

Машины переменного тока ч.2 (продолж.)

Синхронные машины (СМ) (продолж.).

Синхронные двигатели(СД)

Особенности конструкции СД

Пуск СД

Характеристики СД.

Угол нагрузки в СГ и СД

Угловая характеристика. Устойчивая работа СМ

U-образные характеристики СД

Рабочие характеристики СД

Механическая характеристика СД

Сравнение СД с АД

Особенности конструкции СД

СД по конструкции в принципе не отличаются от СГ, но некоторые особенности есть:

1. СД выполняют явнополюсными ($2p > 6$);
2. воздушный зазор δ между статором и башмаком ротора меньше, чем у СГ, что позволяет уменьшить пусковой ток;
3. демпферную (успокоительную) обмотку выполняют из проводников большего сечения, т.к. она является пусковой;
4. ширина башмака главного полюса у СД больше, чем у

СГ:
$$b_{\text{ГП}} = 0,9\tau \quad (\text{у СГ } b_{\text{ГП}} = 0,7\tau)$$

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

τ – полюсное деление

Следовательно, СМ имеют целевое назначение.

Пуск СД

Пуск СД непосредственным включением в сеть невозможен, так как ротор из-за своей значительной инерции не может быть сразу увлечен вращающимся полем статора, частота вращения которого устанавливается мгновенно.

В результате устойчивая магнитная связь между статором и ротором не возникает.

Для пуска СД приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до синхронной или близкой к ней (подсинхронной) частоте вращения, при которой между статором и ротором устанавливается устойчивая магнитная связь.

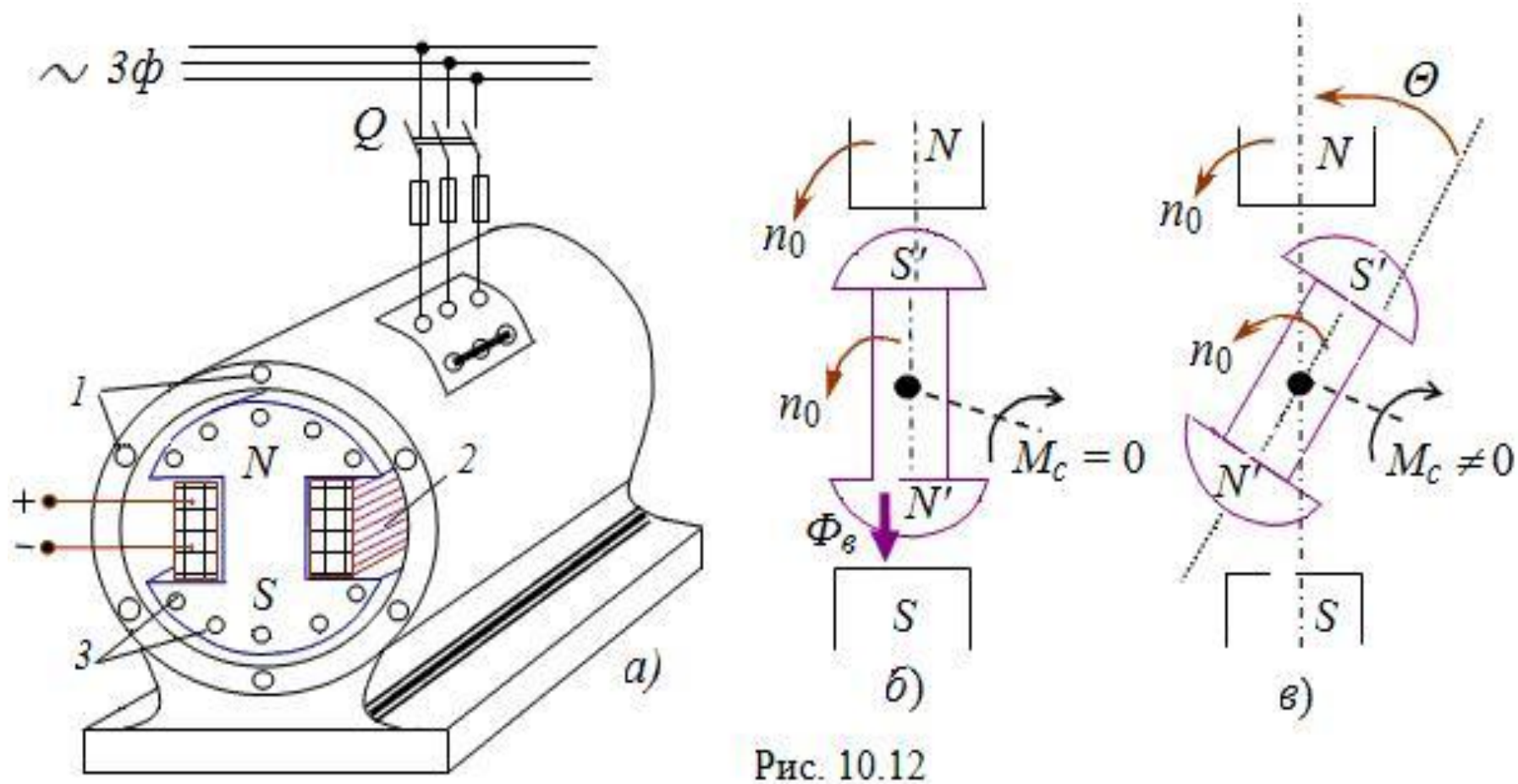


Рис. 10.12

Рис.1.а)Элементы конструкции СД: 1- обмотка статора, 2 - ОВ, 3-пусковая обмотка; б)расположение осей полей N-S и N'-S' при холостом ходе СД; в)расположение осей полей N-S и N'-S' при нагрузке.

Распространение получил так называемый асинхронный пуск синхронного двигателя (рис.1,а).

Для осуществления такого пуска в башмаках полюсов ротора (рис.2,а) располагают специальную пусковую обмотку (клетку) (рис.2,б), аналогичную успокоительной обмотке СГ, представляющую собой к.з. обмотку типа беличьей клетки, как у ротора к.з. АД. Витки (стержни) этой обмотки располагают в полюсах ротора и по торцам закорачивают к.з. кольцами.

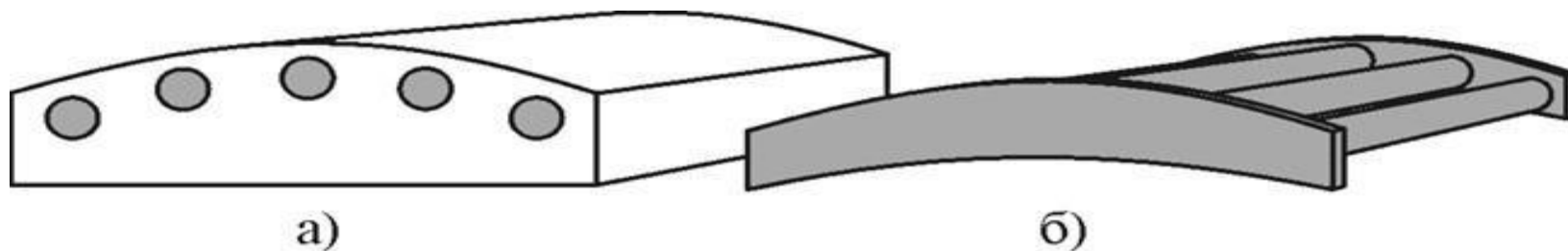


Рис.2. Элементы ротора СМ: а) башмак полюса ротора с 5 стержнями; б) короткозамкнутая обмотка ротора с кольцами

Зачем нужна пусковая обмотка?

Дело в том, что СД «добровольно» не тронется с места, т. к. имеет очень большую инерционную массу и за 1/100 секунды (рис.3) полюсы ротора и статора не успевают вступить во взаимодействие. А поле статора сразу же, после включения СД в сеть, начинает вращаться с частотой n_1 ($n_1 = 60 f_1 / p$).

Следовательно, ротор надо либо раскрутить предварительно до подсинхронной скорости, чтобы разноимённые полюсы статора и ротора вступили во взаимодействие и только тогда начнётся синхронное вращение ротора с полем статора, либо запустить его как АД с к.з. ротором. С этой целью и укладывают пусковую обмотку.

**Откуда
возникла 1/100
секунды?**

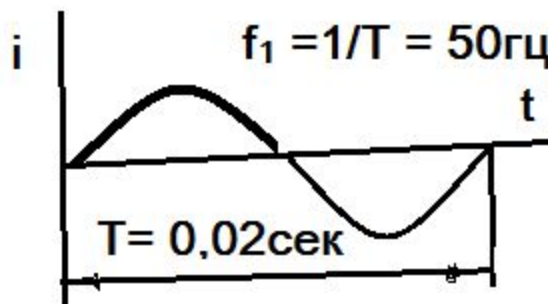


Рис.3

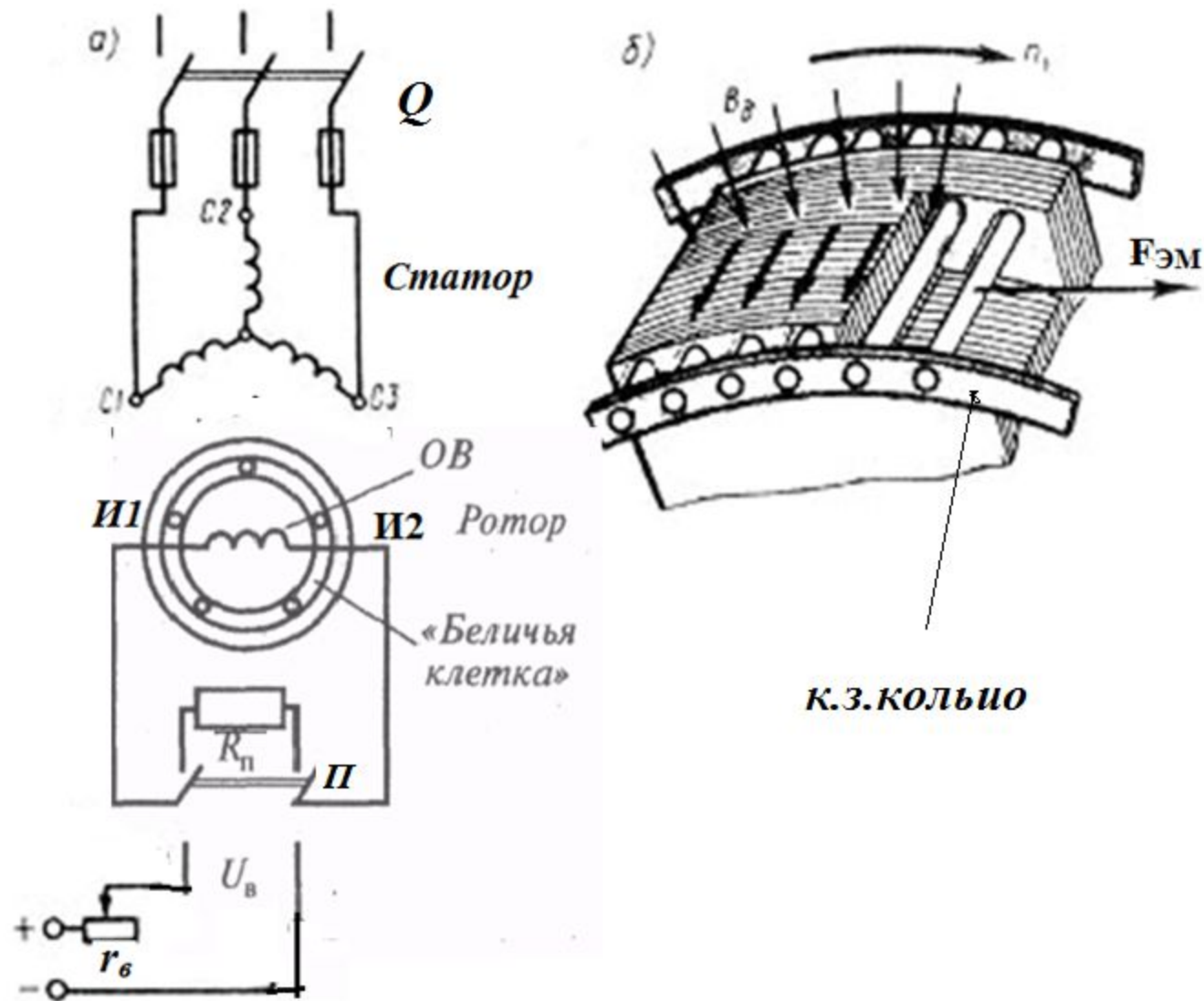


Рис.4. Асинхронный пуск СД: а) электрическая схема; б) образование электромагнитной силы $F_{ЭМ}$

Последовательность операций при пуске СД

1. Вначале (рис.4,а) обмотку ротора ОВ замыкают рубильником П на сопротивление $R_{\text{пр}}$, много большее (примерно в 10-15раз), чем $r_{\text{в}}$

2. Затем подают трехфазное напряжение на обмотку статора (включают рубильник Q). По фазам обмотки начинают проходить токи. Создается вращающееся магнитное поле статора. Поле наводит в стержнях пусковой клетки ротора ЭДС, которые создают токи I_2 .

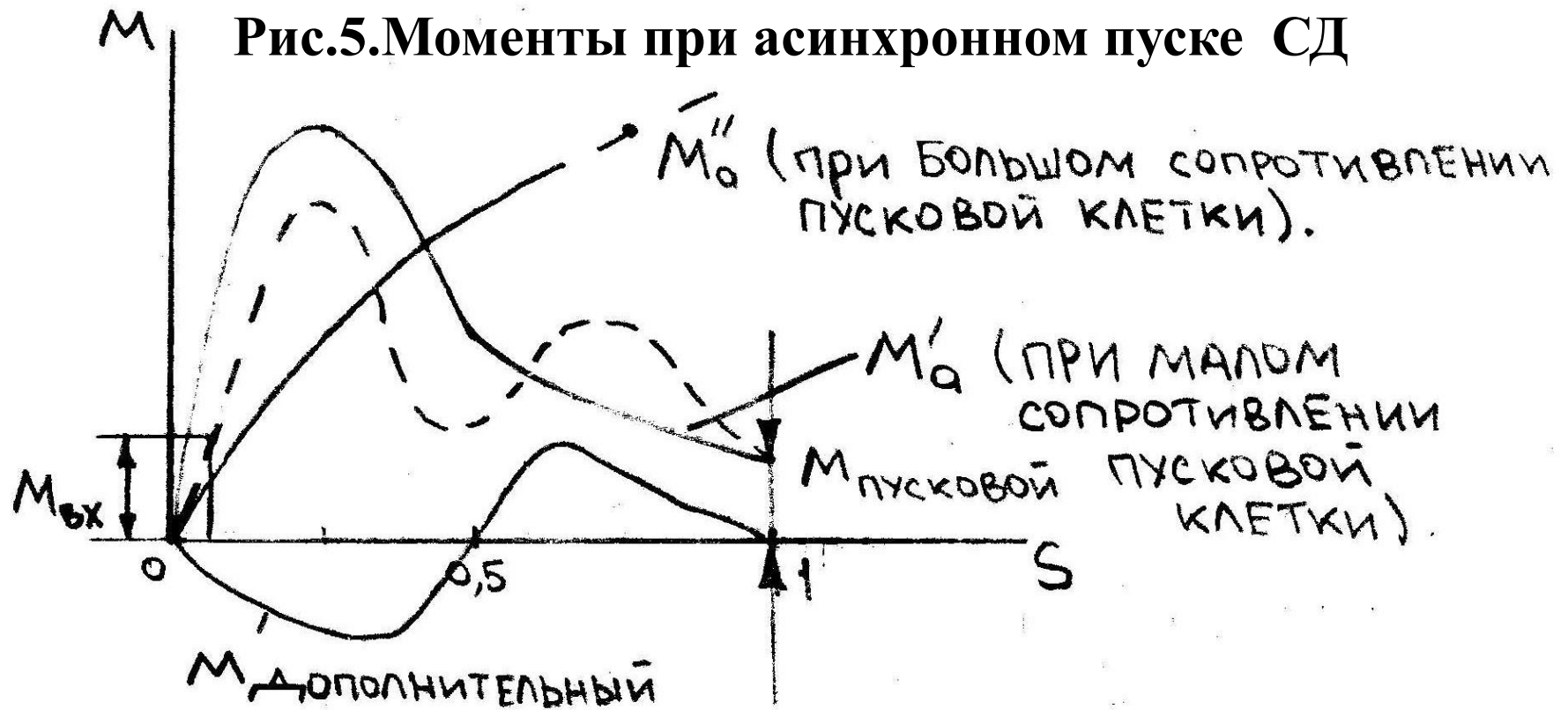
Взаимодействие этих токов с полем статора вызывает появление на стержнях пусковой клетки электромагнитных сил $F_{\text{ЭМ}}$, которые увлекают за собой ротор, т.е. под действием этих сил (рис. 4,б) ротор начинает вращаться, получает ускорение (разгоняется как АД) и после нескольких качаний ротора его частота вращения сравнивается с частотой вращения поля статора и далее остается постоянной (говорят, что двигатель втянулся в синхронизм).

3. По достижении подсинхронной скорости ($n'_1 = 0,95n_1$) переключение зажимов $I1$ и $I2$ ОВ с сопротивления R_{Π} на зажимы возбuditеля осуществляют переключателем Π (см. рис.4, а) для питания обмотки ротора постоянным током, величину которого регулируют реостатом r_B .

На время пуска ОВ не следует оставлять разомкнутой:
магнитный поток статора, пересекающий ее в начальный период пуска с синхронной скоростью, наводит в ней ЭДС. Вследствие большого числа витков ОВ эта ЭДС достигает значений, опасных как для целостности изоляции самой обмотки, так и для обслуживающего персонала.

На время пуска ОВ нельзя также замыкать накоротко:
возникает дополнительный момент, приводящий к зависанию машины на полусинхронной скорости (кривая M_D рис.5.)

Рис.5. Моменты при асинхронном пуске СД



M'_a – основной момент созданный пусковой клеткой;

M''_a – тот же момент при большем сопротивлении пусковой клетки;

$M_{\text{д}}$ – дополнительный момент который создаётся замкнутой накоротко OB ;

$M_{\text{вх}}$ – момент входа двигателя в синхронизм (зависит от сопротивления пусковой клетки).

Чем меньше нагрузка на валу двигателя, тем легче его вхождение в синхронизм. Явнополюсные двигатели малой мощности, пускаемые без нагрузки на валу, иногда входят в синхронизм лишь за счет реактивного момента, т. е. даже без включения обмотки возбуждения.

С увеличением нагрузочного момента на валу вхождение двигателя в синхронизм затрудняется.

Наибольший нагрузочный момент, при котором ротор синхронного двигателя еще втягивается и синхронизм (рис.5), называют моментом входа двигателя в синхронизм $M_{вх}$

Величина асинхронного момента M_a

при частоте вращения $n_2 \approx 0,95n_1$

зависит от активного сопротивления пусковой клетки, т. е. от сечения стержней и удельного электрического сопротивления металла, из которого они изготовлены .

Характеристики СД

Угловая характеристика - зависимость между электромагнитным моментом синхронного двигателя M и углом рассогласования θ , т.е.

$$M = f(\theta).$$

U - образная характеристика - зависимость тока статора от тока возбуждения ротора, когда момент на валу двигателя $M = const$

$$I_1 = f(I_B).$$

Рабочие характеристики - зависимость $n_2, P_1, \eta, I_1, M_2, \cos\varphi$ от полезной мощности от P_2

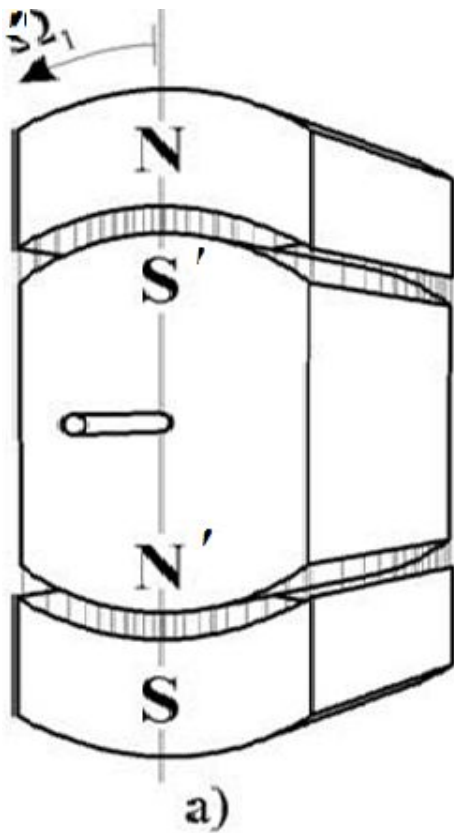
Механическая характеристика - зависимость частоты вращения от момента $n_2 = f(M)$

Увеличение нагрузки на валу двигателя приводит к увеличению тока в цепи СД и, следовательно, к увеличению потребляемой из сети электрической мощности.

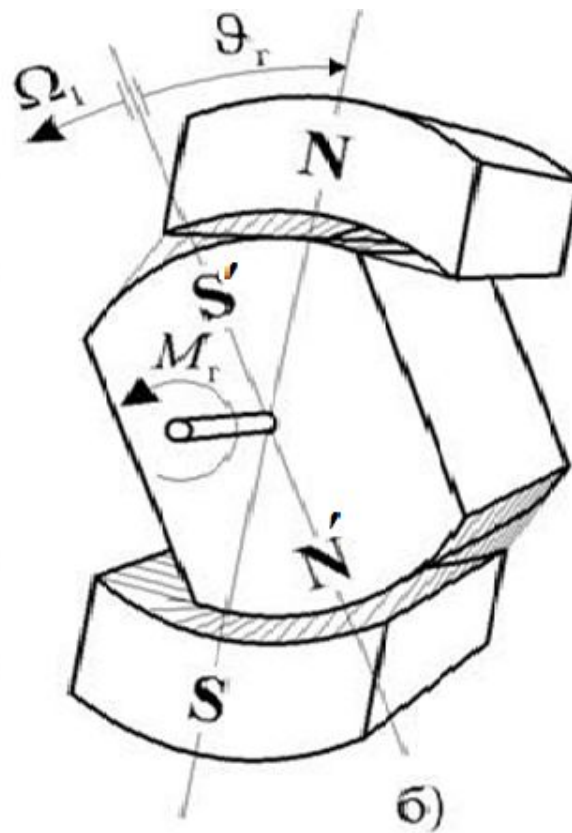
В отличие от АД, в котором рост нагрузки на валу приводит к уменьшению скорости вращения ротора, в СД увеличение механической нагрузки приводит к увеличению угла нагрузки θ между полюсами вращающихся полей статора и ротора при сохранении постоянства скорости вращения ротора.

Ротор СД будет продолжать синхронное вращение до тех пор, пока он будет за полпериода переменного тока успевать поворачиваться своими полюсами к следующим проводникам обмотки статора с таким же направлением тока, как и в тех проводниках, против которых он находится в данный момент и пока на ротор будет действовать вращающий момент одного и того же направления (рис. 6). При слишком большой механической нагрузке ротор двигателя выпадает из синхронизма и двигатель останавливается.

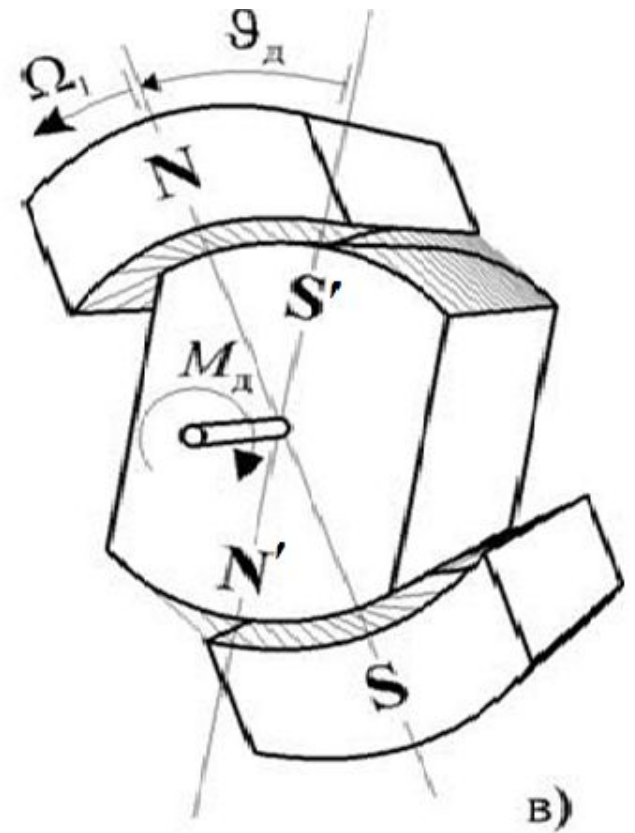
Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например, при записи и воспроизведении звука.



Холостой ход



Генератор



Двигатель

Рис.6 Угол нагрузки θ при разных режимах работы СМ

Угловая характеристика СД

Зависимость электромагнитного момента $M_{эм}$ от угла рассогласования Θ (угла сдвига фаз между вектором ЭДС фазы якоря E_0 и вектором напряжения сети U_{ϕ}), т.е. $M_{эм} = f(\Theta)$, называют **угловой характеристикой СД** (рис.7)

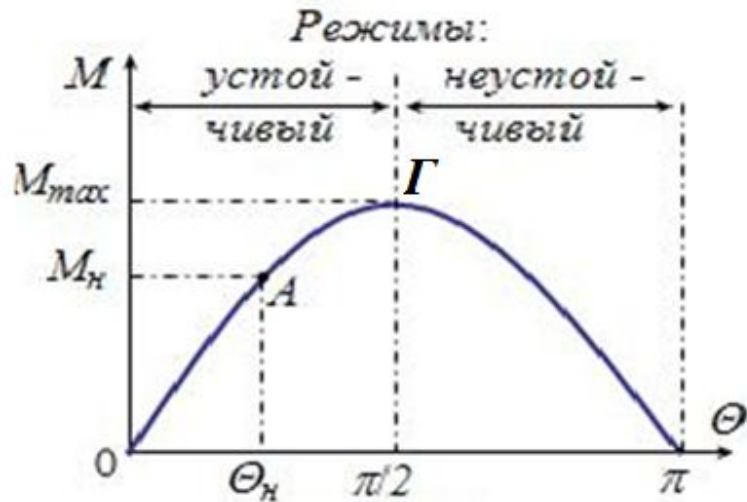


Рис.7

Угловая характеристика позволяет анализировать процессы, происходящие в СД, при изменении нагрузки (изменении момента сопротивления M_c на валу) при $I_b = \text{const}$. Устойчивая работа СД соответствует участку угловой характеристики от угла $\Theta = 0$ до угла $\Theta = \pi/2$ (точка Г). Точка А соответствует номинальному режиму работы.

На рис.8 изображена полная угловая характеристика СМ, где кривая 1 – зависимость момента М

неявнополюсной СМ от угла нагрузки θ :
$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta$$

Кривая 2 – зависимость момента явнополюсной СМ от угла нагрузки:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Здесь момент состоит из двух составляющих: основного момента (кривая 1) и реактивного (кривая 3), обусловленного разностью проводимостей по продольной и поперечной осям СМ. Кривая 2 получена как результат сложения ординат 1-ой и 3-ей кривых.

Кривая 3 – зависимость реактивного момента M_p от угла 2θ :

$$M_p = \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

N.B

Момент для неявнополюсной
СМ – кривая 1:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta$$

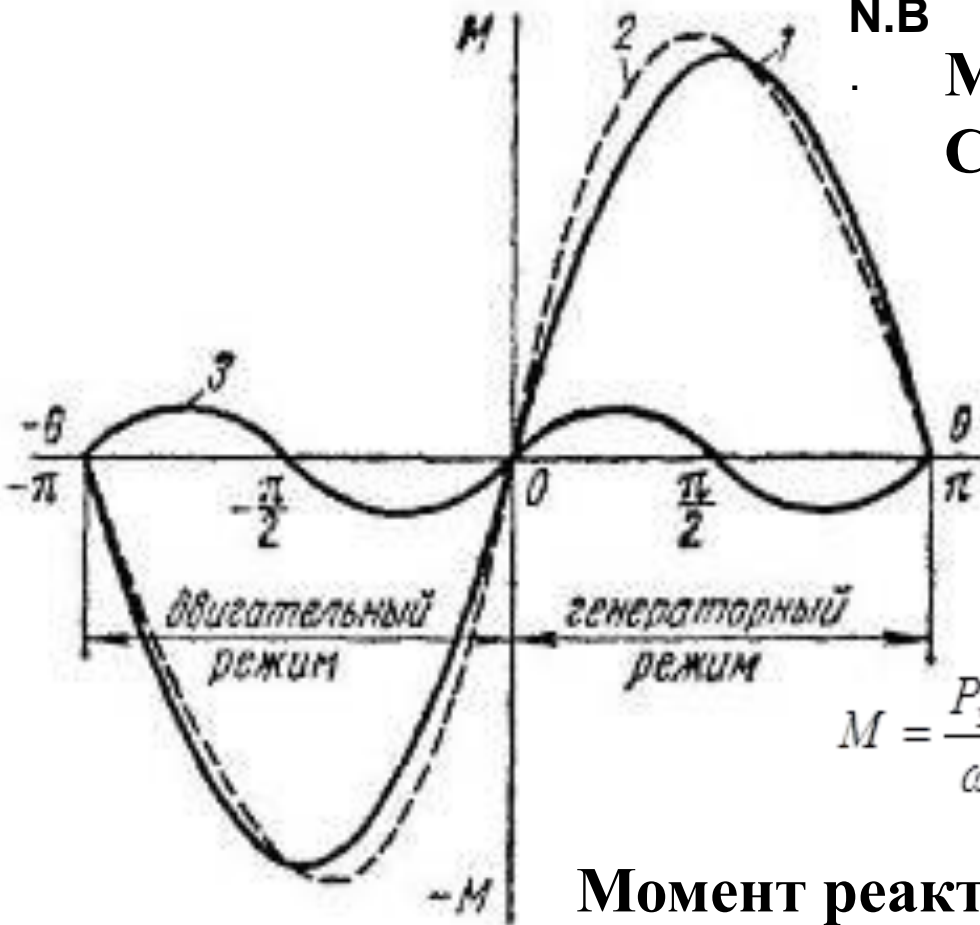
Момент для явнополюсной
СМ – кривая 2:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Момент реактивный в явнополюсной
СМ – кривая 3:

$$M_p = \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Рис. 8. Угловые характеристики электромагнитного момента (М) для генераторного и двигательного режимов СМ.



В общем виде угловая характеристика СМ представляет собой две полуволны результирующего момента M : положительную, соответствующую генераторному режиму работы (первый квадрант рис. 8), и отрицательную, соответствующую двигательному режиму работы (третий квадрант рис. 8).

Переход машины из одного режима работы в другой происходит при $\theta = 0$.

Устойчивая работа синхронного двигателя соответствует участку угловой характеристики Г-Д (рис. 10) при $\theta = 0 \div (\theta_{кр})$

Отношение максимального электромагнитного момента M_{MAX} к номинальному $M_{НОМ}$ определяет перегрузочную способность СД (рис.10):

$$\lambda = M_{\max} / M_{\text{НОМ}}$$

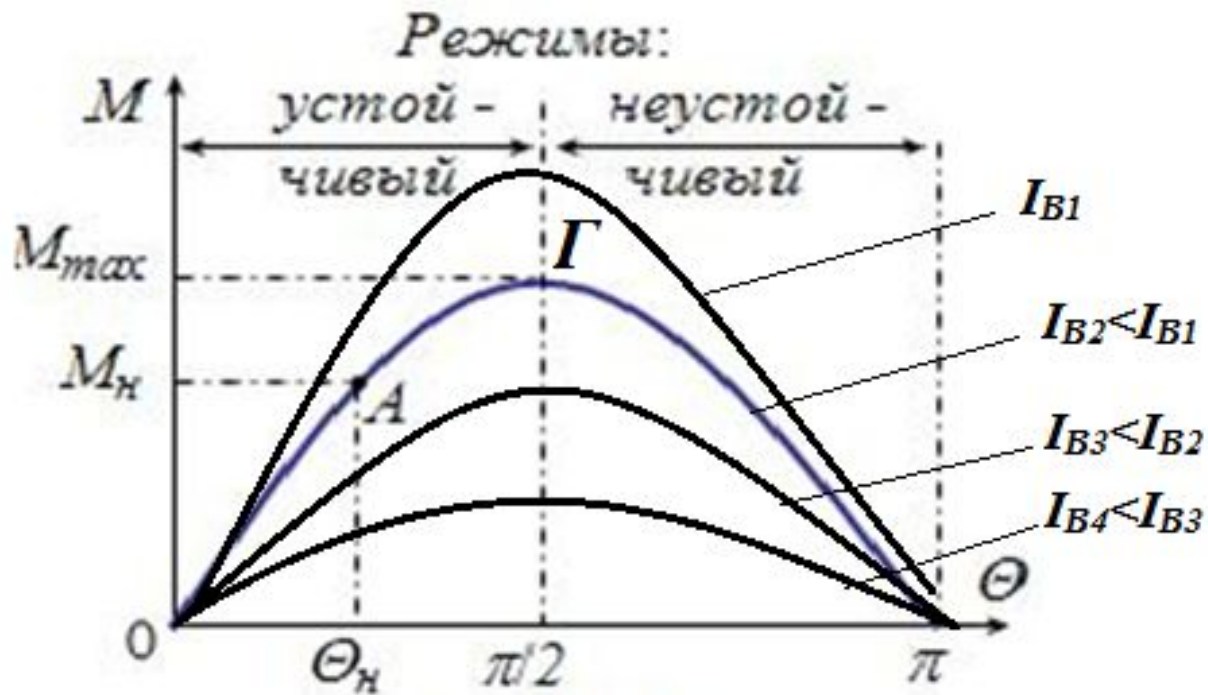


Рис. 9. Влияние тока возбуждения на устойчивую работу СД

Обычно перегрузочная способность СД $\lambda = 1,7 \div 3$,
что при номинальной нагрузке двигателя соответствует

$$\theta_{ном} = 30 \div 20 \quad \text{эл. град}$$

При изменениях нагрузки на валу СД меняется угол θ .

При этом ротор вследствие инерции вращающихся масс агрегата не сразу занимает положения, соответствующие новой нагрузке, а некоторое время совершает колебательные движения.

Таким образом, в СД, так же как и в СГ, имеют место колебания (физическая сущность этого явления изложена ранее).

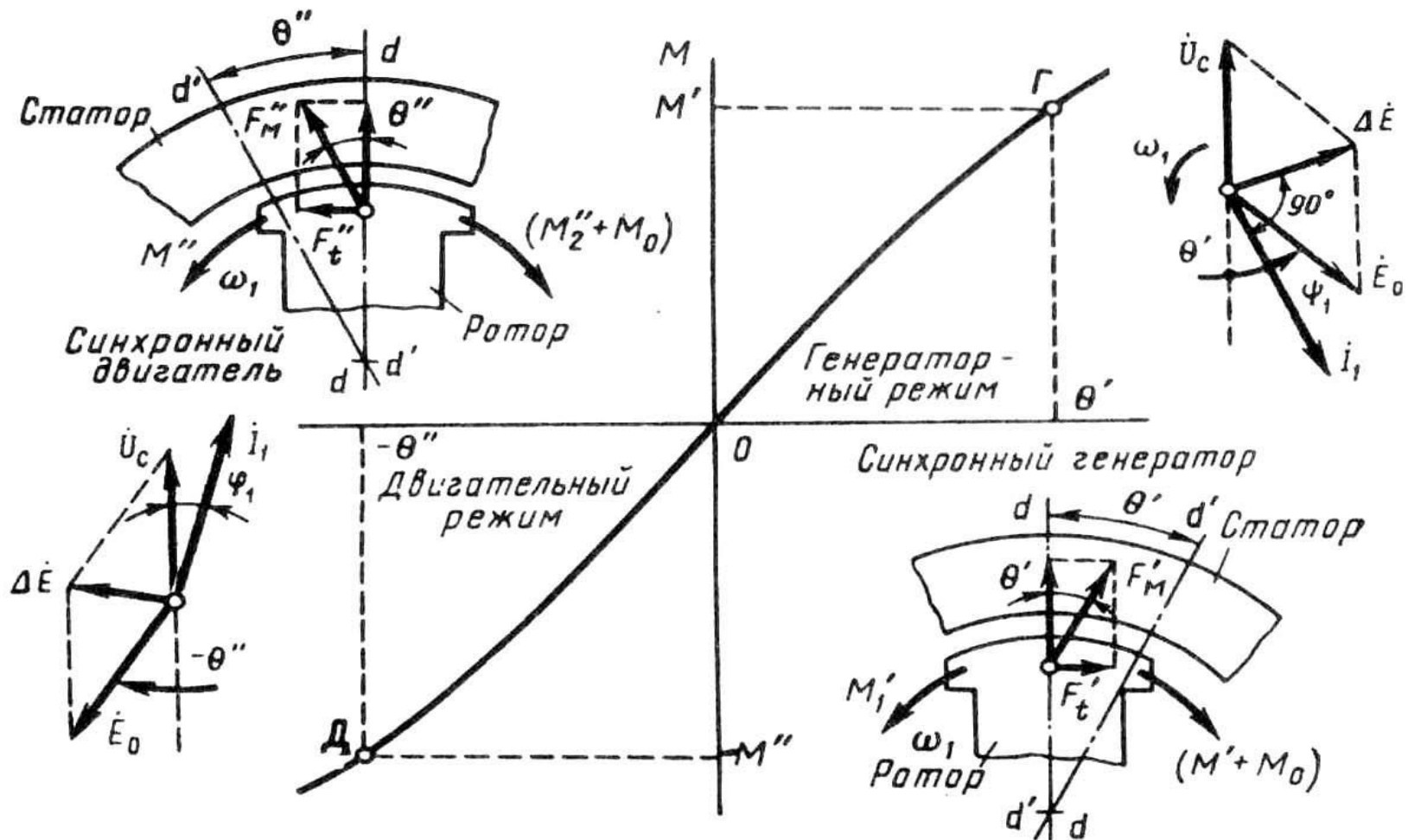


Рис 10. Переход СМ из генераторного режима в двигательный (отрезок ДГ – часть угловой характеристики, соответствующая устойчивой работе СМ).

Ось потока возбуждения: $d - d'$; ось потока статора $d'-d'$

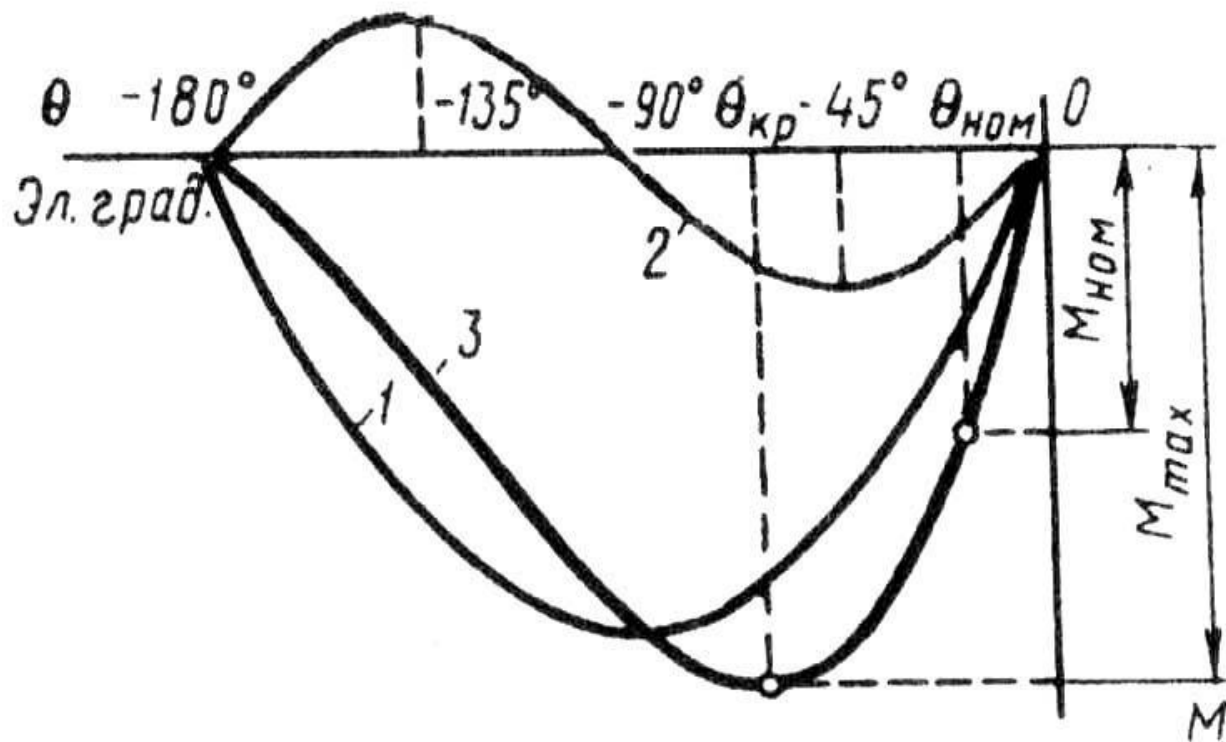


Рис. 11. Угловая характеристика СД: 1 – момент неявнополюсного СД, 2- реактивный момент, 3 – момент явнополюсного СД

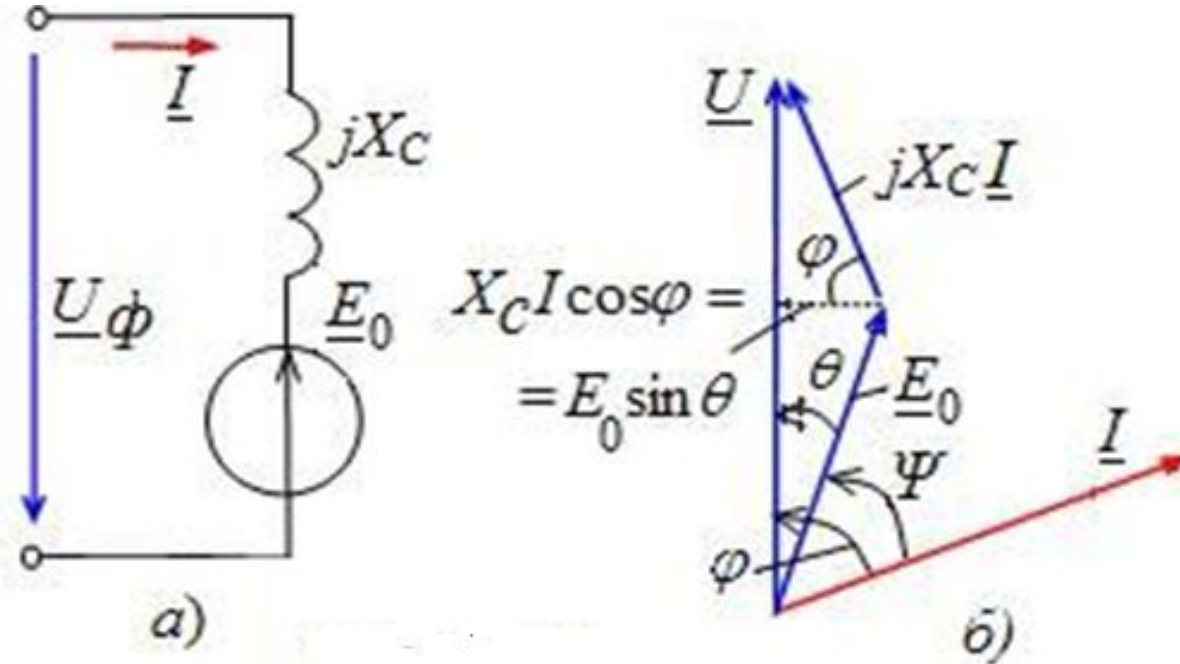
Все значения момента на угловой характеристике СД откладывают в отрицательном направлении оси ординат, так как при переходе СМ из генераторного режима в двигательный электромагнитный момент меняет свое направление.

Также отрицательной становится мощность СД, которая поступает из сети в машину, а не из машины в сеть, как это происходит в генераторном режиме.

Оперирование с отрицательными значениями мощностей и моментов крайне неудобно, поэтому при рассмотрении СД условно будем принимать моменты и мощности положительными (т.е. рассматривать в первом квадранте), помня при этом изложенное ранее о направлении этих параметров.

Вращающий момент, рабочие характеристики СД

В установившемся режиме момент сопротивления M_c на валу машины будет уравновешен вращающим электромагнитным моментом, развиваемым двигателем, т. е. $M_{эм} = M_c$.



$$\underline{U}_c = \underline{E}_0 + jX_{\text{син}} \underline{i}.$$

Рис.12. Схема замещения а) и векторная диаграмма б) одной фазы обмотки статора СД

Активное сопротивление обмотки якоря $Rя$ мало, поэтому в схеме замещения оставляют только ее индуктивное сопротивление $jXс$. Так как СД является приемником электрической энергии, то его противо-ЭДС E_0 направлена навстречу напряжению $U_ф$. Запишем уравнение электрического состояния фазы обмотки СД:

$$\underline{U}_ф = \underline{E}_0 + jXс\underline{I}$$

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма, изображенная на рис.12 , б. Вектор ЭДС \underline{E}_0 , который связывают с положением полюсов $N' - S'$ ротора, отстаёт на угол Θ от вектора фазного напряжения $\underline{U}_ф$ сети, с которым связано положение полюсов результирующего магнитного поля $N - S$ статора машины (рис.б).

Электромагнитная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{\text{эм}} = 3U_{\text{ф}} I \cos\varphi$$

Электромагнитный момент СД

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \omega_0 = 3U_{\text{ф}} I \cos\varphi / \omega_0 = 3U_{\text{ф}} E_0 \sin\Theta / \omega_0 X_c,$$

где $\omega_0 = 2\pi n_0/60$; $X_c I \cos\varphi = E_0 \sin\Theta$;
откуда $I \cos\varphi = E_0 \sin\Theta / X_c$ (рис.12, б)

Итак, электромагнитный момент СД:

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{max}} \sin\Theta,$$

где $M_{\text{max}} = 3U_{\text{ф}} E_0 / \omega_0 X_c$

Уравнение для фазы обмотки статора двигателя

Уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа для фазы обмотки статора двигателя, будет иметь следующий вид:

$$\dot{U}_c = \dot{E}_0 + jX_{\text{син}} \dot{I}.$$

Из данного уравнения следует, что противо-ЭДС E_0 магнитного поля ротора и падение напряжения на индуктивном синхронном сопротивлении фазы уравновешивают напряжение сети U_c (предполагается, что активное сопротивление фазы мало и им пренебрегли).

Пояснения к векторной диаграмме рис.12

В двигателе ток фазы I протекает от действия фазного напряжения U_c , приложенного к обмотке статора от сети, и направлен навстречу ЭДС E_0 , которая индуцируется магнитным полем ротора (рис.12,а).

Трехфазная обмотка статора при подключении к ней питания создает вращающееся магнитное поле статора.

Магнитный поток этого поля является потоком якоря и индуцирует в фазе обмотки статора ЭДС реакции якоря и рассеяния.

В результате приложенного к ротору момента сопротивления нагрузки M_c , ось магнитного потока ротора Φ_0 отстает на угол θ от оси результирующего магнитного потока $\Phi_{\text{рез}}$.

Поэтому в двигательном режиме вектор ЭДС E_0 отстает по фазе на угол θ от вектора напряжения сети U_c (рис.12,б).

При построении векторной диаграммы двигателя вектор \dot{U}_c принимают за исходный.

Вектор тока \dot{I} отстает по фазе на 90° от вектора $jX_{\text{син}} \dot{I}$.

U–образные характеристики СД

В процессе работы СД в его обмотке статора наводятся

ЭДС, сумма которых $\sum E$ приблизительно равна

подведенному к обмотке статора напряжению сети U_C .

Эта сумма ЭДС эквивалентна результирующему магнитному полю, вызванному действием

двух МДС : МДС возбуждения $F_B \equiv I_B$ и МДС статора

$$F_1 \equiv I_1$$

При неизменном напряжении сети $U_C \approx -\sum E$

результатирующее магнитное поле постоянно. Поэтому при изменении МДС возбуждения F_B (изменении тока возбуждения I_B) МДС статора F_1 изменяется таким образом, чтобы их совместное действие оставалось неизменным, т.е. чтобы оставалось неизменным результирующее магнитное поле СД.

Это изменение МДС может происходить только за счёт изменения величины и фазы тока статора I_1 , т.е. за счёт изменения реактивной составляющей тока статора I_d .

На рис.13 показаны U-образные характеристики для трёх вариантов активной мощности: $P_2 = 0$, $P_2 = 0,5P_{2ном}$, $P_2 = P_{2ном}$

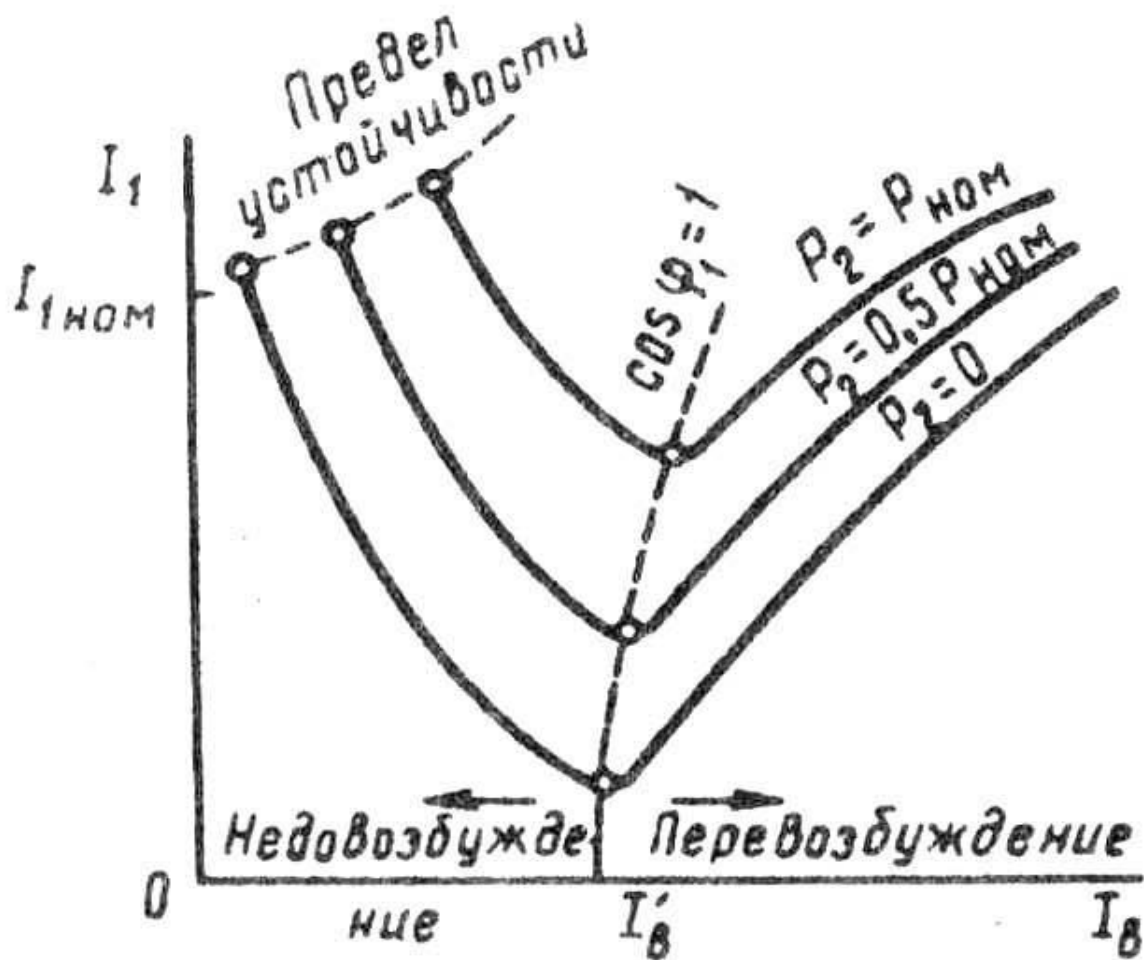
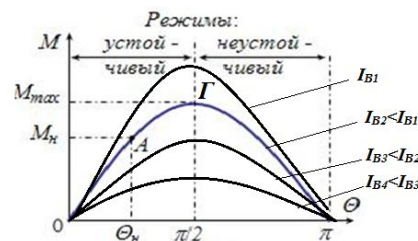


Рис.13. U-образные характеристики СД

Необходимо иметь в виду, что при постепенном уменьшении тока возбуждения наступает такое минимальное его значение, при котором магнитный поток обмотки возбуждения оказывается настолько ослабленным, что СМ выпадает из синхронизма (будь то генератор или двигатель) — нарушается магнитная связь между возбужденными полюсами ротора и вращающимся полем статора.

Если соединить все точки минимально допустимых значений тока возбуждения на U-образных характеристиках (штриховая линия в левой части рис.), то получим линию предела устойчивости работы СМ при недовозбуждении.



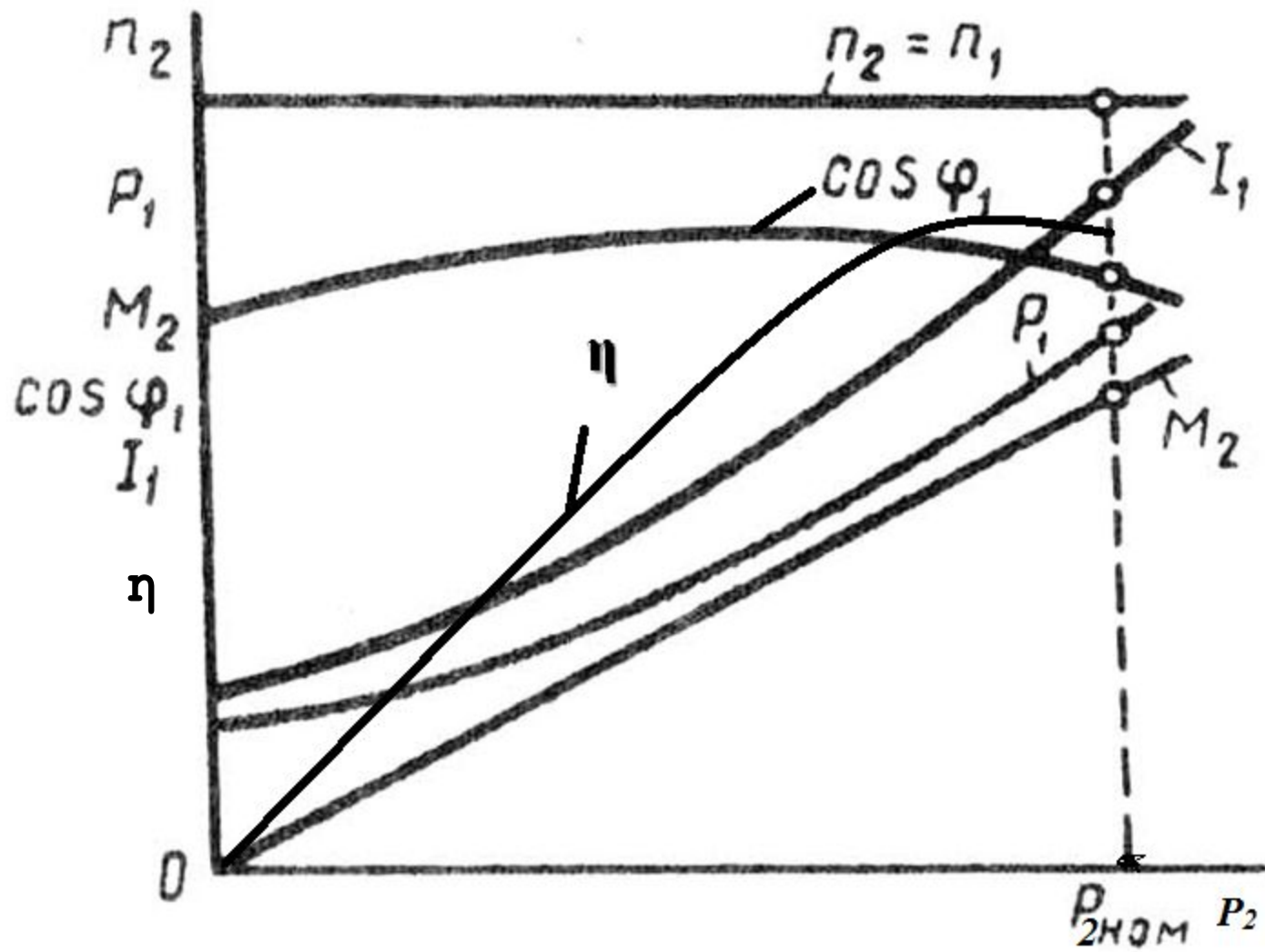


Рис.14. Рабочие характеристики СД

Рабочие характеристики – это зависимости:

1. потребляемой мощности P_1 ,
2. потребляемого от сети тока I_1 ,
3. вращающего момента M_2 ,
4. $\cos\varphi$
5. КПД (η)

от полезной мощности P_2 ,

Характеристики изображены на рис. 14 и соответствуют случаю, когда на холостом ходу $\cos\varphi=1$.

При постоянном токе возбуждения ($I_B = \text{const}$) увеличение нагрузки на валу СД вызывает уменьшение $\cos\varphi$, что объясняется увеличением реактивного падения напряжения при возрастании потребляемого от сети тока I_1 .

КПД с ростом нагрузки быстро увеличивается и достигает максимума, когда не зависящие от нагрузки механические потери и потери в стали становятся равными зависящим от нагрузки потерям в меди обмоток ($I_1^2 * R_1$). Дальнейшее увеличение нагрузки снижает КПД.

Потребляемый статором ток I_1 , на х.х. мал. При увеличении нагрузки возрастает почти пропорционально нагрузке.

Вращающий момент M_2 , развиваемый на х.х. мал, поскольку механические потери невелики. При увеличении нагрузки, благодаря постоянству скорости СД, момент возрастает почти линейно.

P_1 увеличивается быстрее, чем P_2 , т.к. сказывается увеличение эл.потерь, которые пропорциональны квадрату тока I_1 .

Механическая характеристика двигателя

При увеличении момента сопротивления M_c угол рассогласования Θ , механическая мощность P_2 и потребляемая из сети электроэнергия будут расти. Однако, частота вращения ротора будет оставаться постоянной, равной n_0 . Увеличение момента M_c , при котором угол $\Theta \geq \pi/2$ (перегрузка), ведет к выпадению двигателя из синхронизма и остановке ротора. При этом $E_0 = 0$ и ток якоря резко увеличивается, т. к.

$$I = (U_\phi - E_0)/jx_c = U_\phi/jx_c.$$

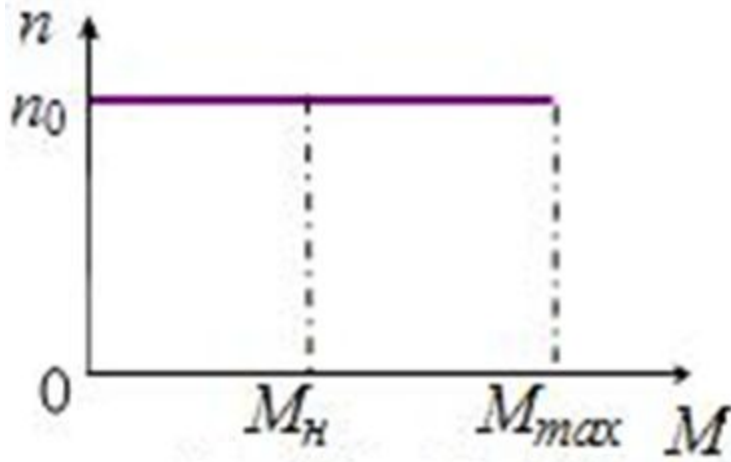


Рис.15

Итак, при угле $\Theta < \pi/2$ механическая характеристика СД $n_0 = f(M)$ абсолютно жесткая (рис.11). Она представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс. Такая зависимость определяется характерной особенностью СД: их ротор может вращаться только с синхронной частотой $n_0 = 60f_1/p$.

Сравнение АД с СД

Достоинства СД:

1. $n = \text{const}$ и не зависит от момента нагрузки;
2. Максимальный момент пропорционален напряжению
3. ($M_{\text{макс}} \equiv U$), а в АД максимальный момент пропорционален квадрату напряжения ($M_{\text{макс}} \equiv U^2$),
поэтому СД менее чувствителен к колебаниям напряжения;

СД могут служить генераторами реактивной мощности, которая нужна АД, что снижает потребление её от СГ станции. При этом:

увеличивается $\cos\varphi$ сети ,

сокращаются размеры двигателя, т.к. его ток становится меньше, чем ток в АД той же мощности .

N.B.

Выражение для момента АД

$$M = \frac{p \times m_1 \times \frac{r_2'}{S} \times U_1^2}{\omega_1 \times \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + \left(x_1 + x_2' \right)^2 \right]}$$

Выражение для момента СД

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1E_{10}}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1E_{10}}{\omega_1 x_c} \sin \theta$$

Основные недостатки СД:

- 1. Сложность конструкции;**
- 2. Сравнительная сложность пуска в ход;**
- 3. Трудности с регулированием частоты вращения, которую можно изменять, меняя частоту питающего напряжения f_1 .**
Из – за выше перечисленного СД менее выгоден, чем АД при мощности до 100 кВт,
но при большей мощности, когда важен большой $\cos\phi$ и малый габарит, СД предпочтительней АД.