

52. Конструкция асинхронной машины.

Асинхронные машины делятся на два типа, которые отличаются машины с короткозамкнутым ротором и машины с фазным ротором.

Статор асинхронной машины состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Корпус изготавливают стальным, чугуном, алюминиевым, пластмассовым. Снаружи располагают коробку, в которую помещают концы обмоток статора для соединения между собой и подключения к сети. Сердечник набирают из покрытых лаком листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм. На внутренней поверхности сердечника выполнены пазы, в которые уложена трехфазная обмотка. Обмотка выполняется по шаблонам изолированным медным или алюминиевым проводом. Она укладывается в пазы таким образом, чтобы пространственный сдвиг между каждой фазой составлял $120^\circ_{эл}$ для создания кругового поля асинхронной машины. Обмотка каждой фазы содержит несколько катушек, которые могут соединяться последовательно или параллельно. В зависимости от числа катушек на одну фазу, способа их соединения получают обмотки с различным числом пар полюсов p . Фазы могут быть соединены по схемам «звезда» или «треугольник». Фазное напряжение обмотки статора должно оставаться постоянным. Части витков, расположенные в пазах, называют активными сторонами, поскольку в них индуцируются эдс. Части витков, соединяющие активные стороны и расположенные на торцевых частях статора или ротора, называют лобовыми соединениями.

Ротор асинхронной машины состоит из вала, сердечника и обмотки. Вал изготовлен из стали и закреплен в подшипниковых щитах. На валу закреплен сердечник, на внешней стороне которого выполнены скошенные пазы для обмотки. Сердечники статора и ротора образуют магнитную систему машины. У короткозамкнутых машин обмотка ротора выполнена из алюминия в виде «беличьей клетки». Обмотка ротора в этом случае выполняется путем заливки пазов расплавленным алюминием. Одновременно отливают замыкающие кольца вместе с лопатками для вентиляции. Обмотка фазного ротора имеет конструкцию по аналогии с обмоткой статора. Она содержит то же число пар полюсов p . Применение скошенных пазов ведет к более равномерному распределению магнитного поля в зазоре вдоль активных проводников и снижению шума машины. Концы обмоток фазного ротора соединены в общую точку. Начала обмоток выведены на контактные кольца, расположенные на валу. Контактные кольца выполняются преимущественно из латуни. Они изолированы друг от друга и от вала. К кольцам прижаты щетки, которые посредством отводов от них, можно замыкать накоротко. В цепь ротора можно включать активные, индуктивные, емкостные сопротивления, а также источники эдс. Такие меры позволяют увеличить пусковой момент, понизить пусковые токи, обеспечить плавность пуска двигателя.

53. Вращающееся поле асинхронной машины (двигательный режим).

Пусть обмотка статора соединена в звезду, сопротивление фаз одинаково, система симметрична. Обмотки трехфазного статора равномерно распределены по его сердечнику. В обмотке статора протекает ток:

$$\begin{aligned}i_A &= I_{Am} \sin \omega t, \\i_B &= I_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ_{эл}); \\i_C &= I_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ_{эл}).\end{aligned}$$

Электрические градусы связаны с геометрическими градусами: $\alpha_{эл} = p\alpha_{геом}$, где p – число пар полюсов, количество которых зависит от способа включения обмоток каждой фазы.

Токи каждой фазы создают пульсирующие магнитодвижущие силы, совокупное действие которых приводит к созданию результирующей магнитодвижущей силы, создающей магнитный поток машины. Ее вектор вращается относительно статора.

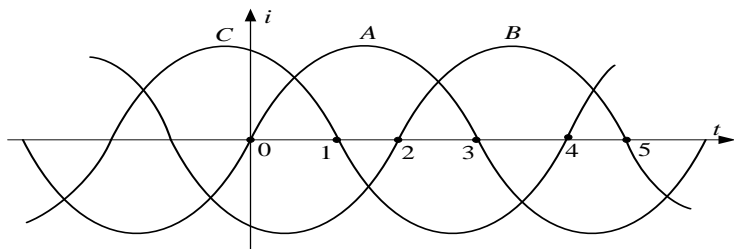


Рис. 4.1. Система трехфазных токов в обмотке статора асинхронного двигателя

Следует определить направление токов всех фазных обмоток в обозначенных точках. При условии $i > 0$ ток протекает от начала обмотки к ее концу. Если $i < 0$, то ток протекает в обмотке от ее конца к началу. Вектор магнитодвижущей силы обмотки статора при переходе от одного указанного момента времени к другому поворачивается на $60^\circ_{эл}$ и совершает полный оборот за период. Частота его вращения (об/мин) равна $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ где f_1 – частота тока в обмотке статора, Гц.

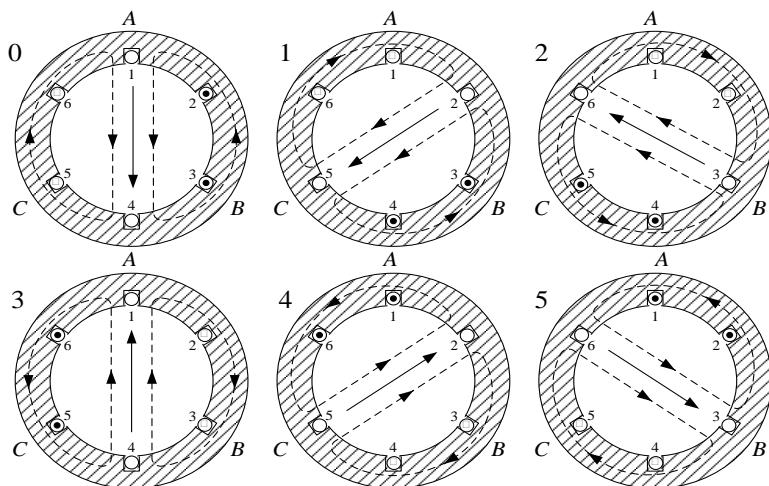


Рис. 4.2. Принцип получения магнитодвижущей силы вращающегося магнитного поля

При повреждениях фазных обмоток (обрыв, ненадежный контакт) поле в зазоре перестает быть круговым. В этих случаях оно имеет эллиптический или пульсирующий характер. Нормальные условия работы асинхронного двигателя нарушаются. Это ведет к ухудшению качества работы приводимых агрегатов и сокращает срок службы самого двигателя.

56. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Способы улучшения энергетических показателей асинхронного двигателя.

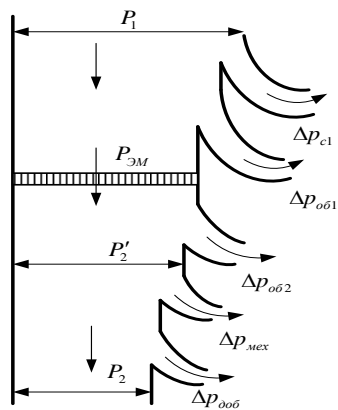


Рис. 4.9. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Потери делятся на механические, магнитные, электрические и добавочные. Первые два вида потерь относятся к постоянным потерям, вторые два вида потерь – к переменным. Преобразование активной мощности асинхронного двигателя представлено на энергетической диаграмме (рис. 4.9). Мощность P_1 подводится из сети, за вычетом потерь в магнитопроводе $\Delta P_{с1}$ и обмотке статора $\Delta P_{об1}$ преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$, которая передается через воздушный зазор машины в ротор. В нормальном режиме работы асинхронного двигателя потери в магнитопроводе ротора пропорциональны частоте f_2 . Электромагнитная мощность $P_{эм}$, благодаря которой возникает электромагнитный момент двигателя M , за вычетом потерь в обмотке ротора $\Delta P_{об2}$, преобразуется в полную механическую мощность P_2 . На преодоление сил трения, которые составляют механические потери $\Delta P_{мех}$, затрачивается часть электромагнитного момента, развиваемого на роторе двигателя. Этот момент называется моментом холостого хода M_0 . Добавочные потери $\Delta P_{добH}$, составляющие от 0,5 до 1 % подводимой к двигателю мощности P_1 в номинальном режиме работы, включают потери от пульсаций магнитного поля, высших гармонических составляющих, насыщения/ Потери $\Delta P_{доб}$, зависят от нагрузки двигателя β : $\Delta P_{доб} = \beta^2 \Delta P_{добH}$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя: $\eta = 1 - \frac{\Delta P_{сум}}{P_1}$

Кпд асинхронных двигателей средней и большой мощности составляет 0,85-0,92.

Для оптимизации работы двигателей в течение технологического процесса и улучшения их энергетических

показателей принимаются следующие меры:

- мощность двигателя выбирают в соответствии с нагрузкой на его валу, т.к. недогруженный двигатель работает с низким кпд;
- включение параллельно двигателю батарей конденсаторов, которые своей емкостью компенсируют сдвиг фаз, обусловленный индуктивностью двигателя (поперечная компенсация);
- переключение обмотки статора с треугольника на звезду;
- ограничение работы двигателей на холостом ходу;
- применение вентильных преобразователей напряжения и частоты для питания недогруженных двигателей.

57. Уравнение электромагнитного момента асинхронной машины и его анализ. Механическая характеристика асинхронной машины. Условия получения естественной механической характеристики. Рабочий участок механической характеристики.

Электромагнитный момент M создаётся в результате взаимодействия тока ротора с вращающимся в зазоре машины магнитным полем. $M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} =$

$$\frac{m_1 I_2 E_2 \cos \psi_2}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_1}, \text{ где } \omega_1 - \text{синхронная угловая скорость вращения поля статора, рад/с. } \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

$$M = \frac{m_1 U_1^2 p \frac{R_2}{s}}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + x_k^2 \right)}, \text{ где } x_k = x_1 + x_2' - \text{индуктивное сопротивление короткого замыкания.}$$

Задаваясь рядом значений скольжения s от $-\infty$ до $+\infty$ и принимая остальные параметры выражения неизменными, в результате можно получить зависимость $s = f(M)$, которая называется статической механической характеристикой асинхронной машины. Данная характеристика отображает три возможных режима работы асинхронной машины подключенной к сети;

- режим двигателя ($0 < s \leq 1$);
- режим генератора ($0 \geq s > -\infty$);
- режим электромагнитного тормоза ($1 \leq s < +\infty$).

Статическая механическая характеристика называется естественной, если она получена при условиях $U_1 = \text{const} = U_{1H}$, $f_1 = \text{const} = f_{1H}$ $R_2' = r_2'$ ($r_{доб} = 0$). При отклонении хотя бы одного из этих параметров от указанных значений характеристика является искусственной.

В случае неподвижного ротора ($s=1$) пусковой момент $M_{п}$:

$$M_{п} = \frac{m_1 U_1^2 p R_2}{2\pi f_1 ((r_1 + R_2')^2 + x_k^2)},$$

s_m , при котором момент асинхронной машины максимален M_m . Такое значение скольжения и момента называют критическими. $s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$

Статическая механическая характеристика может быть представлена в виде $\omega = f(M)$. Чтобы перейти от об/мин в рад/с $\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{n}{9,55}$

Статическая механическая характеристика асинхронной машины представлена на рис 4.10. При идеальном холостом ходе ($s = 0$) асинхронная машина не развивает момент, т.к. эдс и ток в роторной обмотке не индуцируются. С увеличением нагрузки на валу частота вращения ротора

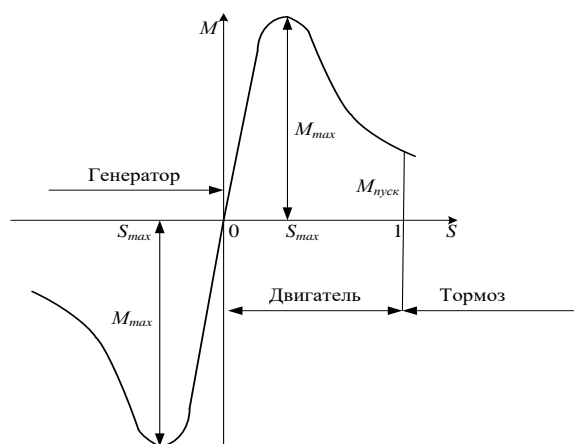


Рис 4.10. Статическая механическая характеристика асинхронной машины

снижается, возрастают скольжение, эдс и ток в роторе, а так же момент. Увеличение скольжения s вызывает рост частоты тока в роторе f_2 и индуктивного сопротивления ротора x_2' . В связи с этим, начиная с некоторого значения скольжения s_m , момент, развиваемый двигателем, перестает нарастать, несмотря на нарастание тока в роторе. Активная составляющая тока в роторе уменьшается из-за роста доли реактивного сопротивления. Момент зависит от активной составляющей тока ротора, он будет также снижаться. При генераторном режиме работы асинхронной машины ее максимальный момент больше, чем при двигательном режиме. Это объясняется тем, что в генераторном режиме часть потерь компенсируется за счет приводного двигателя, расположенного на одном валу с асинхронной машиной. Отдаваемая в сеть активная мощность должна быть равна по величине активной мощности, которая потребляется асинхронной машиной в режиме двигателя.

Перегрузочная способность: $k_m = \frac{M_m}{M_H}$, где M_H – номинальный момент, который можно определить как: $M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}$, где P_H – номинальная мощность двигателя, кВт.

Участок статической механической характеристики с пределами изменения скольжения от $-s_m$ до s_m называется рабочим участком механической характеристики или устойчивым участком работы асинхронной машины. Рабочий участок может быть рассчитан по формуле Клосса: $\frac{M}{M_m} = \frac{2(s_m+1)}{\frac{s}{s_m} + 2s_m + \frac{s_m}{s}}$

Асинхронный двигатель наиболее экономично работает на участке статической механической характеристики с пределами изменения скольжения от 0 до s_m , потому что электрические потери в обмотках ротора $\Delta p_{об2}$ пропорциональны скольжению: $\Delta p_{об2} = P_{эм}s$.

58. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем введения добавочного сопротивления в цепь ротора. Механические характеристики.

Способ нашел широкое распространение из-за простоты реализации. Однако он требует большого количества контактной аппаратуры, а применение активных сопротивлений увеличивает потери в роторе. Критическое скольжение s_m и пусковой момент $M_{п}$ прямо пропорциональны величине активного сопротивления цепи ротора R'_2 , а скорость вращения поля статора ω_1 и критический момент M_m не зависят от него, поэтому остаются неизменными в любом диапазоне изменения скорости ротора.

Можно подобрать добавочное сопротивление так, что пусковой момент $M_{п}$ двигателя будет равен максимальному моменту M_m . Величину $r_{доб}$ рассчитывают из выражения для скольжения $s_m = 1$:

$$s_m = 1 = \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{r'_2 + r'_{доб}}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad r_{доб} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r'_2}{k_e^2}$$

Рост величины R'_2 приводит к снижению тока ротора I'_2 . Однако возрастает его активная составляющая, что вызывает увеличение электромагнитного момента M . Этим объясняется рост пускового момента $M_{п}$ до определенного значения, после чего $M_{п}$ уменьшается, т.к. ток ротора убывает быстрее, чем растет его активная составляющая. Реостат в цепи ротора является и регулировочным, и пусковым. Пусковой ток ротора из-за наличия контактных колец и щеток ограничивают величиной $I_{2п} = (2 - 2,5)I_{2н}$. Регулирование скорости ротора при данном моменте нагрузки на валу $M_c = M_H$ (рис. 4.11) происходит вниз от ее номинала.

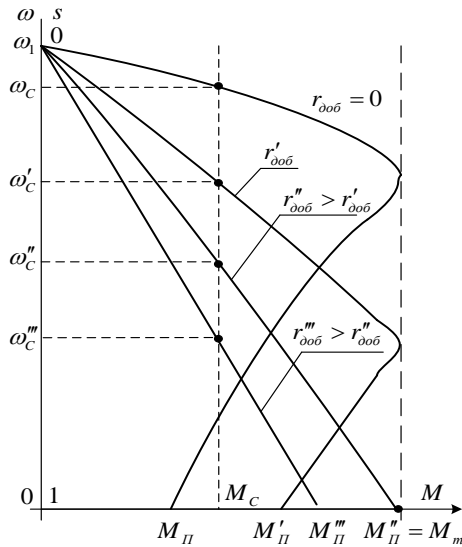


Рис. 4.11. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении в

роторе добавочного сопротивления $r_{доб}$

59. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения подводимого к статору напряжения. Механические характеристики.

Способ применим в равной мере для всех асинхронных двигателей. Момент двигателя M , а также моменты пусковой $M_{п}$ и критический M_m , пропорциональны квадрату напряжения, подведенного к цепи статора, U_1^2 . Скорость идеального холостого хода ω_1 и критическое скольжение s_m от уровня напряжения не зависят. Влияние напряжения U_1 на вид механических характеристик представлено на рис. 4.14.

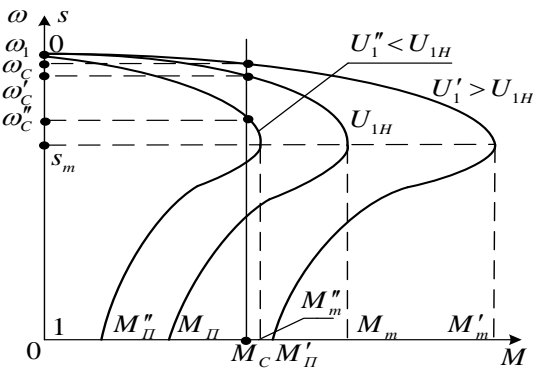


Рис. 4.14. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения, подводимого к статору

При условии $U_1' > U_{1H}$ характеристика проходит выше естественной. Хотя в данном случае возрастает пусковой момент двигателя, но увеличивается ток статора, насыщаются магнитопроводы и увеличиваются потери. Поэтому согласно стандартам для эксплуатации асинхронных двигателей допускается повышение питающего напряжения не более чем на 5% от номинального значения. Когда выполняется условие $U_1' > U_{1H}$, то характеристика проходит ниже естественной. Уменьшается пусковой момент и падает перегрузочная способность двигателя. Снижение питающего напряжения допускается не более чем на 10% от номинального значения. Изменение напряжения достигается в частности регуляторами напряжения на полупроводниковых элементах. При таком способе диапазон регулирования скорости невелик, а регулирование возможно только вниз от номинальной скорости.

60. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения числа пар полюсов. Механические характеристики.

Способ на практике реализуется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. У двигателей с фазным ротором приходится менять число пар полюсов не только на статоре, но и на роторе, что усложняет схему управления. Изменение числа пар полюсов в обмотке статора достигается переключением ее частей с последовательного на параллельное соединение. На рис. 4.15 представлены направления токов в обмотках и потоков полюсов. В данном случае необходимо так же поменять местами фазы обмотки двигателя, чтобы сохранить прежним направление вращения поля статора.

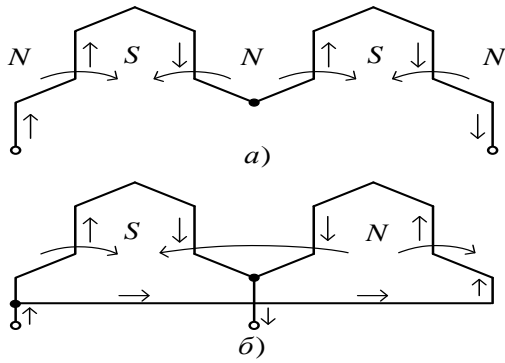


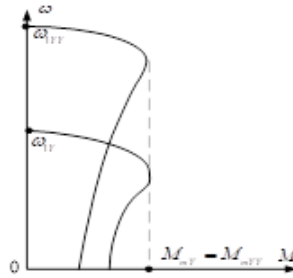
Рис. 4.15. Переход от числа полюсов $2p=4$ (а) к $2p=2$ (б)

Скорость асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов можно регулировать двумя способами: при постоянном моменте ($M=const$) и при постоянной мощности ($P=const$). При условии $M=const$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Y на YY (двойная звезда). Выражения потребляемых из сети активных мощностей при этом имеют вид:

$$P_{1Y} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \varphi_{1Y};$$

$$P_{1YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1Y} = 2P_{1Y}.$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Скорость идеального холостого хода $\omega_{1YY} = 2\omega_{1Y}$. Момент, развиваемый двигателем $M \approx \frac{P_1}{\omega_1}$, при этом $M_Y \approx M_{YY}$. Для рассматриваемого способа схемы переключения и механические характеристики двигателя представлены на рис. 4.16. Способ регулирования скорости при условии $M=const$ целесообразно применять в электроприводах с постоянно действующим моментом нагрузки при любой частоте вращения, например, в подъемно-транспортных механизмах.



При условии $P=const$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Δ на YY . Выражения, отображающие потребляемые из сети активные мощности, при этом имеют вид: $P_{1Y} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_{1\Delta}$;

$$P_{1YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1YY} = 2P_{1Y}.$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Потребляемая мощность $P_{1YY} = 1,15P_{1\Delta}$. Если разницей в 15% пренебречь, что упрощает анализ, то $P_{1YY} = P_{1\Delta}$, а скорость идеального холостого хода $\omega_{1YY} \approx 2\omega_{1\Delta}$. Момент двигателя при этом $M_{YY} \approx \frac{M_{\Delta}}{2}$. Схемы переключения и механические характеристики двигателя изображены на рис. 4.17. Способ регулирования скорости при условии $P=const$ целесообразно применять когда момент нагрузки меняется обратно пропорционально частоте вращения, например, в станочных электроприводах. В обоих вариантах регулирования сохраняется жесткость рабочих участков механических характеристик. При регулировании на разных скоростях остаются практически неизменными энергетические показатели двигателей.

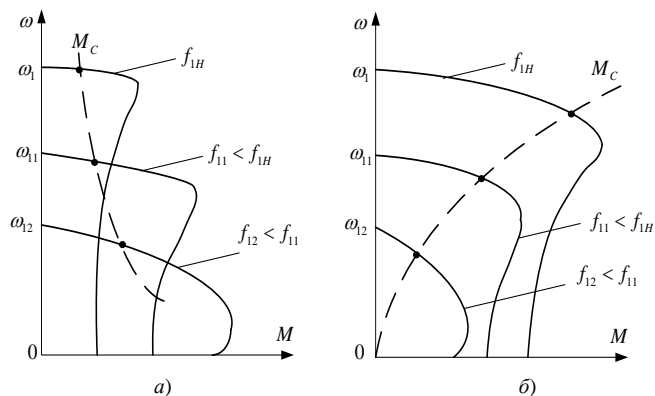
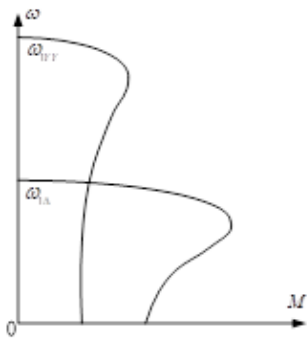


Рис. 4.19. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки (б)

61 Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения величины напряжения статора и его частоты. Законы управления $\frac{U_1}{f_1} = const$,

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const, \frac{U_1}{f_1^2} = const. \text{ Механические характеристики для всех случаев.}$$

Регулирование скорости изменением частоты f_1 подведенного напряжения U_1 (частотное регулирование). Способ является наиболее перспективным в связи с широким применением преобразователей частоты, выполненных на полупроводниковых элементах. Он реализуется преимущественно на короткозамкнутых асинхронных двигателях ($R'_2 = r'_2$). Регулирование скорости двигателя происходит плавно в широком диапазоне как вверх, так и вниз от ее номинального значения. Способ является достаточно экономичным в плане энергопотребления, однако стоимость преобразователей частоты по сравнению со

стоимостью двигателя относительно велика. Наиболее рациональное регулирование скорости достигается при условии поддержания неизменным магнитного потока двигателя Φ_m . При условии $U_1 \approx const$ и $r_1 \approx 0$ имеем:

$$U_1 \approx E_1 = c \cdot f_1 \cdot \Phi_m = const, \quad (4.66)$$

где c – постоянная, зависящая от параметров двигателя.

Из выражения (4.66) следует, что с увеличением частоты f_1 снижается магнитный поток Φ_m и развиваемый двигателем момент, а также его перегрузочная способность. Если же частота f_1 снижается, то происходит рост магнитного потока. Это приводит к насыщению магнитной цепи двигателя и повышению потерь. Для обеспечения условия постоянства магнитного потока ($\Phi_m = const$) требуется регулировать напряжение U_1 и частоту f_1 пропорционально друг другу, т. е. по закону

$$\frac{U_1}{f_1} = k = const. \quad (4.67)$$

Целесообразно проанализировать, как будут располагаться механические характеристики при регулировании скорости по (4.67). Скорость идеального холостого хода ω_1 пропорционально зависит от частоты питающего напряжения f_1 . Индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_K = 2\pi f_1 L_K$.

Принимая, что $U_1 = k f_1$, выражения моментов трехфазного асинхронного двигателя (4.54) – (4.56) и критического скольжения s_m (4.52) при этом примут вид:

$$M = \frac{3k^2 f_1^2 \frac{r_2'}{s} p}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (2\pi f_1 L_K)^2 \right)}; \quad M \sim \frac{f_1^2}{f_1^3}; \quad (4.68)$$

$$M_{\Pi} = \frac{3k^2 f_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 \left((r_1 + r_2')^2 + (2\pi f_1 L_K)^2 \right)}; \quad M_{\Pi} \sim \frac{f_1^2}{f_1^3}; \quad (4.69)$$

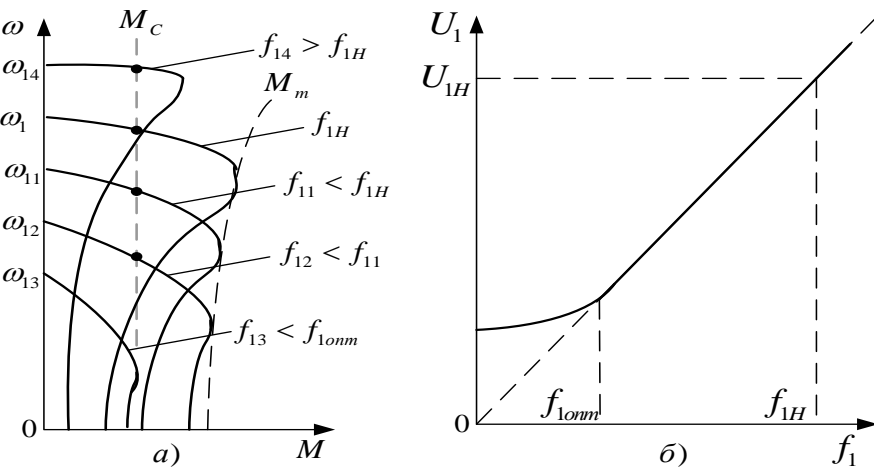
$$M_m = \frac{3k^2 f_1^2 p}{4\pi \cdot f_1 \cdot (r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + (2\pi f_1 L_K)^2})}; \quad M_m \sim \frac{f_1^2}{f_1^2}; \quad (4.70)$$

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (2\pi f_1 L_K)^2}}; \quad s_m \sim \frac{1}{f_1}. \quad (4.71)$$

Согласно полученных выражений момент, развиваемый двигателем при пуске и работе, изменяется обратно пропорционально частоте f_1 . Скольжение s_m

меняется аналогичным образом, а жесткость механической характеристики возрастает. Максимальный момент M_m стабилизируется. Механические

характеристики для рассмотренного случая представлены на рис. 4.18,а. При частотах $f_1 > f_{1H}$ напряжение U_1 не повышают, поскольку это недопустимо по условиям эксплуатации двигателей, а оставляют равным номинальному. В результате снижается перегрузочная способность двигателя, что необходимо учитывать при выборе его нагрузки. Установлено, что для реальных условий в процессе регулирования скорости при соблюдении закона



$\frac{U_1}{f_1} = const$ с уменьшением частоты f_1 момент M_m несколько снижается. Это

объясняется нарастающим влиянием падения напряжения в статорной обмотке двигателя, что наиболее заметно у двигателей небольшой

мощности. Пусковой момент двигателя M_{Π} в то же время увеличивается с уменьшением частоты f_1 . Оптимальное значение $M_{\Pi onm}$

наступает при частоте f_{1onm} питающего напряжения равной 15 – 20 Гц, определяемой по

формуле, если $\frac{dM_{\Pi}}{df_1} = 0$:

Рис. 4.18. Механические характеристики асинхронного двигателя при $M = const$ (а) и зависимость

$$U_1 = F(f_1) \quad (б)$$

$$f_{1onm} = \frac{r_1 + r_2'}{2\pi \cdot L_K}. \quad (4.72)$$

При частотах $f_1 < f_{1onm}$ следует менять напряжение U_1 в меньшей мере, чем частоту f_1 (рис. 4.18,б), поскольку регулирование по закону

$$\frac{U_1}{f_1} = const \text{ приводит к существенному снижению } M_m. \text{ Регулирование скорости асинхронного двигателя по данному закону целесообразно,}$$

когда выполняется условие $M_C = const$. Для некоторых производственных механизмов, например, насосных установок, чрезмерное снижение скорости вращения двигателя может привести к выходу из строя их рабочего органа и другим неисправностям. Поэтому в преобразователях частоты не всегда целесообразно выставлять задание на минимальные скорости вращения двигателей, добиваясь глубокого ее регулирования. Работа с минимальной частотой вращения ограничивается ухудшением условий охлаждения двигателя с его самовентиляцией. В этом случае более эффективна независимая вентиляция.

Наряду с регулированием, при котором выполняется отношение $\frac{U_1}{f_1} = const$, используются в современных электроприводах и другие зависимости,

например $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$ (условие постоянства мощности) или $\frac{U_1}{f_1^2} = const$ (при вентиляторной нагрузке). Вид такой зависимости

определяется требованиями технологического процесса промышленных установок. Механические характеристики двигателей при использовании указанных зависимостей приведены на рис. 4.19. Применение вентильных преобразователей частоты улучшает технико-экономические показатели регулируемых электроприводов. Основным их недостатком является генерация высших гармоник, что приводит к возникновению дополнительных потерь, паразитных моментов, ухудшающих эксплуатационные свойства двигателя, ведущих к его перегреву, а также влиянию на качество электроэнергии у потребителей. Для снижения негативного воздействия высших гармоник используются сглаживающие фильтры, вентильные элементы с большой частотой коммутации, что позволяет приблизить кривую выходного напряжения к синусоиде [25].

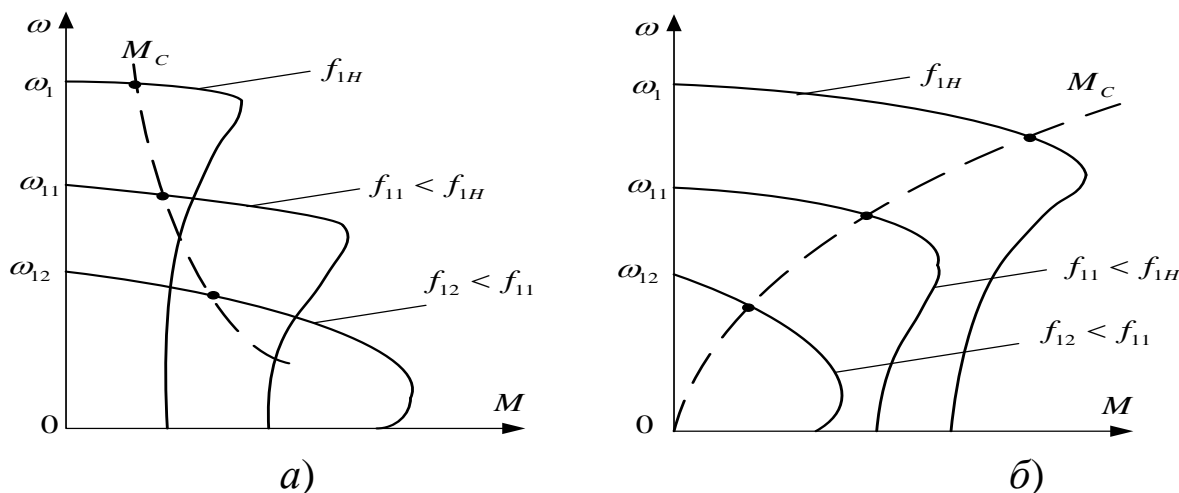


Рис. 4.19. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки б)