

ЛЕКЦИЯ №13

По дисциплине:

«Электроника и электротехника»

Тема №:8

Электрические машины

Занятие №:8

Синхронные и асинхронные электрические машины

Учебные вопросы:

1. Асинхронные машины.
2. Эквивалентная схема двигателя.
3. Двухфазные и однофазные двигатели. Синхронные машины.
4. Получение синусоидальной ЭДС в синхронном генераторе.
5. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора.

Литература для самостоятельной работы обучающихся:

1. **Иванов, И. И.** Электротехника и основы электроники: учебник. – 9-е изд., стер/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я Фролов. – СПб: Лань, 2017. – 736 с.

2. **Касаткин, А.С.** Электротехника: учебник/ А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 12-е изд. стер. – Москва.: Академия, 2008. – 544 с. – и предыдущие издания.

б) дополнительная литература:

3. **Немцов, М. В.** Электротехника и электроника: учебник/ М. В. Немцов. – Москва: КноРус, 2016. – 560 с. – и предыдущие издания.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Понятие асинхронной машины связано с тем, что ротор ее имеет частоту вращения, отличающуюся от частоты вращения магнитного поля статора.

Буква "а" здесь играет как бы роль отрицания или нестрогого следования ротора за синхронно вращающимся магнитным полем статора.

Создателем этой простой по конструкции, но удобной и надежной в работе машины является русский инженер М.О. Доливо-Добровольский. Асинхронный двигатель, впервые разработанный в 1889 году, практически не подвергся серьезным изменениям до наших дней.

В основу конструкции асинхронного двигателя положено создание системы трехфазного переменного тока принадлежащее этому же автору.

Переменный ток, подаваемый в трехфазную обмотку статора двигателя, формирует в нем вращающееся магнитное поле.

Основными конструктивными элементами асинхронного двигателя являются неподвижный статор и подвижный ротор (рис. 5.1.1). Статор и ротор разделены воздушным зазором от 0,1 мм до 1,5 мм. Пакет статора с целью уменьшения потерь на вихревые токи набирают из штампованных листов электротехнической стали. На внутренней полости статора имеются пазы, в которые укладываются провода обмотки. Листы статора перед сборкой в пакет изолируют слоем лака или окалины, полученной при их отжиге.

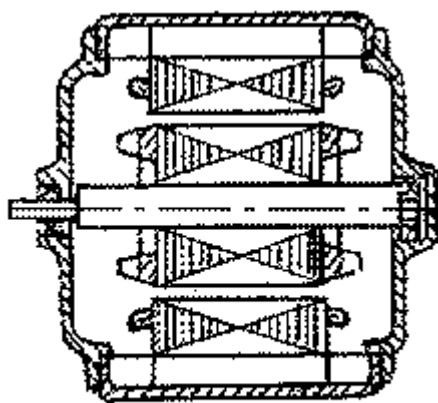


Рис. 5.1.1.
Конструкция асинхронного двигателя

В пазы статора укладывают обмотку, которая в простейшем случае состоит из трех катушек - фаз, сдвинутых в пространстве на 120 эл. градусов. Ротор асинхронного двигателя представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали. На поверхности ротора имеются продольные пазы для обмотки. Листы сердечника ротора специально не изолируют, т.к. в большинстве случаев достаточно изоляции от окалины.

В зависимости от типа обмотки роторы двигателей обычного исполнения делятся на короткозамкнутые и фазные.

Обмотка короткозамкнутого ротора представляет собой медные стержни, забитые в пазы. С двух сторон эти стержни замыкаются кольцами.

Соединения стержней с кольцами осуществляется пайкой или сваркой (рис. 5.1.2).

Чаще всего короткозамкнутую обмотку выполняют расплавленным, алюминием и литьем под давлением. При этом вместе со стержнями и кольцами отливаются и лопатки вентилятора.

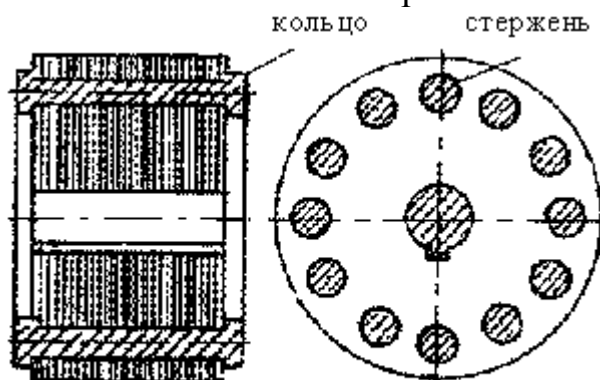


Рис. 5.1.2. Короткозамкнутый ротор.

Двигатели большой мощности имеют на роторе фазную обмотку. Конструкция ее аналогична обмотке статора. Концы этой обмотки выведены на контактные кольца. С помощью этих колец и токосъемных щеток к обмотке ротора подключают дополнительные сопротивления.

5.2. ПРИНЦИП ОБРАЗОВАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАШИНЫ

На статоре трехфазного двигателя расположены 3 обмотки (фазы), которые смещены в пространстве по отношению друг к другу на 120 эл. градусов. Токи, подаваемые в фазные обмотки, отодвинуты друг от друга во времени на 1/3 периода (рис. 5.2.1.).

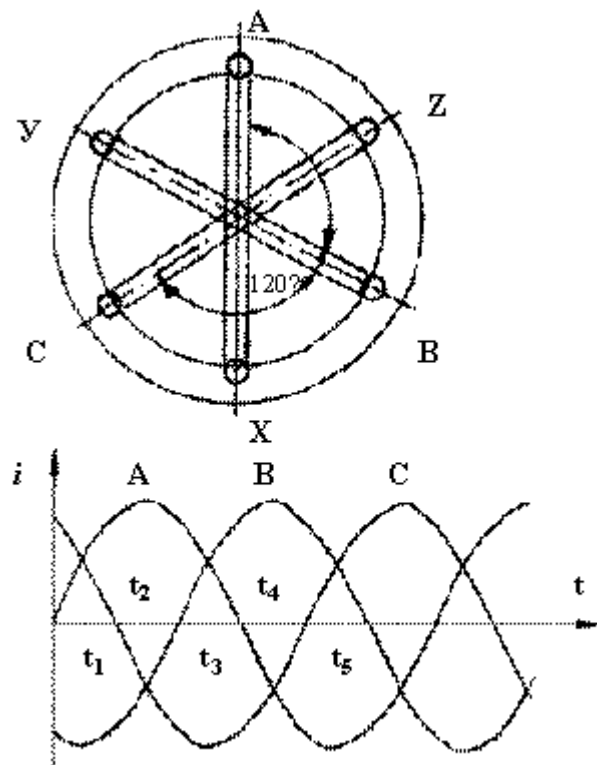
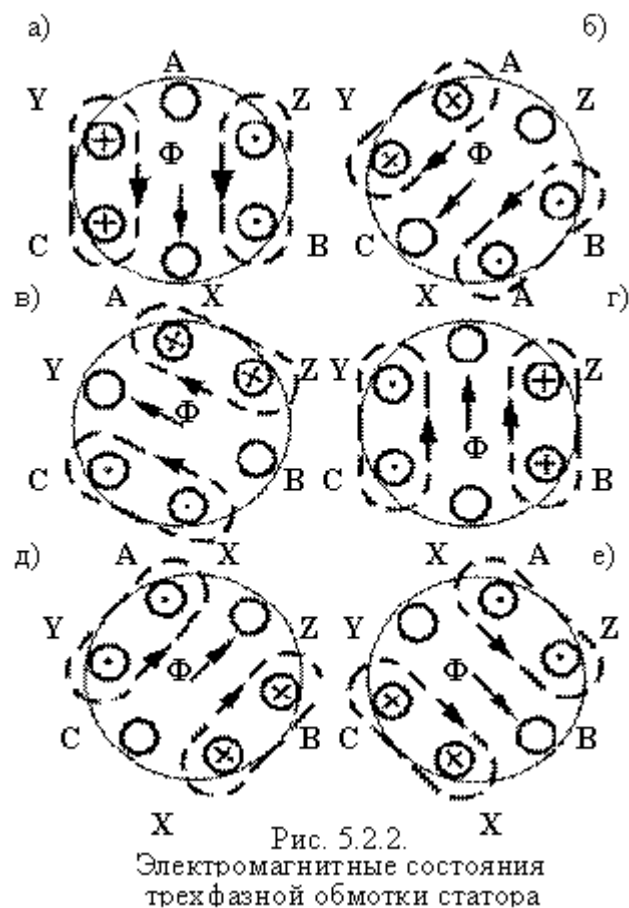


Рис. 5.2.1. Токи в трехфазной обмотке

Используя график изменения трехфазного тока, проставим на нем несколько отметок времени; $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. Наиболее удобными будут отметки, когда один из графиков пересекает ось времени.

Теперь рассмотрим электромагнитное состояние обмоток статора в каждые из принятых, моментов времени.

Рассмотрим вначале точку t_1 . Ток в фазе А равен нулю, в фазе С он будет положительным - (+), а в фазе В - отрицательным (-) (рис. 5.2.2, а).



Поскольку каждая фазная обмотка имеет замкнутую форму, то конец фазной обмотки В-У будет иметь противоположный знак, т.е. У - (+), а конец Z обмотки С-Z - (·).

Известно, что вокруг проводника с током всегда образуется магнитное поле. Направление его определяется правилом правоходового винта ("буравчика").

Проведем силовую магнитную линию вокруг проводников С и У и, соответственно, В и Z (см. штриховые линии на рис. 5.2.2 а).

Рассмотрим теперь момент времени t_2 . В это время тока в фазе В не будет. В проводнике А фазы А-Х он будет иметь знак (+), а в проводнике С фазы С-Z он будет иметь знак (·). Теперь проставим знаки: в проводнике Х - (·), а в проводнике Z - (+).

Проведем силовые линии магнитного поля в момент времени t_2 (рис. 5.2.2,б). Заметим при этом, что вектор $\vec{\Phi}$ совершил поворот.

Аналогичным образом проведем анализ электромагнитного состояния в фазных обмотках статора в момент времени t_3, \dots, t_n (рис. 5.2.2, в, г, д).

Из рисунков 5.2.2 наглядно видно, что магнитное поле в обмотках и его поток Φ совершают круговое вращение.

Частота вращения магнитного поля статора определяется следующей формулой:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

где f - частота тока питающей сети, Гц; p - число пар полюсов.

Если принять $f=50$ Гц, то для различных чисел пар полюсов ($p=1, 2, 3, 4, \dots$) $n_1=3000, 1500, 1000, 750$, об/мин.

5.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как роторная обмотка замкнута, то в проводниках ее возникают токи. Ток каждого проводника, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитную силу - $F_{эм}$. Совокупность сил всех проводников обмотки создает электромагнитный момент M , который приводит ротор во вращение в направлении вращающего поля.

Частота вращения ротора n_2 будет всегда меньше синхронной частоты n_1 , т.е. ротор всегда отстает от поля статора. Поясним это следующим образом. Пусть ротор вращается с частотой n_2 равной частоте вращающегося поля статора n_1 . В этом случае поле не будет пересекать проводники роторной обмотки. Следовательно, в них не будет наводиться ЭДС и не будет токов, а это значит, что вращающий момент $M = 0$. Таким образом, ротор асинхронного двигателя принципиально не может вращаться синхронно с полем статора. Разность между частотами поля статора n_1 и ротора n_2 называется частотой скольжения Δn .

$$\Delta n = n_1 - n_2.$$

Отношение частоты скольжения к частоте поля называется скольжением:

$$S = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad .*)$$

В общем случае скольжение в асинхронном двигателе может изменяться от нуля до единицы. Однако номинальное скольжение S_n обычно составляет от 0,01 до 0,1 %. Преобразуя выражение *), получим выражение частоты вращения ротора:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60f}{p}(1 - S)$$

Обмотка ротора асинхронного двигателя электрически не связана с обмоткой статора. В этом отношении двигатель подобен трансформатору, в котором обмотка статора является первичной обмоткой, а обмотка ротора - вторичной. Разница состоит в том, что ЭДС в обмотках трансформатора наводится неизменяющимся во времени магнитным потоком, а ЭДС в обмотках двигателя - потоком постоянным по величине, но вращающимся в пространстве. Эффект в том и в другом случаях будет одинаковым. В отличие от вторичной обмотки трансформатора, неподвижной, обмотка ротора двигателя вместе с ним вращается.

ЭДС роторной обмотки, в свою очередь, зависит от частоты вращения ротора. В этом нетрудно убедиться, анализируя процессы, протекающие в асинхронном двигателе.

Синхронная частота вращения магнитного поля статора перемещается относительно ротора с частотой скольжения s . Она же наводит в обмотке ротора ЭДС E_2 , частота которой f_2 связана со скольжением S :

$$f_2 = f_1 S$$

Учитывая, что $f_1 = pn_1/60$, $f_2 = pn_1 S/60$.

Приняв величину номинального скольжения порядка 0,01-0,1, можно подсчитать частоту изменения ЭДС в роторной обмотке, которая составляет 0,5-5 Гц (при $f_1 = 50$ Гц).

5.4. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ЭДС АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При подключении обмотки статора к сети возникают токи I_1 , создающие вращающийся магнитный поток Φ . Большая часть магнитного потока сцепляется с обмотками ротора и статора. Это будет основной поток обмотки статора. Некоторая часть магнитного потока рассеивается в пространстве. Назовем его потоком рассеяния Φ_{pc} . Он сцепляется только с витками собственной обмотки.

Основной магнитный поток асинхронного двигателя, вращаясь в пространстве, пересекает обмотку статора со скоростью n_1 и обмотку ротора со скоростью n_2 , наводя в них основные ЭДС:

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi W_1 k_1 \cdot 10^{-8}; \quad E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi W_2 k_2 \cdot 10^{-8}$$

где $W_1 k_1$ и $W_2 k_2$ - произведения чисел витков на обмоточные коэффициенты; $E_{2s} = E_2 S$.

Потоки рассеяния Φ_{pc1} Φ_{pc2} наводят в обмотках ЭДС рассеяния E_{p1} и E_{p2} , которые, как в трансформаторе, могут быть выражены через соответствующие токи I_1 и I_2 и индуктивные сопротивления x_1 и x_{2s} .

$$E_{p1} = j I_1 x_1; \quad E_{p2} = j I_2 x_{2s}$$

где x_1 и x_{2s} - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора.

Помимо названных выше ЭДС, в обмотках статора и ротора имеют место активные падения напряжения, которые компенсируются соответствующими ЭДС E_{r1} и E_{r2} .

5.5. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассуждая аналогично пункту 4.3 составим основные уравнения асинхронного двигателя.

Напряжение U_1 , приложенное к фазе обмотки статора, уравнивается основной ЭДС E_1 , ЭДС рассеяния и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора.

$$U_1 = (-E_1) + I_1 x_1 + I_1 r_1$$

В роторной обмотке аналогичное уравнение будет иметь вид:

$$U_2 = E_{2s} + j I_2 x_{2s} + I_2 r_2$$

Но т.к. роторная обмотка замкнута, то напряжение $U_2=0$, и если учесть еще, что $E_{2s}=SE_2$ и $x_{2s}=Sx_2$, то уравнение можно переписать в виде:

$$0 = E_2 - jI_2x_2 - I_2 \frac{r_2}{S}$$

Уравнение токов асинхронного двигателя повторяет аналогичное уравнение трансформатора:

$$I_1 = I_{01} + (-I_2'),$$

где

$$I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

5.6. ПРИВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ РОТОРА К ОБМОТКЕ СТАТОРА

Для того чтобы параметры ротора и статора изобразить на одной векторной диаграмме, произведем приведение параметров обмотки ротора к параметрам обмотки статора. При этом обмотку ротора с числом фаз m_2 , обмоточным коэффициентом k_2 и числом витков W_2 заменяют обмоткой с $m_1 \times k_1 \times W_1$, соблюдая при этом энергетический баланс в роторе.

Не останавливаясь на методике приведения параметров, которая повторяется из раздела "трансформаторы", перепишем основные уравнения приведенного асинхронного двигателя:

1. $U_1 = (-E_1) + jI_1x_1 + I_1r_1$
2. $0 = E_2' - jI_2'x_2' - I_2' \frac{r_2'}{S}$
3. $I_1 = I_{10} + (-I_2')$

5.7. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Используя принципы построения векторной диаграммы для трансформатора, построим ее для асинхронного двигателя.

Вначале во втором основном уравнении величину r_2' представим в виде:

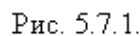
$$r_2' = r_2' + r_2' \frac{1-S}{S},$$

что математически не противоречит друг другу.

Тогда само уравнение можно переписать:

$$0 = E_2' - jI_2'x_2' - I_2' \frac{r_2'}{S} - I_2'r_2' \frac{1-S}{S}$$

Используя три основных уравнения двигателя, построим векторную диаграмму, которая, будет несколько напоминать диаграмму трансформатора (рис. 5.7.1).



Вторичное напряжение определяется вектором:

иначе говоря, асинхронный двигатель в электрическом отношении работает как трансформатор при активной нагрузке.

Мощность, отдаваемая вторичной обмоткой данного трансформатора

представляет собой полную механическую мощность, развиваемую двигателем.

5.8. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Уравнениям ЭДС и токов соответствует эквивалентная схема замещения (рис. 5.8.1.). Таким образом, сложную магнитную цепь электрической машины можно заменить электрической схемой. Сопротивление $r_2'(1 - S)/S$ можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку ротора. Оно является единственным переменным параметром схемы. Изменение этого сопротивления эквивалентно изменению нагрузки на валу двигателя, а следовательно, изменению скольжения S .

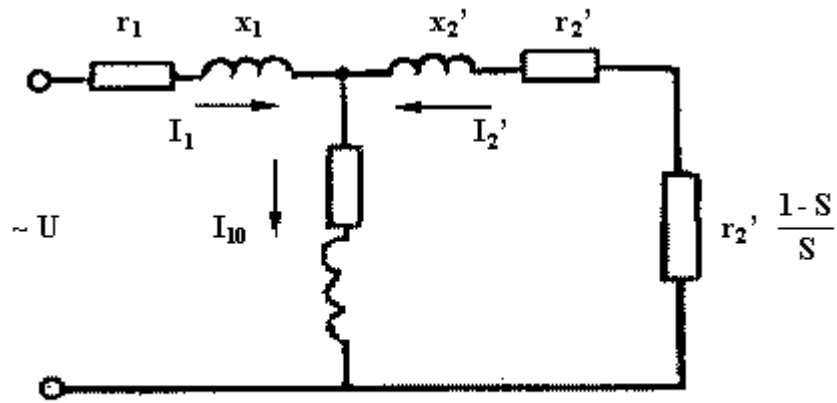


Рис. 5.8.1.

Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя

5.9. ПОТЕРИ И КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В обмотку статора из сети поступает мощность P_1 . Часть этой мощности идет на потери в стали P_{cl} , а также потери в обмотке статора P_{s1} :

$$P_{s1} = m_1 I_1^2 r_1$$

Оставшаяся мощность посредством магнитного потока передается на ротор и называется электромагнитной мощностью:

$$P_{эм} = P_1 (P_{cl} + P_{s1})$$

Часть электромагнитной мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в обмотке ротора:

$$P_{s2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_2 I_2^2 r_2'$$

Оставшаяся мощность преобразуется в механическую, получившую название полной механической мощности:

$$P_2' = P_{эм} - P_{s2}$$

Воспользовавшись ранее полученной формулой

$$P_2' = m_1 I_2^2 r_2' \frac{1-s}{s}$$

запишем выражение полной механической мощности:

$$P_2' = m_1 I_2^2 r_2' \frac{1-s}{s} = P_{s2} \frac{1-s}{s}$$

тогда

$$P_{s2} \frac{1-s}{s} = P_{эм} - P_{s2}$$

или

$$P_{s2} = s P_{эм},$$

т.е. мощность электрических потерь пропорциональна скольжению.

Мощность на валу двигателя P_2 меньше полной механической мощности P_2' на величину механических $P_{мех}$ и добавочных $P_{доб}$ потерь:

$$P_2 = P_2' - (P_{мех} + P_{доб}).$$

Таким образом:

$$P_2 = P_1 - SP,$$

где

$$SP = P_{cl} + P_{\omega l} + P_{\omega 2} + P_{\text{мех.}} + P_{\text{доб.}}$$

Коэффициент полезного действия есть отношение мощности на валу P_2 к потребляемой мощности P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$$

5.10. УРАВНЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

Вращающий момент в асинхронном двигателе создается взаимодействием тока ротора с магнитным полем машины. Вращающий момент математически можно выразить через электромагнитную мощность машины:

$$M_1 = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1},$$

где $\omega_1 = 2\pi n_1 / 60$ - угловая частота вращения поля.

В свою очередь, $n_1 = f_1 60 / P$, тогда

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1 60}{60 P} = \frac{2\pi f_1}{P}.$$

Подставим в формулу M_1 выражение $P_{\text{эм}} = P_{\omega 2} / S$ и, разделив на 9,81, получим:

$$M_1 = \frac{P_{\omega 2}}{9,81 \omega_1 S} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{9,81 \omega_1 S} \quad \text{кГм},$$

Отсюда следует, что момент двигателя пропорционален электрическим потерям в роторе. Подставим в последнюю формулу значение тока I_2' :

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{[(r_1' + r_2' + r_2' (1-S)/S)]^2 + (x_1 + x_2')^2}},$$

получим

$$M_1 = \frac{m_1 P U_1^2 (r_2' / S)}{9,81 2\pi f [(r_1' + r_2' / S)]^2 + (x_1 + x_2')^2},$$

где U_1 - фазное напряжение обмотки статора.

5.11. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В последнем выражении для M_1 единственным переменным параметром является скольжение S . Зависимость $M = f(S)$ получило название механической характеристики двигателя (рис. 5.11.1).

В момент пуска двигателя, когда $n_2 = 0$, скольжение $S = 1$, тогда:

$$M_{\pi} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{9,81 \cdot 2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Под действием момента M_{π} ротор придет во вращение. В дальнейшем скольжение будет уменьшаться, а вращающий момент увеличиваться. При скольжении $S_{кр}$ он достигает максимального значения M_{\max} . Величина критического скольжения

$$S_k = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}.$$

Тогда, подставив его значение в формулу для M , получим:

$$M_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{9,81 \cdot 4\pi f_1 [(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2})^2]}.$$

Дальнейший разгон двигателя будет сопровождаться уменьшением скольжения и, вместе с тем уменьшением вращающего момента. Равновесие наступит, когда величине вращающего момента будет противостоять тормозной момент, вызванный нагрузкой.

При номинальной нагрузке будут номинальный вращающий момент M_H и номинальное скольжение S_H .

Отношение максимального момента к номинальному называется перегрузочной способностью двигателя.

$$K = \frac{M_{\max}}{M_H}.$$

Обычно она составляет величину от 1,7 до 2,5.

Отношение пускового момента к номинальному называется кратностью пускового момента

$$K_{п.м.} = \frac{M_{\Pi}}{M_H}.$$

Эта величина может быть меньше единицы (например, 0,8) и больше ее (до 1,2). При меньшей кратности двигатель следует включать в работу без нагрузки, и лишь после разгона подается нагрузка. Двигатель с кратностью $K_{п.м.} > 1$ можно включать в сеть с полной нагрузкой.

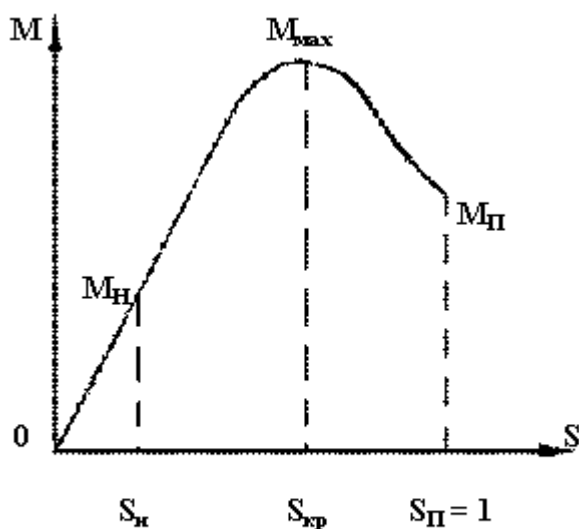


Рис. 5.11.1.

Механическая характеристика
асинхронного двигателя

5.12. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эти характеристики снимаются экспериментально и представляют собой зависимость I_1 , M_2 , n_2 , $\cos \varphi$, η от нагрузки на валу двигателя P_2 .

Примерный вид характеристик приведен на рис. 5.12.1.

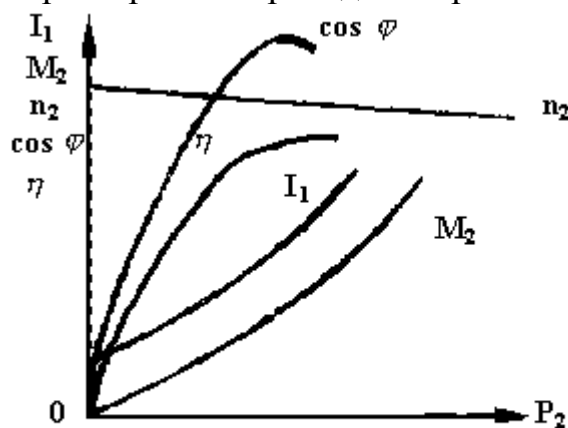


Рис. 5.12.1.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

5.13. ПУСК, РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.

На практике замечено, что ток, потребляемый обмоткой статора в первый момент пуска двигателя, очень большой. В ряде случаев он превышает номинальный ток в 6 - 10 раз.

Такой нагрузки может не выдержать не только питающая сеть, но и сама обмотка статора. Поэтому для пуска крупных асинхронных двигателей применяют специальные устройства, снижающие пусковой ток. На рис. 5.13.1. показаны схемы пуска мощных двигателей с помощью реакторов и автотрансформатора.

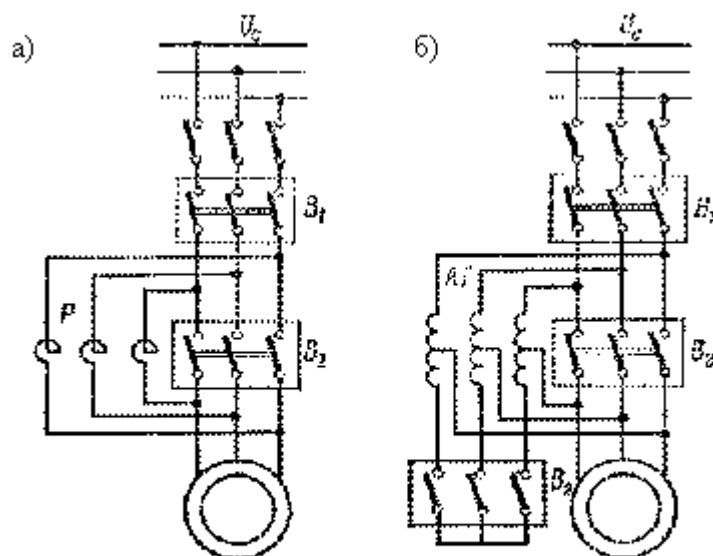


Рис. 5.13.1. Способы пуска асинхронного двигателя
а) реакторный, б) автотрансформаторный

Принцип ограничения тока заключается в том, что к статорной обмотке двигателя на период пуска подводится пониженное напряжение. После разгона его дополнительные устройства от двигателя отключаются.

Иногда для снижения напряжения, подаваемого в обмотки статора, изменяют схему переключения обмоток. Например, асинхронный двигатель нормально работает по схеме "треугольник". Если на период пуска его обмотки включить "звездой", то на каждую фазу придется напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше.

Двигатели с фазным ротором пускаются в работу с помощью дополнительных сопротивлений. Вводя дополнительные сопротивления в цепь ротора, добиваются ограничения пускового тока.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя определяется формулой:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60f}{p}(1 - S)$$

Здесь возможны три различных способа реализации:

Первый заключается в изменении частоты тока f , подаваемого в обмотки двигателя. Этот способ позволяет осуществлять плавное регулирование частоты вращения двигателя. Регуляторы частоты тока пока еще очень дороги, поэтому они мало применяются.

Второй способ связан с изменением пар полюсов p на статоре.

Укладывая на статоре несколько обмоток, рассчитанных на различные числа пар полюсов ($p=1,2,3,4$), можно обеспечить различные частоты вращения магнитного поля (соответственно: 3000, 1500, 1000, 750 об/мин). Подключение к сети необходимой обмотки производится специальным переключателем.

Этот способ регулирования ступенчатый, но в ряде металлообрабатывающих станков он нашел самое широкое применение (например, для привода продольно-строгального станка при рабочем и обратном ходе).

Третий способ регулирования частоты вращения возможен лишь для двигателей с фазным ротором. Здесь изменение скольжения S достигается введением в цепь ротора регулировочных сопротивлений. Такие схемы широко используются на грузоподъемных кранах.

К категории регулирования вращения вала двигателя относится так называемое реверсирование, т.е. изменение направления вращения на обратное. Осуществляется оно путем изменения порядка чередования фаз обмотки статора. На рис. 5.13.2. показана схема изменения направления вращения вала двигателя.

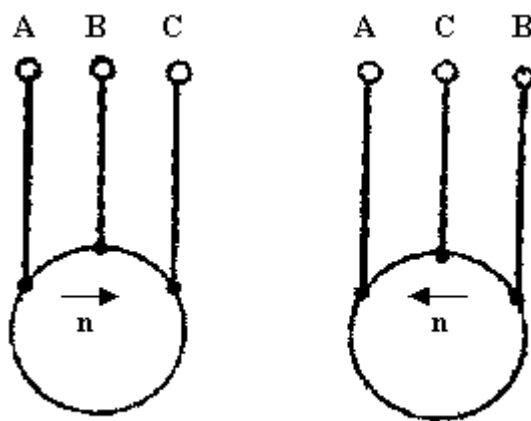


Рис. 5.13.2. Реверсирование двигателя

Торможение асинхронного двигателя может быть механическим и электрическим.

К механическим относятся торможения муфтами, электромагнитными лентами, колодками и т.д.

Иногда применяют электродинамическое торможение, когда после отключения двигателя от сети переменного тока в его обмотки подается постоянный ток. В этом случае постоянное магнитное поле заметно сокращает выбег ротора.

Чаще используется торможение "противовыключением". После отключения двигателя от сети его кратковременно включают на вращение в обратную сторону. Как только оставшаяся частота вращения ротора n_2 станет равной нулю, двигатель отключается от сети.

5.14. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Статор однофазного двигателя имеет однофазную обмотку, которая занимает $2/3$ общего числа пазов статора. Ротор - коротко-замкнутый.

При подключении к сети однофазная статорная обмотка создает не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток с амплитудой Φ . Этот поток может быть искусственно разложен на два вращающихся потока Φ_1 и

Φ_{II} , каждый из которых равен $\Phi/2$. Обозначим Φ_I прямым потоком, а Φ_{II} - обратным. Частота вращения каждого потока - $n_{II}=n_{I\bar{II}}=n_I$.

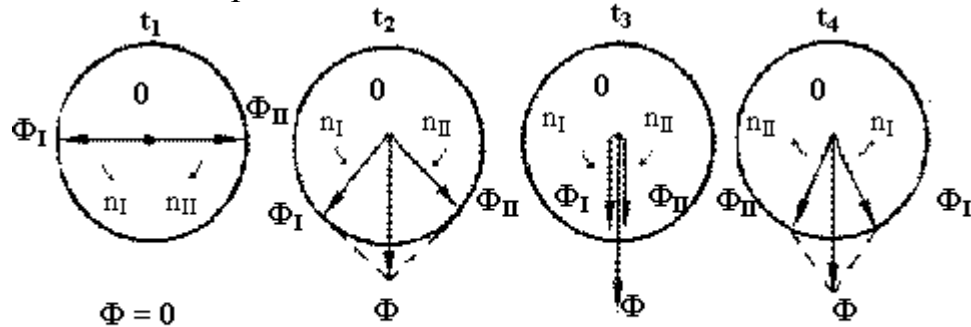


Рис. 5.14.1. Разложение пульсирующего магнитного потока на два вращающихся

Предположим, что ротор двигателя уже вращается в направлении прямого потока. Тогда скольжение двигателя относительно прямого потока Φ_I равно:

$$S_I = \frac{n_{II} - n_2}{n_{II}},$$

а относительно обратного потока:

$$S_{II} = \frac{n_{I\bar{II}} - n_2}{n_{I\bar{II}}}.$$

Потоки Φ_I и Φ_{II} наводят в обмотке ротора ЭДС E_{2I} и E_{2II} , которые создают токи I_{2I} и I_{2II} . Известно, что частота тока в обмотке ротора пропорциональна скольжению $f_2 = S f_1$. Т.к. $S_{II} > S_I$, то ток, наведенный обратным полем, имеет частоту намного больше частоты, наведенной в обмотке ротора прямым полем $f_{2II} > f_{2I}$.

Пусть $n_1 = 1500$ об/мин, $n_2 = 1450$ об/мин, $f_1 = 50$ Гц, тогда:

$$S_I = (1500 - 1450) / 1500 = 0,03 \quad f_{2I} = 50 \times 0,03 = 1,5 \text{ Гц}$$

$$S_{II} = (1500 + 1450) / 1500 = 1,96 \quad f_{2II} = 50 \times 1,96 = 98 \text{ Гц}$$

Нам также известно, что индуктивное сопротивление роторной обмотки x_2 зависит от частоты f_2 :

$$x_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2$$

Поскольку $f_{2I} \ll f_{2II}$, то и сопротивление $x_{2I} \ll x_{2II}$

Переходя к токам I_2 , которые, как известно, обратно пропорциональны сопротивлениям x_2 , можно записать: $I_{2I} \gg I_{2II}$.

Вращающиеся моменты двигателя пропорциональны магнитным потокам статора и токам в обмотке ротора. ($M \sim \Phi I_2$).

Исходя из значений токов I_{2I} и I_{2II} и учитывая, что $\Phi_I = \Phi_{II}$ можно записать:

$$M_I \gg M_{II}.$$

Следовательно, если ротор двигателя уже вращается в сторону прямого потока, то он будет продолжать вращаться в этом направлении. Тормозящее воздействие M_{II} не будет оказывать заметного влияния на работу двигателя.

Вспомним, что мы условно предполагали вращение ротора в сторону прямого потока Φ_I . А если бы он вращался вначале в сторону обратного потока Φ_{II} ?

Тогда, проведя аналогичные рассуждения, можно заключить, что ротор будет устойчиво вращаться в сторону обратного потока. Рассмотрим механическую характеристику однофазного двигателя (рис. 5.14.2).

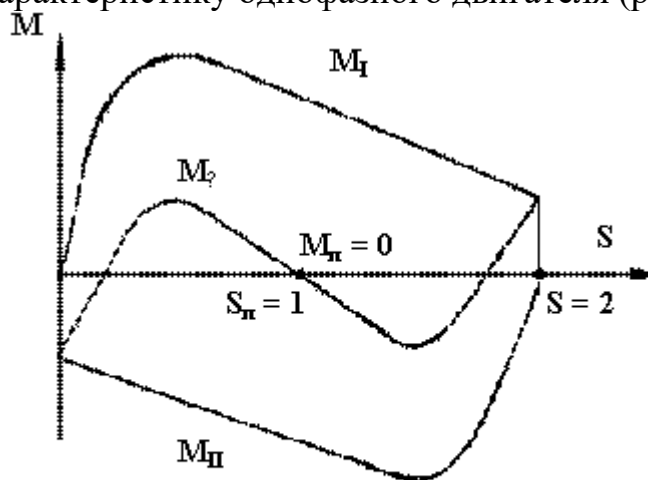


Рис. 5.14.2.
Механическая характеристика
однофазного двигателя

Из характеристики $M=f(S)$ видно, что при пуске, когда $S=1$, пусковой момент $M_{\pi}=0$. Двигатель при включении его в сеть сам не начнет вращаться. Необходим его сдвиг в ту или иную сторону.

Если сдвинуть точку M_{π} влево от $S=1$, то момент будет положительным, если вправо - отрицательным.

Другими словами, направление устойчивого вращения ротора двигателя будет зависеть от направления первоначального импульса.

Проведенный анализ показал, что однофазный двигатель нуждается в принудительном пуске.

Пусковые устройства могут быть механическими (пуск от руки) и электрическими.

Первый способ пуска практически выжил себя, и на его смену пришел второй - электрический.

Для создания необходимого пускового момента однофазный двигатель снабжается дополнительной пусковой обмоткой. Эта обмотка размещается в оставшейся незаполненной $1/3$ пазов.

Однофазный двигатель, таким образом, превратился в двухфазный. Двухфазный двигатель обладает вращающимся магнитным полем, если выполнены два обязательных условия.

Первое условие состоит в пространственном сдвиге рабочей и пусковой обмоток на 90 эл. градусов. Такое условие, легко реализуется на заводе-изготовителе.

Второе обязательное условие диктуется сдвигом по фазе тока в пусковой обмотке на 90° относительно тока в рабочей обмотке. Выполнение этого условия связано с включением в пусковую обмотку фазосдвигающего элемента, например, конденсатора (рис. 5.14.3).

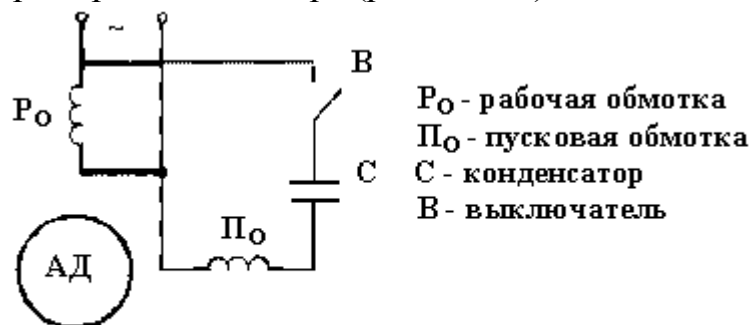


Рис. 5.14.3. Схема включения однофазного двигателя

После того как ротор двигателя придет во вращение, пусковую обмотку Π_0 отключают. Делается это с помощью выключателя B . Иногда в бытовой технике отключение пусковой обмотки производится автоматически по ходу разгона двигателя.

5.15. ДВУХФАЗНЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Двухфазный конденсаторный двигатель имеет на статоре две обмотки $ОВ$ и $ОУ$, рассчитанные на длительное протекание тока. Обмотки располагаются в пространстве под углом 90 эл. градусов), а последовательно одной из них включают конденсатор C .

Двухфазный конденсаторный двигатель переменного тока обладает вращающимся магнитным полем (правда, не круговым, а эллиптическим). Поэтому он не нуждается в специальных пусковых устройствах (рис. 5.15 1.).

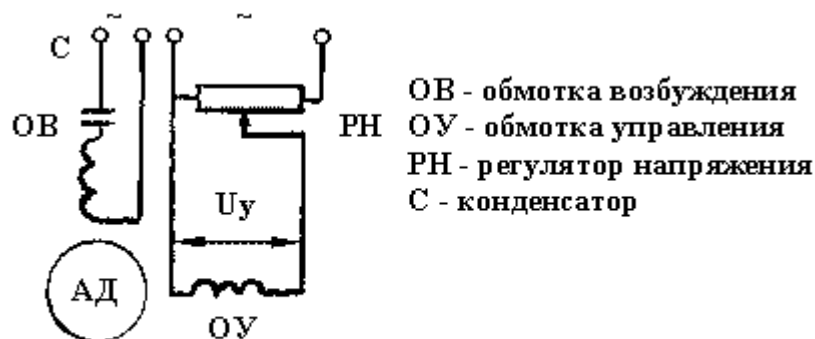


Рис. 5.15.1. Схема включения двухфазного двигателя

Двухфазный асинхронный двигатель, в отличие от трехфазного, имеет возможность плавного регулирования частоты вращения ротора.

Делается это одним из двух способов: амплитудным (изменением напряжения U_y) и фазным (изменением емкости конденсатора C).

Двухфазные двигатели получили широкое распространение в бытовых приборах и лабораторной практике.

В отличие от рассмотренных выше типов двигателей, интересен двигатель с полым ротором. Он имеет два статора, между которыми располагается ротор (рис. 5.15.2.).

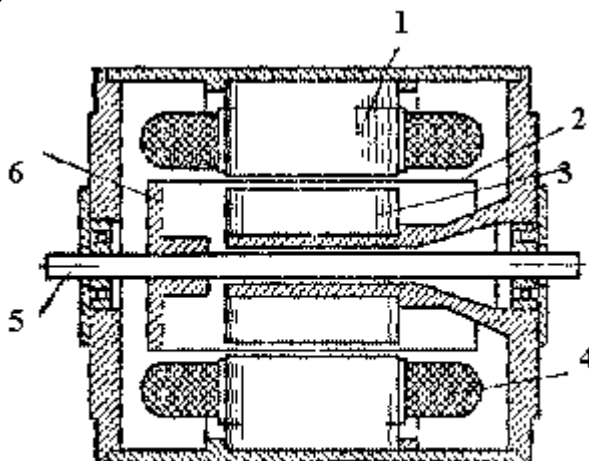


Рис. 5.15.2. Двигатель с полым ротором

Наружный статор 1 имеет обычно конструкцию с двухфазной обмоткой 4. Фазные обмотки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 90° . Внутренний статор 3 представляет собой пакет электротехнической стали без обмотки. В воздушном зазоре между статорами помещен ротор двигателя 2, который не имеет обмотки и выполнен в виде стакана с тонкими стенками из немагнитного материала (алюминия). Посредством втулки 6 ротор укреплен на валу двигателя 5. Такая конструкция обеспечивает ему незначительную инерцию и делает двигатель чувствительным даже к небольшим импульсам (сигналам) тока. Этому также способствует наличие второго статора, который уменьшает сопротивление магнитной цепи. Одна из фаз обмоток статора включается на напряжение сети U_c , другая является управляющей обмоткой. Когда напряжение на ней отсутствует, ротор неподвижен. С появлением управляющего сигнала U_y достаточной величины статор создает двухфазное вращающееся поле, и двигатель развивает вращающий момент, величина которого пропорциональна U_c .

Работа этого двигателя основана на взаимодействии магнитного поля статора с вихревыми токами, наведенными на поверхность полого ротора.

Машины с полым ротором весьма чувствительны к изменениям напряжения сигнала и его продолжительности, что дает возможность применять их в качестве исполнительных двигателей.

5.16. ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЯВНО ВЫРАЖЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Для создания вращающего момента в однофазных асинхронных двигателях иногда применяют конструкцию с явно выраженными полюсами и однофазной обмоткой. Полюса 1 (рис. 5.16.1) имеют расщепленную

конструкцию, причем на одну из половинок каждого полюса надет короткозамкнутый виток в виде медного кольца 2. Ротор также короткозамкнутый. При подключении обмотки статора к сети под действием создаваемого ею пульсирующего магнитного потока в витке возникает ток, который препятствует нарастанию потока в этой части полюса.

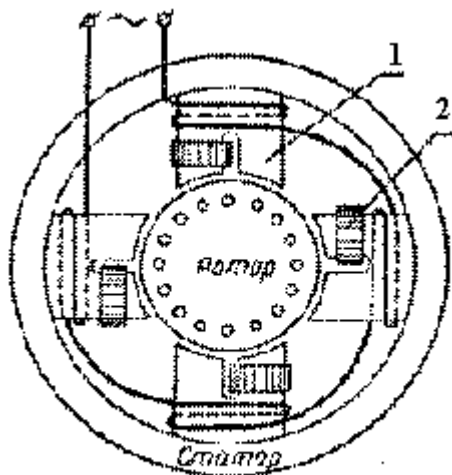


Рис. 5.16.1. Однофазный двигатель с явно выраженными полюсами

В результате потоки в обеих частях каждого полюса оказываются сдвинуты по фазе относительно друг друга, что в свою очередь приводит к образованию в двигателе вращающегося магнитного поля. Однофазные двигатели применяют в некоторых типах вентиляторов, электропроигрывателях и т.д.

5.17. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ ОДНОФАЗНОГО

Очень часто задают вопрос, нельзя ли обычный трехфазный двигатель включить в однофазную сеть переменного тока?

Рассуждения в п.5.14., относящиеся к однофазным двигателям, можно отнести к двигателям с трехфазной обмоткой на статоре. На рис. 5.17.1. показаны четыре различные схемы подключения двигателей.

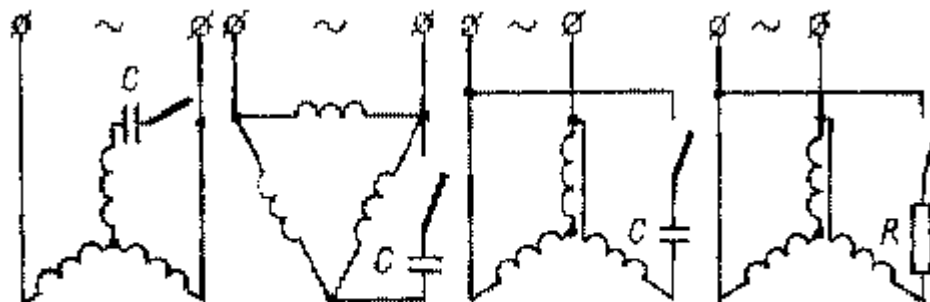


Рис. 5.17.1.
Схемы включения трехфазного двигателя в однофазную сеть

Здесь две статорные обмотки включаются в сеть последовательно, образуя обмотку возбуждения. Третья фазная обмотка является пусковой, поэтому она содержит фазосдвигающий элемент.

Второе обязательное условие для двухфазных двигателей здесь можно выполнить достаточно точно путем правильного подбора конденсатора С. Первое условие здесь выполнено неточно, т.к. пространственный сдвиг между обмотками составляет не 90° , а 120° .

Вследствие этого, двигатель теряет примерно 50-60% своей номинальной мощности.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Статор синхронной машины по конструкции не отличается от статора асинхронного двигателя. В пазах статора размещается трехфазная, двухфазная или однофазная обмотки. Заметное отличие имеет ротор, который принципиально представляет собой постоянный магнит или электромагнит. Это налагает особые требования на геометрическую форму ротора. Любой магнит имеет полюса, число которых может быть два и более. На рис. 6.1.1 приведены две конструкции генераторов, с тихоходным и быстроходным ротором.

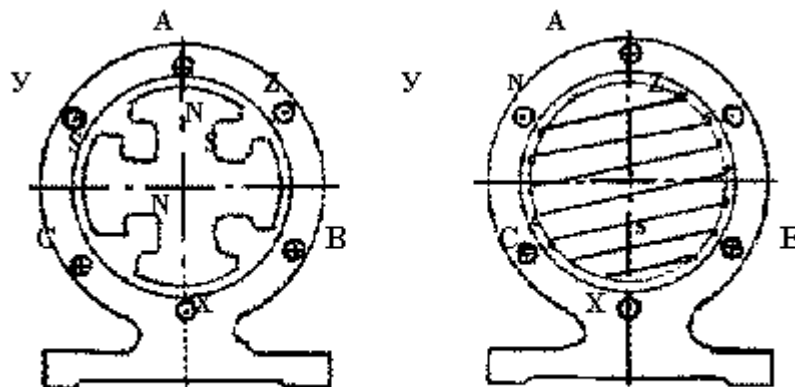


Рис. 6.1.1. Конструкции синхронных генераторов

Быстроходными бывают, как правило, турбогенераторы. Количество пар магнитных полюсов у них равно единице. Чтобы такой генератор вырабатывал электрический ток стандартной частоты $f = 50$ Гц, его необходимо вращать с частотой

$$n = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ об/мин}$$

На гидроэлектростанциях вращение ротора зависит от движения водяного потока. Но и при медленном вращении такой генератор должен вырабатывать электрический ток стандартной частоты $f = 50$ Гц. Поэтому для каждой гидроэлектростанции конструируется свой генератор, на определенное число магнитных полюсов на роторе. В качестве примера приведем параметры синхронного генератора, работающего на Днепровской ГЭС. Водяной поток вращает ротор генератора с частотой $n = 33,3$ об / мин. Задав частотой $f = 50$ Гц, определим число пар полюсов на роторе:

$$p = 60 \cdot f / n = 60 \cdot 50 / 33,3 = 90 \text{ пар}$$

Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Ротор с магнитными полюсами создает вращающееся магнитное поле, которое, пересекая обмотку статора, наводит в ней ЭДС. При подключении к генератору нагрузки генератор будет являться источником переменного тока.

6.2. ЭДС СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Как было показано выше, величина наводимой в обмотке статора ЭДС количественно связана с числом витков обмотки и скорости изменения магнитного потока:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Переходя к действующим значениям, выражение ЭДС можно записать в виде:

$$E = c \cdot n \cdot \Phi,$$

где n - частота вращения ротора генератора,
 Φ - магнитный поток,
 c - постоянный коэффициент.

При подключении нагрузки напряжение на зажимах генератора в разной степени меняется. Так, увеличение активной нагрузки не оказывает заметного влияния на напряжение. В то же время индуктивная и емкостная нагрузки влияют на выходное напряжение генератора. В первом случае рост нагрузки размагничивает генератор и снижает напряжение, во втором происходит его подмагничивание и повышение напряжения. Такое явление называется реакцией якоря.

Для обеспечения стабильности выходного напряжения генератора необходимо регулировать магнитный поток. При его ослаблении машину надо *подмагнитить*, при увеличении - *размагнитить*. Делается это путем регулирования тока, подаваемого в обмотку возбуждения ротора генератора.

6.3. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

6.3.1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

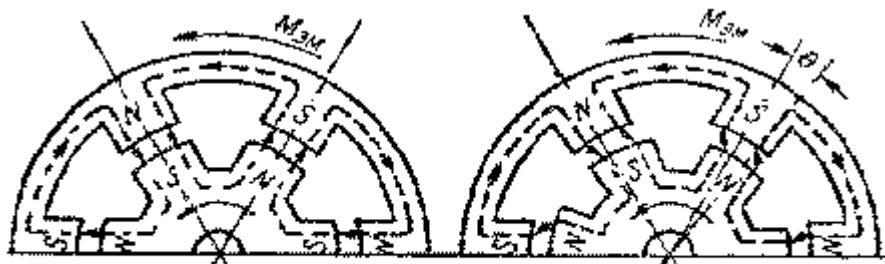
Конструкция синхронного двигателя такая же, как и у синхронного генератора.

При подаче тока в трехфазную обмотку статора в нем возникает вращающееся магнитное поле. Частота вращения его определяется формулой:

$$n = \frac{60 f}{p},$$

где f - частота тока питающей сети,
 p - число пар полюсов на статоре.
 Ротор, являющийся часто электромагнитом, будет строго следовать за вращающимся магнитным полем, т.е. его частота вращения $n_2 = n_1$.

Рассмотрим принцип действия синхронного двигателя на следующей условной модели (рис. 6.3.1.). Пусть магнитное поле статора будет смоделировано системой вращающихся магнитных полюсов N - S.



6.31 Принцип действия синхронного двигателя

Ротор двигателя тоже представляет собой систему электромагнитов S - N, которые "сцеплены" с полюсами на статоре. Если нагрузка на двигателе отсутствует, то оси полюсов статора будут совпадать с осями полюсов ротора ($\theta = 0$). Если же к ротору подключена механическая нагрузка, то оси полюсов статора и ротора могут расходиться на некоторый угол θ . Однако "магнитное сцепление" ротора со статором будет продолжаться, и частота вращения ротора будет равна синхронной частоте статора ($n_2 = n_1$). При больших значениях ротор может выйти из "сцепления" и двигатель остановится.

Главное преимущество синхронного двигателя перед асинхронным - это обеспечение синхронной скорости вращения ротора при значительных колебаниях нагрузки.

6.3.2. СИСТЕМА ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Как мы показали выше, синхронное вращение ротора обеспечивается "магнитным сцеплением" полюсов ротора с вращающимся магнитным полем статора.

В первый момент пуска двигателя вращающееся магнитное поле статора возникает практически мгновенно. Ротор же, обладая значительной инерционной массой, прийти в синхронное вращение сразу не сможет. Его надо "разогнать" до подсинхронной скорости каким-то дополнительным устройством.

Долгое время роль разгонного двигателя играл обычный асинхронный двигатель, механически соединенный с синхронным. Ротор синхронного двигателя приводится во вращение до подсинхронной скорости. Далее двигатель сам втягивается в синхронизм. Обычно мощность пускового двигателя составляет 5-15 % от мощности синхронного двигателя. Это позволяет пускать в ход синхронный двигатель только вхолостую или при малой нагрузке на валу. Применение пускового двигателя мощностью, достаточной для пуска синхронного двигателя под нагрузкой делает такую установку громоздкой

и

дорогой.

В последнее время используется так называемая *система асинхронного пуска* синхронных двигателей. С этой целью в полюсные наконечники забивают стержни, напоминающие собою короткозамкнутую обмотку асинхронного двигателя (рис. 6.3.2.1).

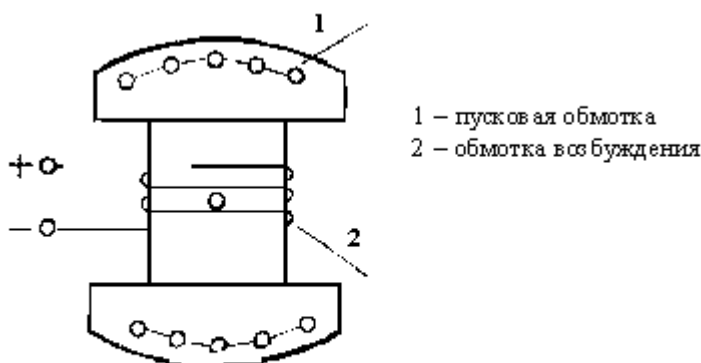


Рис. 6.3.2.1. Ротор синхронного двигателя с пусковой обмоткой

В начальный период пуска синхронный двигатель работает как асинхронный, а в последующем - как синхронный. В целях безопасности обмотку возбуждения в начальном периоде пуска закорачивают, а на заключительном подключают к источнику постоянного тока.

6.4. РЕАКТИВНЫЙ СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В лабораторной практике, в быту и в маломощных механизмах применяют так называемые *реактивные синхронные двигатели*. От обычных классических машин они отличаются лишь конструкцией ротора. Ротор здесь не является магнитом или электромагнитом, хотя по форме напоминает собой полюсную систему. Принцип действия реактивного синхронного двигателя отличен от рассмотренного выше. Здесь работа двигателя основана, на свободной ориентации ротора таким образом, чтобы обеспечить магнитному потоку статора лучшую магнитную проводимость (рис. 6.4.1).

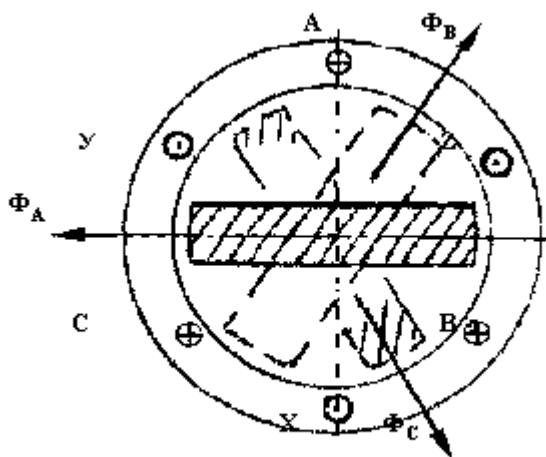


Рис. 6.4.1. Принцип действия реактивного синхронного двигателя

Действительно, если в какой-то момент времени максимальный магнитный поток будет в фазе А - Х, то ротор займет положение вдоль потока ФА. Через $1/3$ периода максимальным будет поток в фазе В - У. Тогда ротор развернется вдоль потока ФВ. Еще через $1/3$ периода произойдет ориентация ротора вдоль потока. ФС. Так непрерывно и синхронно ротор будет вращаться с вращающимся магнитным полем статора. В школьной практике иногда, при отсутствии специальных синхронных двигателей, возникает необходимость в синхронной передаче. Эту проблему можно решить с помощью обычного асинхронного двигателя, если придать ротору следующую геометрическую форму (рис. 6.4.2).

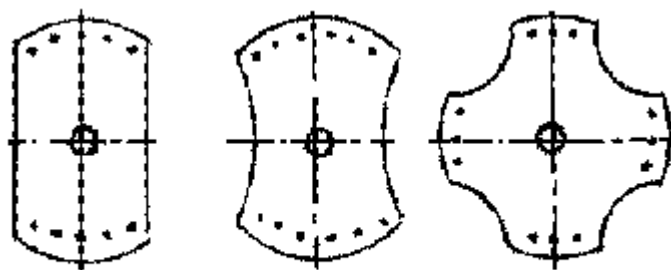


Рис.6.4.2.Модернизация ротора асинхронного двигателя