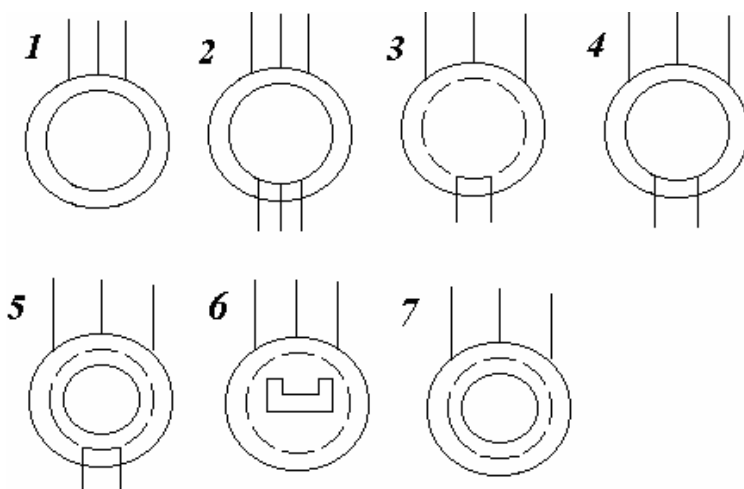


Рис.1.18. Схемы АД и СД

Асинхронные однофазные двигатели АОД небольшой мощности (15—600Вт) применяют в автоматических устройствах и электробытовых приборах для привода вентиляторов, насосов и др., так как эти приборы могут получать питание от однофазной сети переменного тока.

Т.к. по обмотке статора проходит переменный ток, МДС пульсирует во времени с частотой сети и создает неподвижный поток, изменяющийся во времени, а не круговой вращающийся поток, как в трехфазных АД при симметричном питании.

Обмотка статора АОД расположена в пазах, занимающих примерно две трети окружности статора, которая соответствует паре полюсов. Для упрощения анализа представляют неподвижный пульсирующий поток в виде суммы идентичных круговых полей, вращающихся в противоположных направлениях и имеющих одинаковые частоты вращения: $n_{пр} = n_{обр} = n_1$. Поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, называют *прямым*; поле обратного направления – *обратным или инверсным*.

Скольжение ротора относительно потока $\Phi_{пр}$

$$S_{пр} = 1 - n_2/n_1. \quad (1.33)$$

Скольжение ротора относительно потока $\Phi_{обр}$

$$S_{обр} = 1 + n_2/n_1. \quad (1.34)$$

Из (1.33) и (1.34) следует, что

$$s_{обр} = 1 + n_2/n_1 = 2 - S_{пр} \quad (1.35)$$

Электромагнитные моменты $M_{пр}$ и $M_{обр}$, образуемые прямым и обратным полями, направлены в противоположные стороны, а *результатирующий момент однофазного двигателя $M_{рез}$, равен разности моментов при одной и той же частоте вращения ротора* (рис.1.19).

Однофазный двигатель не имеет пускового момента, он вращается в ту сторону, в которую приводится внешней силой; частота вращения АОД при холостом ходе меньше, из-за наличия тормозящего момента, образуемого обратным полем; рабочие характеристики АОД хуже, он имеет повышенное скольжение при номинальной нагрузке, меньший КПД, меньшую перегрузочную способность; мощность АОД составляет примерно 2/3 от мощности трехфазного двигателя того же габарита. *Чтобы получить пусковой момент, однофазные двигатели снабжают пусковой обмоткой, сдвинутой на 90 электрических градусов относительно основной рабочей обмотки и содержащей конденсатор С* (рис.1.20,а). На рис.1.20,б-векторная диаграмма. На рис.1.21 показаны зависимости $M = f(s)$ для двигателя при включенной (кривая 1) и выключенной (кривая 2) пусковой обмотке. Пуск двигателя осуществляется на части

ab характеристики 1; в точке *b* пусковая обмотка АОД выключается, и в дальнейшем двигатель работает на части *c0* характеристики 2.

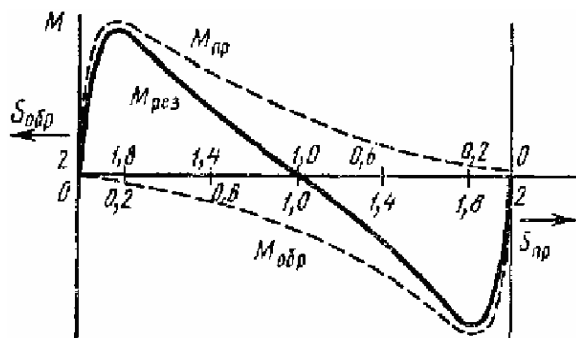


Рис.1.19. Характеристики $M=f(s)$ АОД

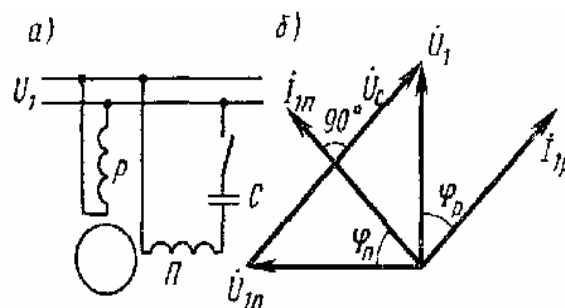


Рис.1.20. Схема (а), векторная диаграмма АОД (б)

Для улучшения механической характеристики двигателя, в некоторых случаях применяют однофазные двигатели, в которых обмотки *A* и *B* включены все время (рис.1.22, а). Такие двигатели называют конденсаторными (КАД).

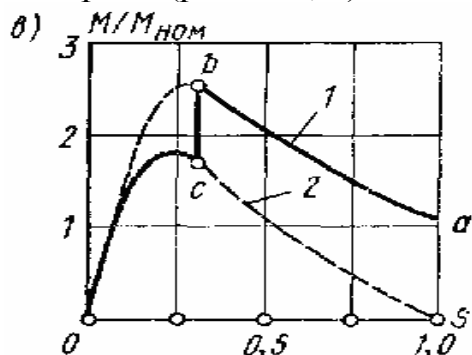


Рис.1.21. Характеристики АОД при пуске

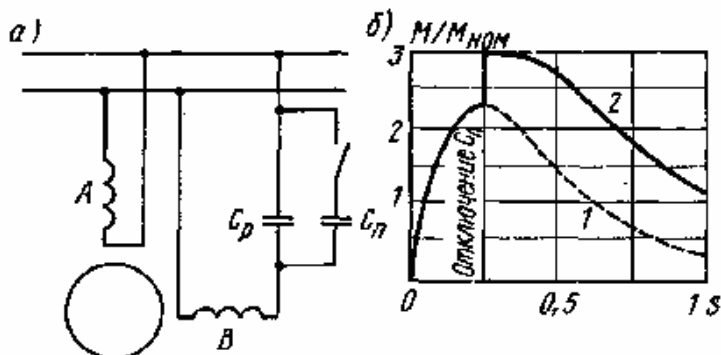


Рис.1.22. Схема и характеристики при пуске КАД

При пуске КАД работает на характеристике 2. После отключения $C_{п}$ двигатель работает на характеристике 1, рис.1.22,б.

При легких условиях пуска применяют двигатели с пусковым сопротивлением *R* вместо конденсатора *C* (рис.1.22, а). Наличие активного сопротивления обеспечивает меньший сдвиг фаз $\varphi_{п}$ между напряжением и током в этой обмотке (рис.1.22, б), чем сдвиг фаз $\varphi_{р}$ в рабочей обмотке. В связи с этим токи в рабочей и пусковой обмотках оказываются сдвинутыми по фазе на угол $\varphi = \varphi_{р} - \varphi_{п}$ и образуют несимметричное (эллиптическое) вращающееся поле, благодаря которому и возникает пусковой момент. Двигатели с пусковым сопротивлением надежны в эксплуатации и выпускаются серийно. Пусковое сопротивление встраивают в корпус двигателя и охлаждают тем же воздухом, который охлаждает весь двигатель.

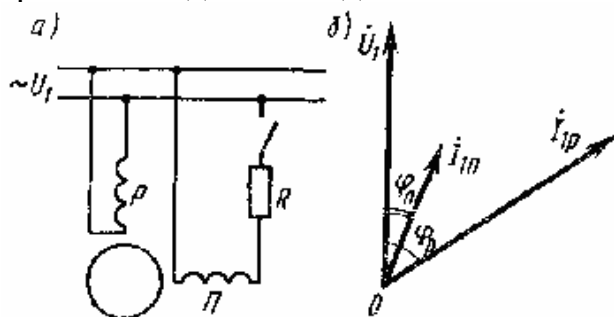


Рис.1.22. Схема ОАД с пусковым сопротивлением (а), его векторная диаграмма (б)

2. Синхронные машины. Работа и составные части

Синхронная машина (СМ) – бесколлекторная машина переменного тока, в которой скорость вращения ротора n_1 находится в строго постоянном отношении к частоте f_1 сети переменного тока (не зависит от нагрузки),

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad \text{где } p \text{ – число пар полюсов машины.} \quad (2.1)$$

Из раздела «Машины постоянного» тока следует, что в обмотке якоря генератора постоянного тока (ГПТ) индуцируется переменная ЭДС, которая посредством коллектора и щеток преобразуется в постоянную ЭДС. Следовательно, если ГПТ лишить коллектора, то он превратится в генератор переменного тока, данный на рис.2.1 в виде простейшей модели однофазного генератора переменного тока.

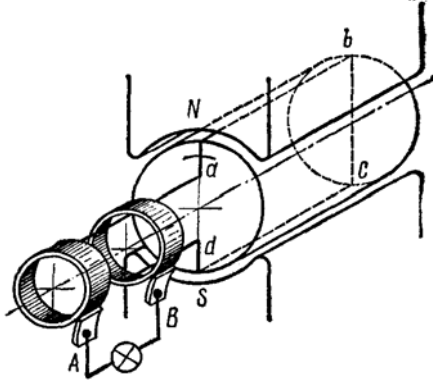


Рис. 2.1. Простейшая модель генератора переменного тока

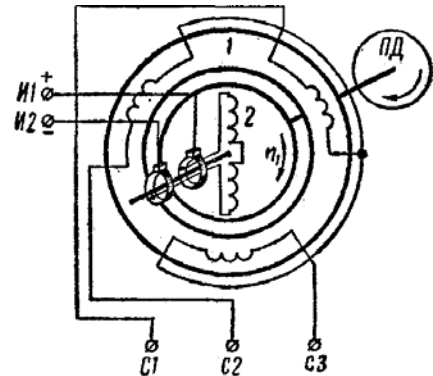


Рис. 2.2. Электромагнитная схема трехфазного СГ

При отсутствии необходимости в коллекторе целесообразно обмотку, в которой индуцируется ЭДС (якорь), расположить на неподвижной части генератора – на статоре 1 (неподвижный якорь, рис.2.2), а обмотку возбуждения (ОВ) – на роторе 2. Щеточный узел представлен щетками, скользящими по *контактным кольцам*, которые соединены с концами обмотки возбуждения. Такая конструктивная схема наиболее рациональна в СМ большой мощности, так как величина тока возбуждения, поступающего от возбудителя, в десятки раз меньше рабочего (переменного) тока, а напряжение не превышает 450 В.

Обмотка статора трехфазного синхронного генератора состоит из трех однофазных обмоток, смещенных в пространстве под углом 120 эл. градусов относительно друг друга (см. рис.2.2). Ротор вращаясь со скоростью приводного двигателя n_1 , заставляет вращаться магнитное поле возбуждения и индуцирует в трехфазной обмотке статора, ЭДС E_A , E_B и E_C , одинаковые по величине и сдвинутые по фазе (120 эл. градусов) образующие трехфазную симметричную систему ЭДС.

Ряд скоростей промышленных синхронных машин. Для получения ЭДС $f_1=50$ гц необходима скорость ротора в соответствии с (2.1).

В таблице приведены синхронные скорости для ряда значений p при $f_1=50$ Гц.

p	1	2	3	4	5	6
n_1	3000	1500	1000	750	600	500

Типы СМ, конструкция и материалы для их изготовления. СМ по типу приводных двигателей делят на гидрогенераторы, турбогенераторы и дизель-генераторы. По типу ротора – на СМ: с явно выраженными полюсами и с неявнополюсным ротором.

Большую группу СМ составляют двигатели (1600-6300 кВт), высоковольтные (6-11 кВ), например, типа СДН, с горизонтальным валом и частотой вращения 250-1000 об/мин.

Независимо от типа СМ, статор СМ выполняют из корпуса и сердечника. Корпусы отливают из чугуна или стали. Сердечник статора и обмотку выполняют точно также как для асинхронных машин (см.).

В явнополюсных СМ каждый полюс выполняется в виде отдельного узла, состоящего из сердечника 1 и полюсной катушки 3 (рис.2.3,а). Все полюса закрепляются на обode 4.

Сердечник полюса имеет с одной стороны полюсный наконечник 2, а с другой—«хвост», при помощи которого он крепится на обode. **Обмотку возбуждения на полюсе ротора** выполняют из медного провода. Пусковая или демпферная обмотка (ПО) на роторе выполняется в виде стержней, которые в явнополюсных машинах укладываются в пазы полюсных наконечников и соединяют на торцевых сторонах пластинами.

СМ с явно выраженными полюсами – гидрогенераторы при сравнительно небольшой скорости вращения (60— 500 об/мин), ротором с большим числом полюсов, для получения частоты ЭДС 50 Гц, и вертикальным валом. Дизель-генераторы рассчитываются на скорость вращения 600—1500 об/мин и выполняются также с явнополюсным ротором.

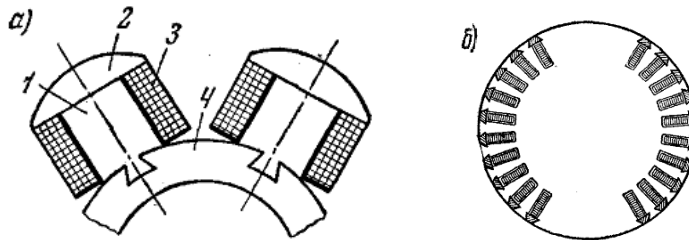


Рис.2.3. Конструкции роторов синхронных машин: а – обод ротора с явно выраженными полюсами; б - ротор с неявно выраженными полюсами

В неявнополюсных СМ ротор (см. рис.2.3,б) выполняют из цельной поковки или сборным. Для размещения обмотки возбуждения на наружной поверхности ротора выфрезеровывают пазы прямоугольной формы, которые занимают только две трети окружности, образуя центральные зубцы.

СМ с неявнополюсным ротором– в турбогенераторах при больших скоростях вращения ротора $n_1=3000$ об/мин по условиям механической прочности. При этом неявнополюсный ротор, имеет вид удлиненного стального цилиндра с продольными пазами на поверхности для обмотки возбуждения из медного провода (рис. 14.5,6). Турбогенераторы как и дизель-генераторы выполняются с горизонтальным расположением вала.

Есть два способа возбуждения: электромагнитное (*независимое* и *самовозбуждение*) и постоянными магнитами. При возбуждении СМ *постоянными магнитами* в СМ *нет* контактных колец.

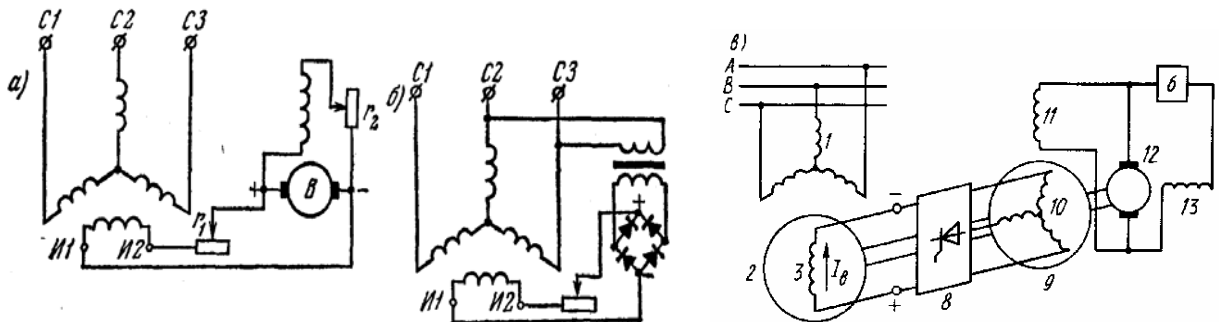


Рис.2.4. Электромагнитное возбуждение синхронных машин; а – независимое; б – самовозбуждение; в – бесщеточная система возбуждения

При независимом возбуждении для питания ОВ используется генератор постоянного тока, называемый возбудителем В (рис.2.4,а). Мощность возбудителя составляет от 2 до 5% мощности СМ при $U_{см}$ до 450 В. Возбудитель устанавливают либо на валу СМ, либо его устанавливают отдельно со своим приводным двигателем.

При самовозбуждении питание обмотки возбуждения осуществляется от самого синхронного генератора с применением выпрямителя (см. рис.2.4,б). Самовозбуждение применяется в синхронных машинах малой и средней мощности.

В современных бесщеточных системах возбуждения рис.2.4,в в качестве возбудителя используют синхронный генератор 9, у которого обмотка якоря 10 расположена на роторе, а выпрямитель 8 укреплен непосредственно на валу. Обмотка возбуждения возбудителя 11 получает питание от подвозбудителя 12, снабженного регулятором напряжения 6. При таком способе возбуждения в цепи питания обмотки возбуждения 3 генератора отсутствуют

скользящие контакты, что существенно повышает надежность системы возбуждения. Вместо возбудителей 12 возбуждение двигателей может осуществляться от тиристорных возбудителей с системой управления и автоматического регулирования тока возбуждения.

При возбуждении СМ **постоянными магнитами** последние обычно располагаются на роторе. Этот способ возбуждения дает возможность получить машину (обычно малой мощности) без контактных колец.

.Уравнения напряжения неявнополюсного и явнополюсного синхронных генераторов. В СМ рис.2.5 ротор вращается со скоростью магнитного поля статора (с синхронной скоростью) $n_c = n = 60f_1/p$ ($\omega_c = \omega = 2\pi f_1/p$).

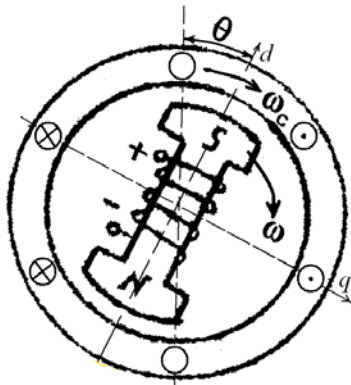


Рис.2.5. Модель явнополюсной СМ

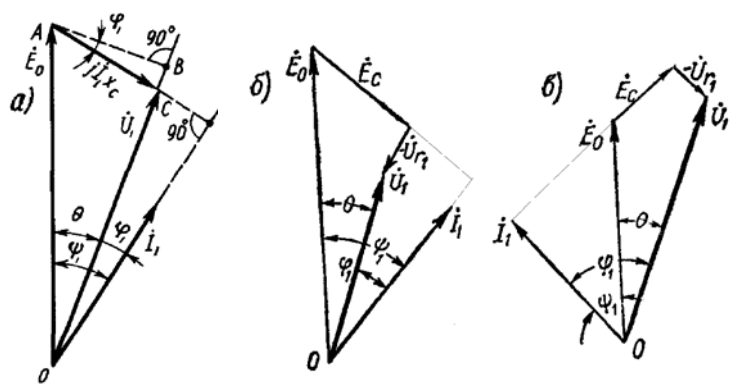


Рис.2.6. Векторные диаграммы неявнополюсного СГ

Уравнение напряжения цепи статора неявнополюсного СГ имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{U}_{r1} = \dot{E}_0 + (-j\dot{I}_1 x_c) - \dot{I}_1 r_1 \quad (2.2)$$

где U_1 – фазное напряжение; I_1 – ток статора (фазный); x_c – синхронное сопротивление одной фазы статора СМ; E_0 – ЭДС, наводимая в фазе статора полем ротора Φ_0 ; $\dot{E}_c = -j\dot{I}_1 x_a + (-j\dot{I}_1 x_{\sigma 1}) = -j\dot{I}_1 x_c = \dot{E}_a + \dot{E}_s$; \dot{E}_a – ЭДС реакции якоря, соответствующая МДС якоря F_a ; \dot{E}_s – ЭДС рассеяния обмотки статора, индуцируемая потоком рассеяния статора; $x_c = x_a + x_{\sigma 1}$ – синхронное индуктивное сопротивление неявнополюсной машины; $x_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния; x_a – индуктивное сопротивление реакции якоря; U_{r1} – активное падение напряжения в статорной обмотке.

На основании уравнения напряжения СГ можно построить векторные диаграммы рис.2.6. Уравнения и диаграммы дают возможность сделать следующие выводы:

а) основным фактором, влияющим на изменение напряжения нагруженного генератора, является E_c , поэтому можно пренебречь влиянием U_{r1} рис.2.6,а; б) при работе генератора на активно-индуктивную нагрузку, напряжение на выводах обмотки статора U_1 с увеличением нагрузки уменьшается, что объясняется размагничивающим влиянием реакции якоря; в) при работе генератора на активно-емкостную нагрузку, напряжение U_1 с увеличением нагрузки повышается, что объясняется подмагничивающим влиянием реакции якоря.

.Реакция якоря синхронных машин в принципе аналогична реакции якоря в машинах постоянного тока и представляет собой процесс воздействия (поля) МДС обмотки статора F_a на (поле) МДС обмотки возбуждения $F_0 = \Phi_0 R_m$

$$F_a = 0,45 m_1 \frac{I_1 w_1}{p} K_1; \quad F_0 = I_B W_B / p.$$

Однако, если в МПТ влияние реакции якоря на рабочие свойства машины зависит исключительно от величины нагрузки, то в СМ влияние реакции якоря определяется еще и характером нагрузки.

При активной нагрузке взаимодействие МДС F_a и F_0 аналогично реакции якоря в

ГПТ. При *индуктивной* нагрузке (угол между векторами тока I_1 и ЭДС E_0 $\psi = 90^\circ$) реакция якоря в синхронном генераторе оказывает *продольно-размагничивающее* действие. При *емкостной* нагрузке ($\psi = -90^\circ$) СГ реакция якоря оказывает *продольно-намагничивающее* действие.

В явнополюсной машине магнитное сопротивление в межполюсном пространстве больше магнитного сопротивления под полюсами. Объясняется это значительным воздушным зазором межполюсного пространства. Поэтому составляющая магнитного потока якоря по поперечной оси q в явнополюсной машине намного меньше, чем в неявнополюсной (рис.2.5). В явнополюсных машинах индуктивные сопротивления x_{ad} и x_{aq} не равны. Поэтому уравнение ЭДС явнополюсного синхронного генератора имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_S - \dot{U}_{r1} \quad (2.3)$$

Т.е. реакция якоря рассматривается отдельно по поперечной и продольной осям, а не в виде полной ЭДС E_a ($\dot{E}_c = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_S$)

Уменьшение составляющих магнитного потока в явнополюсной машине по осям учитывают коэффициентами уменьшения потока относительно неявнополюсной машины K_d (0,85) и K_q (0,4-0,5).

. Факторы, влияющие на частоту ЭДС синхронного генератора.
ЭДС фазной обмотки

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 W_s K_1, \quad (2.4)$$

где $K_1 = K_{y1} K_{p1}$: $K_{y1} = \sin[(y/\tau)90^\circ]$; $K_{p1} = \frac{\sin(180^\circ v/2m)}{q \cdot \sin(180^\circ v/2mq)}$ (для гармоники $1 v = 1$)

– коэффициенты обмоточный: укорочения ; распределения.

Так как в СМ ротор вращается со скоростью магнитного поля статора (с синхронной скоростью) $n_2 = n_1 = 60f/p$ ($\omega_c = 2\pi f/p$), то частота ЭДС зависит от числа пар полюсов и скорости вращения ротора.

. Формулы для определения момента синхронной машины.

С учетом того, что обычно СГ работает на сеть, состоящую из нескольких генераторов, получим формулу для момента СМ, учитывая, что на рис.2.6,а треугольники А0С и АВС имеют общую сторону. Откуда $E_0 \sin \theta = I_1 x_c \cos \phi_1$. Тогда $P_{эм} = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1 = (m_1 U_1 E_0 / x_c) \sin \theta$. Учитывая, что $M = P_{эм} / \omega$, получим

$$M_{эм} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_c} \sin \theta; \quad M = M_{\max} \sin \theta, \text{ где } E_1 = E_0 = 4,44 \Phi f_1 W_1 K_1. \quad (2.5)$$

В явнополюсной СМ, ввиду наличия неравных синхронных индуктивных сопротивлений $x_d = x_{ad} + x_{\sigma 1}$ и $x_q = x_{aq} + x_{\sigma 1}$, кроме основной составляющей момента M_0 , имеется реактивная составляющая момента M_p

$$M = [m_1 (U_1 E_0 \sin \theta) / (\omega x_d)] + M_p. \quad (2.6)$$

$$M_p = m_1 [U_1^2 (x_d - x_q) \sin 2\theta] / (2\omega x_d x_q). \quad (2.7)$$

При работе без нагрузки угол нагрузки θ между векторами МДС статора и ротора равен нулю. При нагрузке вектор МДС ротора смещается на угол $\theta \neq 0$, рис.2.5. Для увеличения нагрузки синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, надо увеличить момент M_1 , вращающий его вал.

. Зависимости $M=f(\theta)$ синхронных машин разных типов. Зависимость

$M = f(\theta)$ называется *угловой* характеристикой синхронной машины (Рис.2.7). Неявнополюсной машине соответствует кривая 1 и критический угол $\theta_{кр} = 90^\circ$.

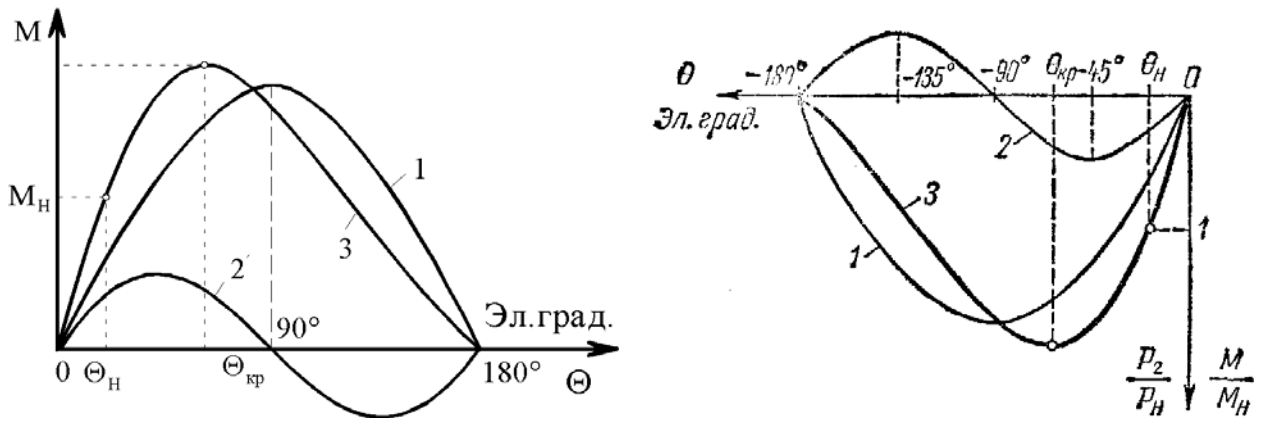


Рис.2.7. Угловые характеристики $M=f(\theta)$: синхронного генератора (а), двигателя (б)

Угловая характеристика СД аналогична угловой характеристике СГ, включенного на параллельную работу, но располагается в третьем квадранте системы координат (рис.2.7,б кривые 1, 3), т. е. эта зависимость выражается отрицательными значениями момента M и угла θ . Таким образом, угловая характеристика СМ представляет собой две полуволны: положительную, соответствующую генераторному режиму работы, и отрицательную, соответствующую двигательному режиму. В СГ рост нагрузки сопровождается увеличением угла θ в направлении вращения ротора, а в СД увеличение нагрузки на вал сопровождается увеличением угла θ в направлении, противоположном вращению ротора т. е. вектор МДС ротора (ось полюсов ротора) отстает от вектора МДС статора.

Для явнополюсной машины: во-первых, зависимость $M=f(\theta)$ искажается относительно синусоиды, а критический угол составляет $60...80^\circ$, в зависимости от отношения x_d/x_q (рис.2.7,а, кривая 3); во-вторых из анализа зависимости для реактивного момента вытекает возможность создания специального двигателя – синхронного реактивного двигателя (кривая 2 на рис.2.7,а).

Синхронный двигатель без обмотки возбуждения, при условии, что $x_d > x_q$, т.е. если ротор имеет явновыраженные полюса, называется реактивным синхронным двигателем (РСД).

Из выражения электромагнитного момента явнополюсной машины

$$M = [m_1 (U_1 E_0 \sin \theta) / (\omega x_d)] + m_1 [U_1^2 (x_d - x_q) \sin 2\theta] / (2\omega x_d x_q) = M + M_p$$

следует, что если машину лишить возбуждения ($E_0 = 0$), то первое слагаемое, представляющее основную составляющую электромагнитного момента, становится равным нулю. Тогда на ротор такого невозбужденного двигателя будет действовать лишь реактивная составляющая электромагнитного момента

$$M_p = m_1 [U_1^2 (x_d - x_q) \sin 2\theta] / (2\omega x_d x_q).$$

Достоинства РСД – простота конструкции, надежность в работе (отсутствие скользящих контактов) и удобство в эксплуатации (нет ОВ), их ротор вращается с постоянной скоростью, независимо от нагрузки на валу.

К недостаткам реактивных двигателей следует отнести:

1. Величина вращающего момента РСД пропорциональна U_1^2 . 2. Мощность РСД $\{P_2 = m_1 [U_1^2 (x_d - x_q) \sin 2\theta] / (2x_d x_q)\}$ меньше мощности СД таких же габаритов, но с обмоткой возбуждения ($E_0 \neq 0$). 3. Электромагнитный момент РСД пропорционален синусу двойного угла θ Угловая характеристика РСД представлена на рис.2.7, а (кривая 2). 4. Максимальное значение момента РСД соответствует углу $\theta_{кр} = 45^\circ$, оно в несколько раз меньше максимального момента СД с ОВ. 5. Низкий коэффициент мощности, пропорциональный отношению x_d/x_q , при $x_d/x_q = 4 \cos \varphi = 0,6$, а при $x_d/x_q = 5 \cos \varphi = 0,67$. Обычно эти двигатели изготавливаются на небольшие мощности (десятки – сотни ватт) и применяются в автоматике.

Для пуска РСД снабжаются пусковой клеткой на роторе (асинхронный пуск). Однофазные РСД включаются в однофазную сеть переменного тока по таким же схемам, что и однофазные асинхронные двигатели.

Уравнение равновесия моментов электрической машины при различных режимах работы. Как следует из угловой характеристики *статическая устойчивость* неявнополюсного СГ обеспечивается при углах нагрузки меньших критического $\theta < 90^\circ$, соответствующего максимальному моменту.

При увеличении нагрузки синхронной машины до значений, при которых угол не превышает критический $\theta < \theta_{кр}$ (кривая 1, рис.2.7), синхронная машина работает устойчиво, так как рост нагрузки, например при росте момента приводного двигателя вызывает ускорение, увеличение угла θ и сопровождается увеличением электромагнитного момента. В этом случае любой установившейся нагрузке соответствует равенство вращающего момента первичного двигателя M_1 и суммы противодействующих моментов (электромагнитного M и холостого хода M_0) $M_1 = M + M_0$. В результате скорость вращения ротора остается неизменной, равной синхронной скорости.

Для двигателя уравнение равновесия моментов при установившемся режиме работы ($\omega = \text{const}$, $J = \text{const}$) когда полезный момент M_2 постоянен имеет вид $M = M_0 + M_2$.

Угол нагрузки и перегрузочная способность синхронной машины. Равновесие моментов устанавливается через некоторое время, так как ротор вследствие инерции вращающихся масс занимает новое положение после совершения колебательных движений. Затуханию колебаний способствуют потери энергии на вихревые токи в сердечнике ротора, для более эффективного успокоительного действия применяют успокоительные (УО) (демпферные) обмотки. Например, в явнополюсных СМ их укладывают в виде стержней, замкнутых с торцов, в пазы полюсных наконечников. В СД роль УО играет пусковая асинхронная обмотка. Причины колебаний могут быть собственные (изменение нагрузки и момента первичного двигателя) и вынужденные (неравномерный характер вращения при поршневых двигателях). Опасным является совпадение их частот.

При $\theta > \theta_{кр}$ происходит нарушение равенства моментов приводного двигателя и СГ, который выпадает из синхронизма, что является аварийным режимом.

Длительная работа синхронной машины со скольжением, т.е. при $\omega \neq \omega_c$, невозможна. Если магнитное поле статора будет вращаться быстрее ротора, то угол θ будет непрерывно увеличиваться. При $\theta > \theta_{кр}$ момент синхронной машины начнет уменьшаться, а при $\theta > \pi$ момент на валу меняет свой знак и делается тормозным. Это приводит к быстрому торможению ротора. Такой режим называют «выпадением из синхронизма». Физически это объясняется изменением характера взаимодействия полей статора и ротора (Рис.2.7).

Из рассмотрения рис.2.7 следует, что синхронная машина работает устойчиво, если $dM/d\theta > 0$, и неустойчиво, если $dM/d\theta < 0$.

При работе ($dM/d\theta > 0$) и отклонении θ на величину $\Delta\theta$ возникает синхронизирующий момент (стремящийся восстановить θ) $\Delta M = (dM/d\theta)\Delta\theta$ ($dM/d\theta$ – удельный синхронизирующий момент (УСМ)). УСМ имеет максимум при $\theta = 0$, с ростом угла нагрузки уменьшается, и при $\theta = \theta_{кр}$ равен нулю. Поэтому СМ *обычно работают с $\theta = 20...35^\circ$* , что соответствует более чем двукратному запасу по моменту ($dM/d\theta = M_{\max} \cos\theta$). Перегрузочная способность СМ средней и большой мощности по ГОСТ $M_{\max}/M_H = 1,6...1,7$.

Устойчивость работы СМ увеличивается с ростом тока возбуждения.

Для работы при активно-индуктивной нагрузке СГ должны быть перевозбуждены для повышения перегрузочной способности. С недо возбуждением СМ работает только для стабилизации напряжения U при активно-емкостной нагрузке сети.

Понятия о перегрузочной способности, области устойчивой работы, выведенные для генераторного режима, применимы и для двигательного режима СМ.

Основные характеристики СГ в сравнении с характеристиками ГПП. Свойства синхронного генератора (СГ) определяются характеристиками холостого хода, внешними, регулировочными и короткого замыкания.

Для СГ важно отношение тока возбуждения $I_{ВОН}$ (при номинальном напряжении в опыте х.х.) к току $I_{ВКН}$ (при номинальном токе в опыте к.з.) – ОКЗ (0,5...1,4). При малом ОКЗ СМ менее устойчива при параллельной работе, имеет менее жесткую внешнюю характеристику, но меньшие габариты.

Внешняя характеристика СГ представляет собой зависимость: $U_1=f(I_1)$ при $I_{в} = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$; $n_1 = n_n = \text{const}$. рис.2.8,а. Отличие кривой при индуктивной (кривая 2) и в случае емкостной нагрузки (кривая 3) от кривой при активной нагрузке (кривая 1) объясняется влиянием соответственно размагничивающего ($U_o > U_{1H}$) и подмагничивающего действия реакции якоря ($U_o < U_{1H}$).

В практике эксплуатации СГ применяют автоматическое регулирование напряжения. В соответствии с нормами номинальное повышение (изменение) напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_H = (E_0 - U_{1H}) / U_{1H}$ не должно превышать 50 %.

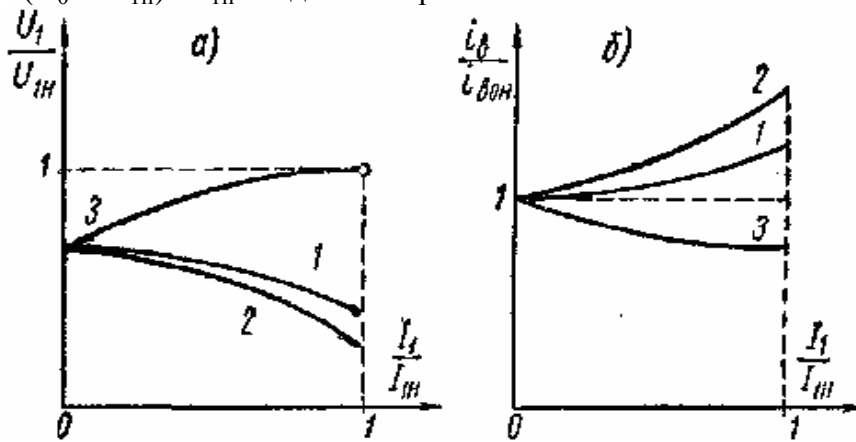


Рис.2.8. Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики синхронного генератора

Регулировочная характеристика показывает, как изменять $I_{в}$ при изменении I_1 , чтобы $U = \text{const}$.

Характеристики, снимаемые для синхронной машины.

Только для синхронной машины, работающей на сеть, имеют значение угловые характеристики рис.2.7, а также снимаются **U-образные кривые** $I_1 = f(I_{в})$ (при постоянной активной нагрузке), рис.2.10.

При изменении тока возбуждения генератора, подключенного на параллельную работу с сетью, возникает избыточная ЭДС ΔE , вызывающая реактивный (индуктивный при перевозбуждении) ток I_p (рис.2.9,а). Благодаря размагничивающей реакции якоря E_0 остается неизменной. При неизменном моменте M_1 активный ток остается неизменным. При недозвуждении - ток емкостной, реакция якоря - подмагничивающая. Т.о. при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока статора, т.е. реактивная мощность машины.

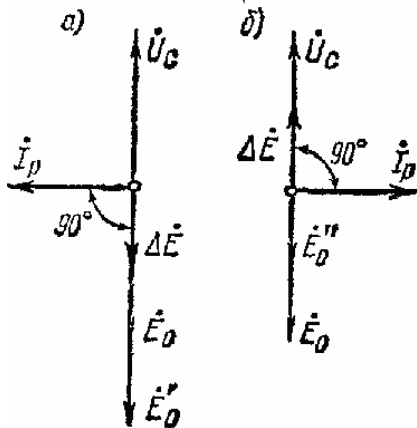


Рис.2.9. Векторная диаграмма ЭДС СГ

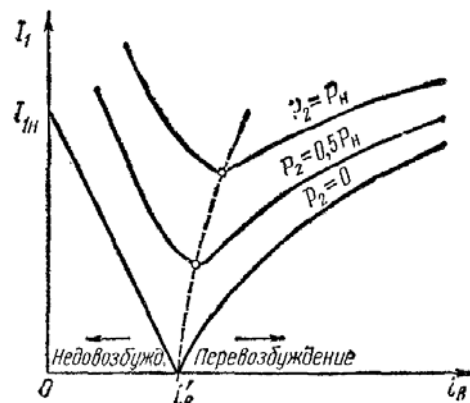


Рис.2.10. U-образные кривые СГ

Любой нагрузке генератора P_2 соответствует такое значение тока возбуждения i'_o , при котором ток статора минимален и равен активной составляющей тока статора $I_{1\text{мин}} = I_1 \cos \varphi_1$ (рис.2.10). В этом случае СГ работает с $\cos \varphi_1 = 1$.

Перевозбужденная СМ на холостом ходу относительно сети эквивалентна емкости (отдает в сеть реактивную мощность). *Недовозбужденная* СМ на холостом ходу относительно сети эквивалентна индуктивности (потребляет из сети реактивную мощность).

.Условия включения трехфазных синхронных генераторов на параллельную работу.

Обычно на электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую электрическую сеть. (СГ работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности, напряжение сети и ее частота постоянны).

Включение генератора на параллельную работу с сетью должно происходить при возможно меньшем броске тока в момент присоединения генератора к сети (не более $3,5 I_{\text{ном}}$).

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить условия синхронизации:

- равенство значений напряжений сети U_c и генератора U_r .
- равенство частот
- совпадение начальных фаз
- согласование порядка чередования фаз (для трехфазных сетей).

Синхронизация, т.е. обеспечение совпадения по фазе векторов напряжений сети и генератора контролируется специальными приборами—ламповыми и стрелочными синхроскопами при малой мощности СГ.

На электрических станциях обычно используют автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

При использовании стрелочного синхроскопа генератор подключают к сети в тот момент, когда стрелка устанавливается вертикально (12 часов) или с небольшой скоростью стремится в это положение. В ламповых синхроскопах используется схема “на погасание” (подключение при погасании ламп) и схема “вращение света”.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации, при котором генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения (обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление). При этом ротор разгоняют до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуцированным током в демпферной обмотке. После этого в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. При этом методе в момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, который не должен превышать $3,5 I_{\text{ном}}$.

.Нагрузка генератора, включенного на параллельную работу

После включения СГ на параллельную работу с сетью, его ЭДС E_o равна и противоположна по направлению напряжению сети U_c . Ток в цепи генератора равен нулю, т.е. генератор работает без нагрузки. Механическая мощность первичного двигателя P_1 в этом случае полностью затрачивается на покрытие потерь холостого хода

$$P_1 = P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{в}}. \quad (2.8)$$

Если увеличить вращающий момент первичного двигателя, то ротор СГ, получив некоторое ускорение, сместится относительно своего первоначального положения на угол θ в сторону вращения. На такой же угол θ окажется сдвинутым вектор ЭДС генератора E_o относительно своего первоначального положения. Под действием результирующей ЭДС ΔE , равной геометрической сумме ЭДС E_o и напряжения U_c , в цепи генератора появится ток I_1 . Генератор

получает электрическую нагрузку, а первичный двигатель – механическую нагрузку. Теперь механическая мощность P_1 первичного двигателя частично расходуется на покрытие потерь холостого хода генератора (2.8), а частично преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$ генератора, представляющую собой активную мощность в цепи статора, $P_1 = P_0 + P_{эм}$.

Принцип действия синхронного двигателя. СМ имеет статор, по конструкции аналогичный статору АМ с якорной трехфазной обмоткой переменного тока. Ротор, обмотка которого возбуждается постоянным током, представляет собой постоянный электромагнит.

Следовательно, работа синхронного двигателя основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с полем электромагнитов постоянного тока ротора.

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент. При этом СМ потребляет из сети активную мощность. Частота вращения ротора остается неизменной, жестко связанной с частотой сети по соотношению $n_2 = n_1 = 60f_1/p$.

Уравнения напряжения неявнополюсного и явнополюсного СД, без учета активного сопротивления статорной обмотки, имеют соответственно вид

$$-\dot{U}_c = \dot{E}_0 + \dot{E}_c = \dot{E}_0 - j x_c \dot{I}_1, \quad (2.9)$$

$$-\dot{U}_c = \dot{E}_0 - j x_d \dot{I}_d - j x_q \dot{I}_q. \quad (2.10)$$

Здесь вместо напряжения машины U подставлено $-\dot{U}_c$ так как термин «напряжение двигателя» обычно не употребляется. (На упрощенной ($r_1=0$) векторной диаграмме вектор $-\dot{U}_c$ опережает вектор \dot{E}_0 рис.2.11).

Механическая характеристика СД. Синхронная машина работает с неизменной скоростью $\omega = \omega_c$, а при изменении нагрузки меняется лишь угол θ . Поэтому статическая механическая характеристика синхронного двигателя (1) имеет вид горизонтальной прямой (Рис. 2.12).

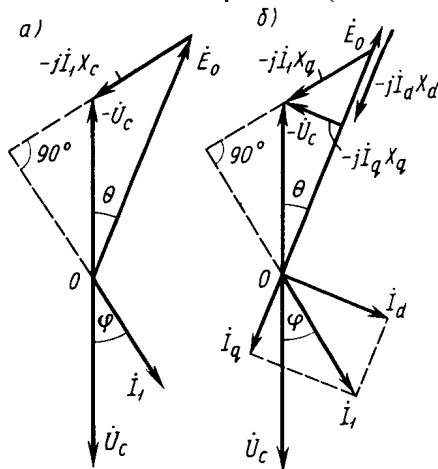


Рис.2.11. Векторные диаграммы неявнополюсного(а) и – явнополюсного СД (б)

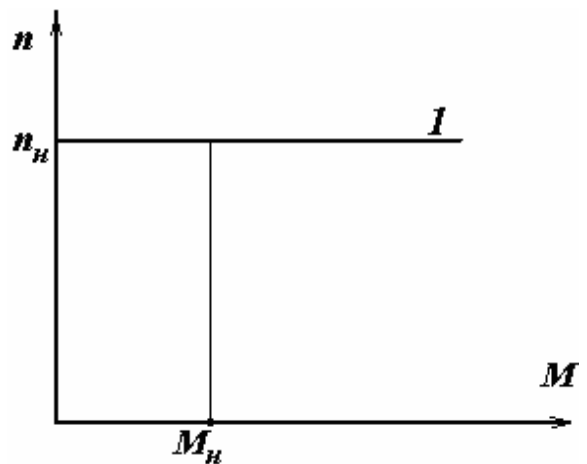


Рис.2.12.Механическая характеристика СД

Из выражения для момента СД следует, что при уменьшении напряжения в сети или кратковременных увеличениях нагрузки, увеличивающих угол θ , можно, увеличивая i_b , (E_0) поддерживать или даже увеличивать максимальный момент синхронной машины. Такое увеличение тока возбуждения называют форсировкой возбуждения.

Естественная и искусственные характеристики электрического двигателя.

Естественная механическая характеристика СД (Рис.2.12), как и для других двигателей, снимается при номинальных параметрах режима (номинальном напряжении якоря и возбуждения) и при отсутствии сопротивлений в цепи якоря.

Способы регулирования частоты вращения синхронного двигателя.

Для регулирования скорости СД $n_2 = n_1 = 60f/p$ принципиально возможно

изменять число пар полюсов и частоту питающего напряжения.

Переключение пар полюсов на статоре и роторе СД практически трудно реализуемо и для изменения скорости не применяется.

Поэтому практически используют лишь изменение частоты питающего напряжения статора.

Однако при частотном регулировании необходимо, чтобы двигатель не выпал из синхронизма, что возможно при постоянной нагрузке, когда угол нагрузки $\theta < \theta_{кр}$.

Наиболее пригоден для СД метод частотного регулирования с самосинхронизацией, при котором двигатель в принципе не может выпасть из синхронизма. При этом способе управление преобразователем частоты осуществляется от системы датчиков положения ротора, вследствие чего напряжение подается на каждую фазу СД при углах нагрузки $\theta < \theta_{кр}$, автоматически обеспечивая условия устойчивой работы двигателя. Перегрузочная способность определяется только перегрузочной способностью преобразователя частоты.

Синхронные двигатели, регулируемые путем изменения частоты с самосинхронизацией, называют вентильными двигателями (ВД).

При питании ВД от вентильного преобразователя частоты, угол регулирования которого β_0 , практически полностью определяет угол θ при постоянных значениях частоты питающего напряжения и тока возбуждения (ω_1 и E_0) формула для момента принимает вид

$$M = [m_1 U_1 E_0 / (\omega_1 x_c)] \sin\theta = cU_1 \sin\theta / \omega_1 = \text{const.} \quad (2.11)$$

Следовательно, при изменении угла регулирования θ для поддержания неизменным момента M нужно регулировать напряжения U_1 подводимое к двигателю от преобразователя, также как это делается при изменении ω_1 .

Регулирование реактивной мощности. При постоянном напряжении сети результирующий магнитный поток СМ, вызванный МДС статора $F_a = k_1 I_1 W_1$ и МДС ротора $F_0 = k_B i_B W_B$, также постоянен. Поэтому при увеличении тока возбуждения I_B уменьшается величина тока I_1 , являющегося индуктивным и т.о. увеличивается коэффициент мощности. При некотором токе I_B ток становится чисто активным $\cos\varphi = 1$. Дальнейший рост тока возбуждения приводит к росту тока, имеющего емкостной характер (ток опережает напряжение U_1). Т.е. включение перевозбужденного СД в сеть равносильно включению емкости в эту сеть. Это явление используется в *синхронном компенсаторе реактивной мощности* и находит отражение в U -образных характеристиках СД, данных на рис.2.13, где кривые 2 и 3 сняты соответственно при увеличении и снижении нагрузки на валу СД.

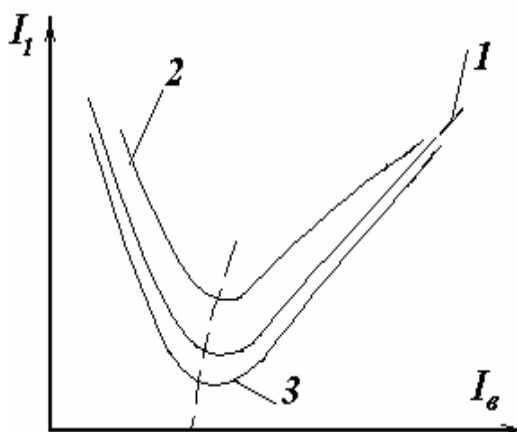


Рис.2.13. U -образные кривые СД

Синхронный компенсатор (СК) представляет собой синхронный двигатель, работающий без нагрузки, поэтому изготавливается облегченной конструкции, что снижает его стоимость по сравнению с синхронными двигателями. Синхронные компенсаторы не имеют выступающего конца вала, поэтому их корпус (станина) может быть легко герметизирован.

Пуск в ход облегчен из-за отсутствия нагрузки на валу и осуществляется теми же способами, что и пуск синхронных двигателей.

Обычно $\cos\varphi_c$ увеличивают до 0,92—0,95, так как экономия, получаемая от повышения $\cos\varphi_c$ до 1, не окупает увеличивающихся расходов. СК применяются также для стабилизации напряжения в сети.

Особенности пуска синхронного двигателя

Недостатком синхронных машин является сложность пуска. При включении

машины в сеть магнитное поле начинает вращаться с синхронной скоростью ω_c , а ротор неподвижен. Вследствие этого угол θ будет непрерывно возрастать, а т.к. $M = M_{\max} \sin \theta$, то средний момент при пуске будет равен нулю. Поэтому при пуске ток возбуждения в ротор не подается. Для получения необходимого пускового момента на роторе размещается пусковая обмотка – беличья клетка, аналогичная клетке АДКЗР или используется пусковой двигатель. После разгона до скорости, близкой к синхронной (около $0,95\omega_c$), в ротор подается постоянный ток и синхронный двигатель втягивается в синхронизм.

Для пуска по схеме рис.2.14,а в цепь ротора включается разрядное сопротивление 5, величина которого в 10-12 раз больше сопротивления обмотки возбуждения 1, т.е. $R=R_{pc}=(10-12)r_b$. Это необходимо для исключения пробоя изоляции, т.к. ЭДС разомкнутой обмотки при $s>0$ велика $E_1=E_0=4,44 \Phi f_2 W_2$. При пуске СД с ОВ замкнутой на сопротивление 5 в ней протекает переменный ток, который создает пульсирующее магнитное поле ротора. При взаимодействии этого поля и тока статора возникает момент $M_{пр}$ (2), изменяющийся от скольжения как асинхронный $M_{ас}$, а также – момент $M_{обр}$ (3), являющийся знакопеременным. Скорость вращения полей относительно статора

$$n_{пр} = n_1; \quad n_{обр} = n_1(1-2s). \quad (2.12)$$

В результате ток, индуцируемый в ОВ СД при пуске создает электромагнитный момент, являющийся при $s>0,5$ ускоряющим, а при большей частоте вращения – тормозящим (рис.2.15). Результирующий момент (4), содержащий асинхронный момент (1) имеет провал, зависящий от тока ОВ, т.е. от $R5$.

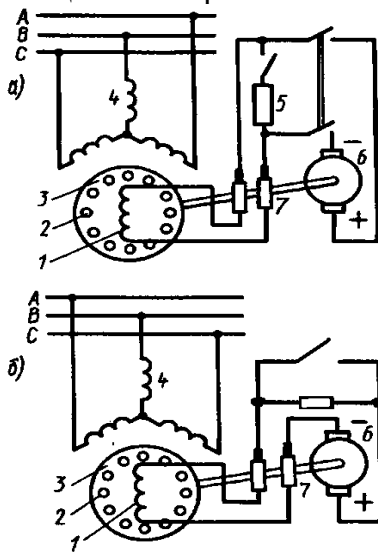


Рис.2.14. Схемы асинхронного пуска СД

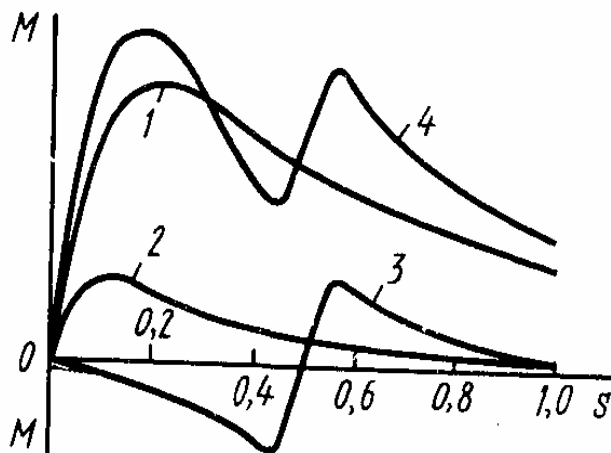


Рис.2.15. Изменение моментов при пуске СД

При разгоне синхронной машины до подсинхронной скорости разрядное сопротивление отключается, и в обмотку подается ток возбуждения.

Во второй схеме (Рис.2.14,б) разрядное сопротивление не только ограничивает ток, наводимый в роторе при работе со скольжением, но также ограничивает и ток возбуждения. При подсинхронной скорости разрядное сопротивление шунтируется, ток возбуждения увеличивается, и двигатель втягивается в синхронизм. Следует отметить, что при пуске без отключения ОВ от возбудителя по якору возбудителя в период пуска проходит переменный ток, что может вызвать искрение щеток. Поэтому такую схему пуска применяют в случае небольшого нагрузочного момента – не более 50% от номинального, при сравнительно небольшой мощности двигателя.

Пуск СМ малой мощности без пусковой обмотки (СГ) возможен под действием $M_{ас}$, создающегося в результате взаимодействия вихревых токов, возникающих в теле ротора и вращающегося магнитного поля статора.

Для снижения пускового тока также используется частотный пуск, когда частоту тока

якоря постепенно увеличивают от 0 до номинальной величины

Пуск в ход синхронного двигателя посредством вспомогательного двигателя (АД). Процесс пуска при этом протекает аналогично процессу включения синхронного генератора на параллельную работу. Ротор возбужденного двигателя приводится во вращение до синхронной скорости и с помощью синхронизирующего устройства подключается к сети. Затем вспомогательный двигатель отключают. Обычно мощность пускового двигателя составляет 5—15% от мощности синхронного двигателя и достаточна для пуска без нагрузки. В противном случае установка получается громоздкой и неэкономичной.

Непосредственное подключение СД возможно в сети переменного тока применяется только при достаточной мощности сети, рассчитанной на асинхронный пуск. Для ограничения пусковых токов применяют пуск двигателя при пониженном напряжении: автотрансформаторный или реакторный пуск.

Достоинства и недостатки СД по сравнению с АД, области применения

Синхронные двигатели имеют следующие достоинства:

а) возможность работы при $\cos\varphi = 1$; это приводит к улучшению $\cos\varphi$ сети, а также к сокращению размеров двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели служат генераторами реактивной мощности, поступающей в асинхронные двигатели, что снижает потребление этой мощности от генераторов электростанций генерирование реактивной мощности.

При перевозбуждении СД дает возможность повышать $\cos\varphi$ в сетях предприятий, разгружать трансформаторы и ЛЭП от реактивной мощности, т.е. улучшить технико-экономические показатели энергопотребления;

б) меньшую чувствительность к колебаниям напряжения, так как их максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени $M_{\max} = m_1 U_1 E_0 / (\omega_1 x_c)$ (а не квадрату напряжения);

в) строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу. Недостатки синхронных двигателей:

а) сложность конструкции;

б) сравнительная сложность пуска в ход (из-за отсутствия пускового момента), связанная с необходимостью размещения на роторе *асинхронной пусковой обмотки* (БК) и включением в цепь *ОВ* сопротивления $R=10 R_{ОВ}$;

в) трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей делают их менее выгодными, чем асинхронные двигатели, при ограниченных мощностях до 300 кВт. Однако при более высоких мощностях, когда особенно важно иметь высокий $\cos\varphi$ и уменьшенные габаритные размеры машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. М.: Высш. шк., 1990.
2. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2000.