

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

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

$\tau$  – 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.

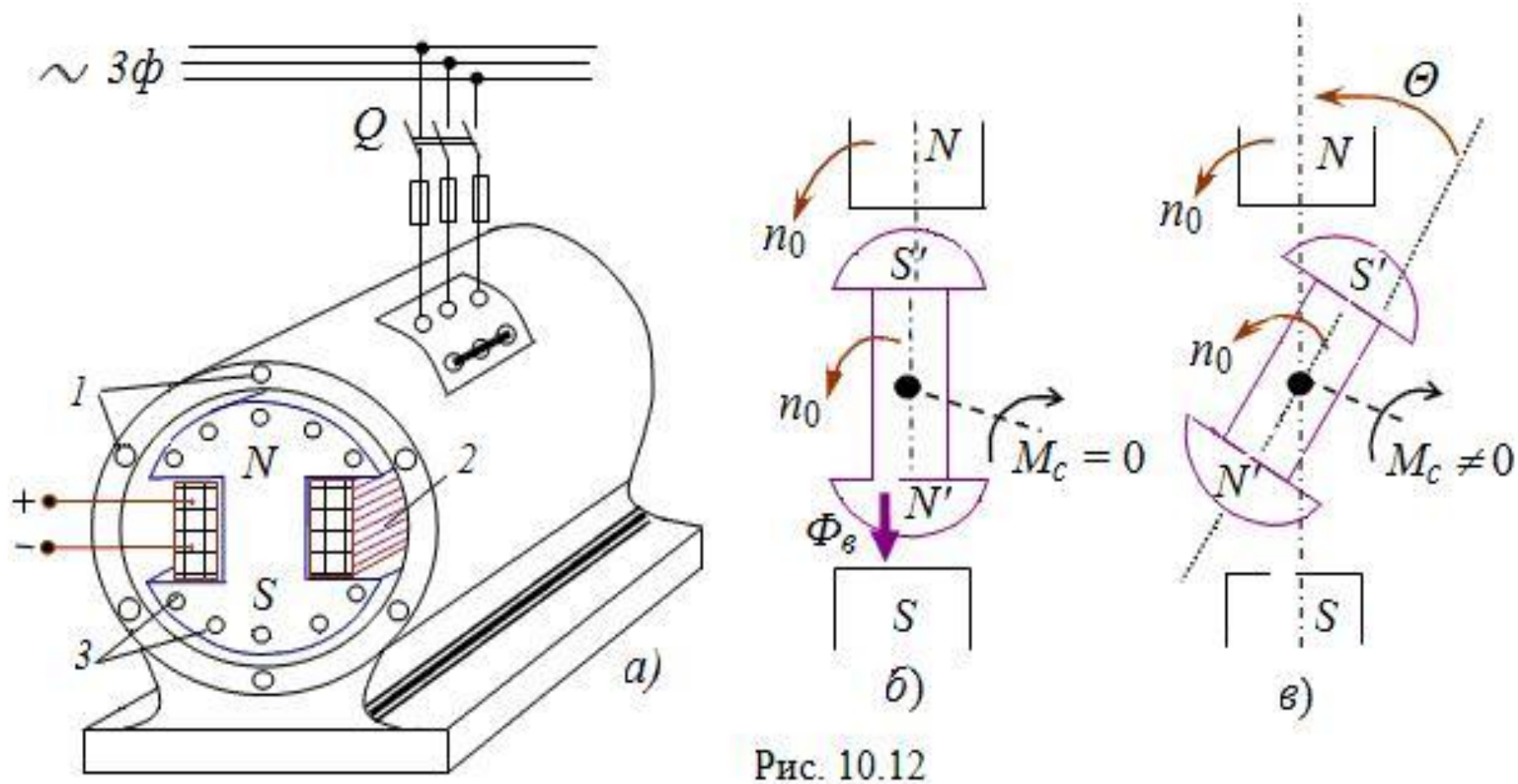


Рис. 10.12

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.

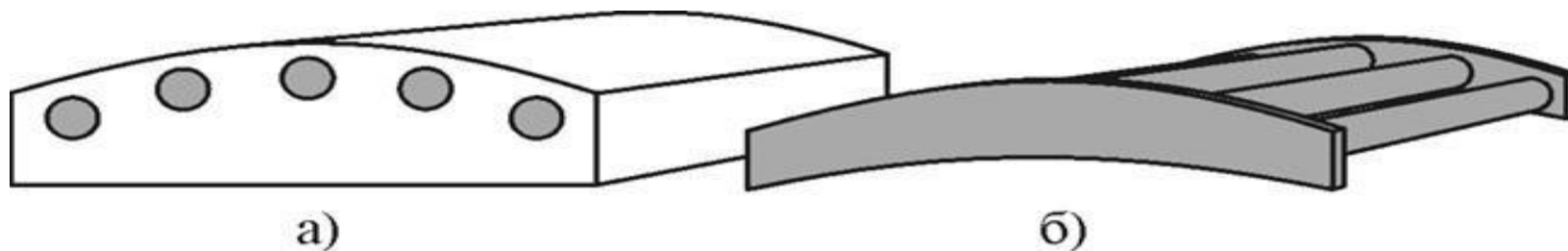


Рис.2. Элементы ротора СМ: а) башмак полюса ротора с 5 стержнями; б) короткозамкнутая обмотка ротора с кольцами

## 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?**

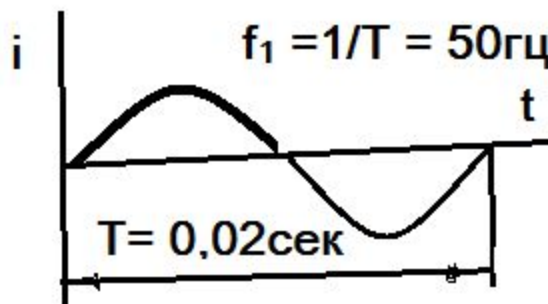


Рис.3

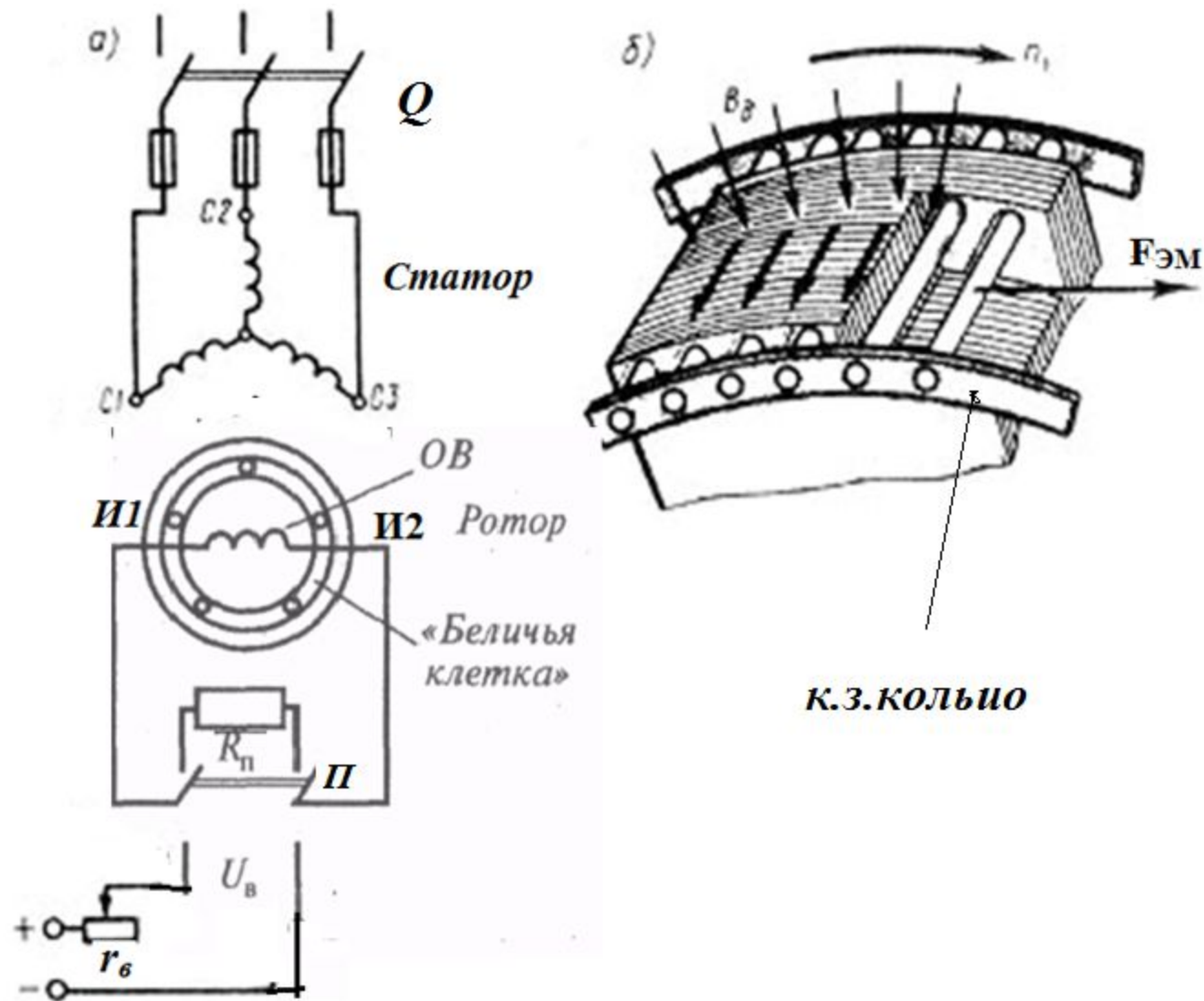


Рис.4. Асинхронный пуск СД: а) электрическая схема; б) образование электромагнитной силы  $F_{ЭМ}$

# Последовательность операций при пуске СД

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

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  $F_{ЭМ}$ , 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).

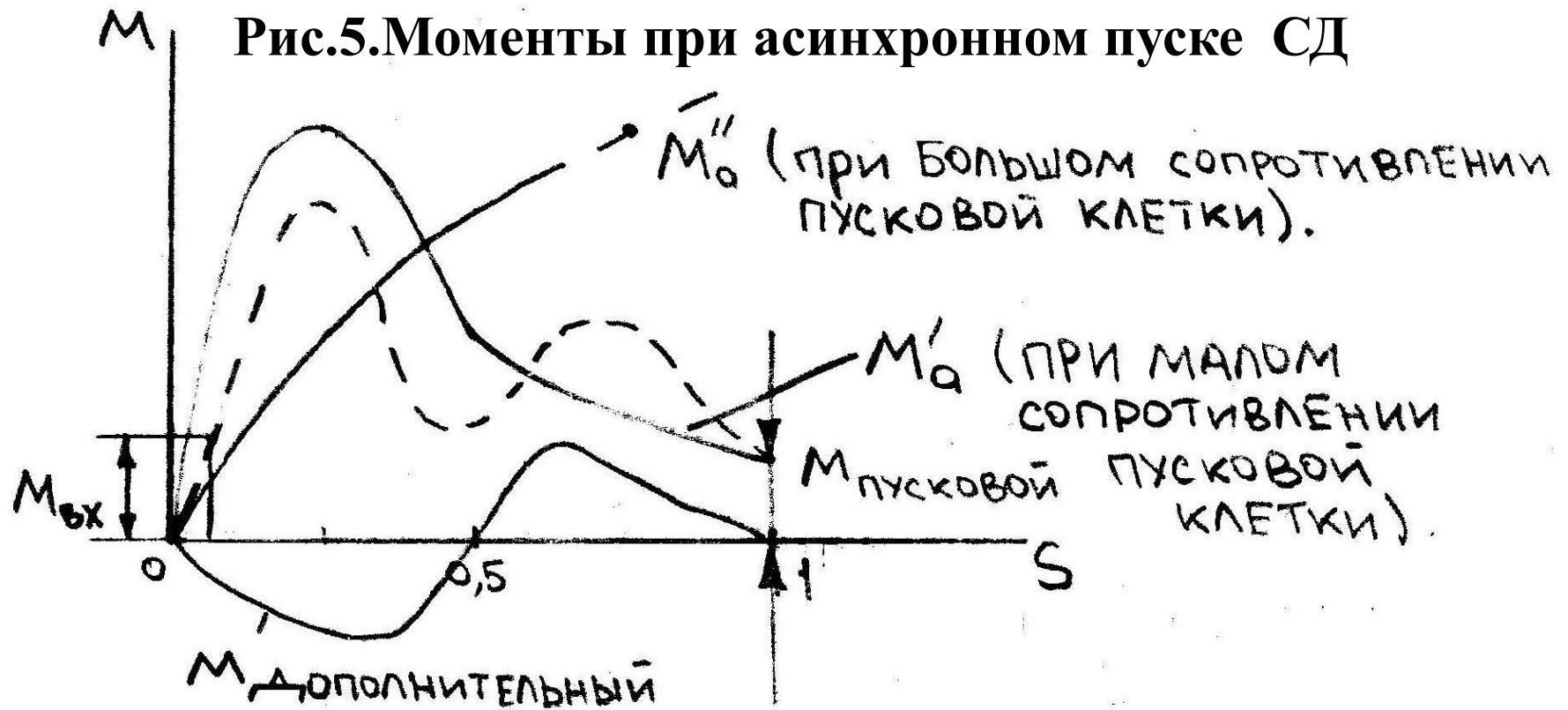


**3. По достижении подсинхронной скорости ( $n'_1 = 0,95n_1$ ) переключение зажимов *И1* и *И2* ОВ с сопротивления  $R_{\Pi}$  на зажимы возбuditеля осуществляют переключателем *П* (см. рис.4, *а*) для питания обмотки ротора постоянным током, величину которого регулируют реостатом  $r_B$ .**

**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  $\theta$ , 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  $P_2$

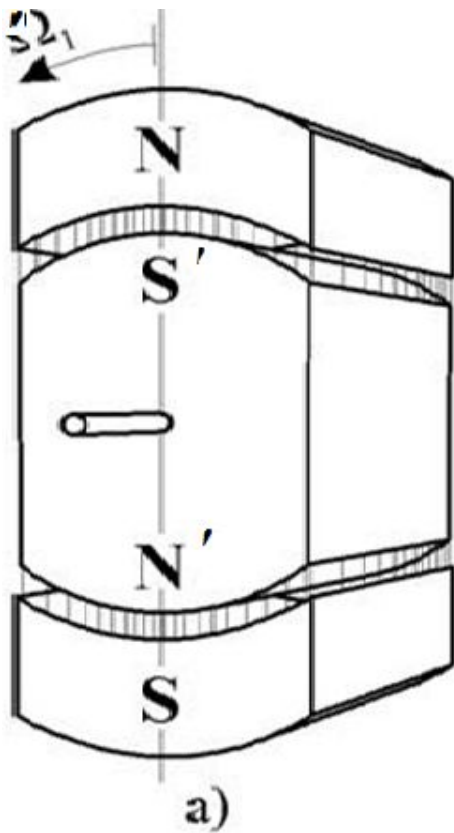
Механическая характеристика - зависимость частоты вращения от момента  $n_2 = f(M)$

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

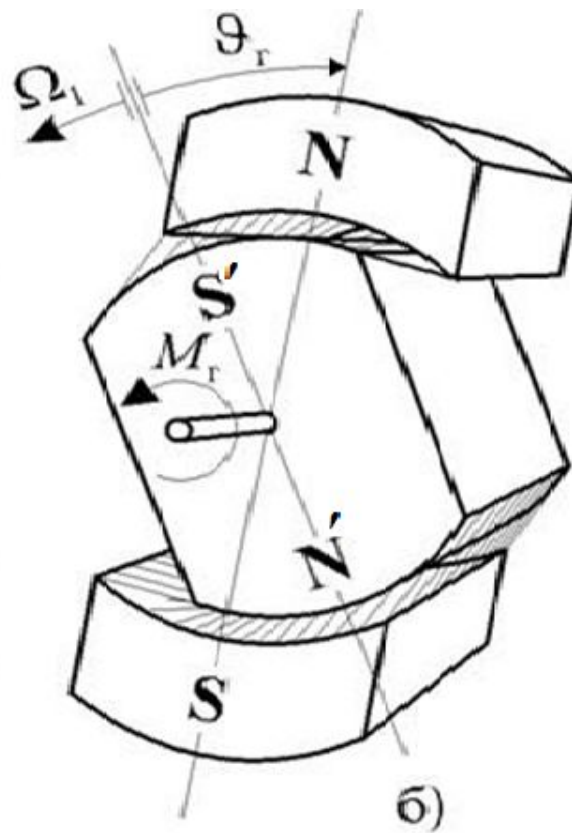
**В отличие от АД, в котором рост нагрузки на валу приводит к уменьшению скорости вращения ротора, в СД увеличение механической нагрузки приводит к увеличению угла нагрузки  $\theta$  между полюсами вращающихся полей статора и ротора при сохранении постоянства скорости вращения ротора.**

**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.**

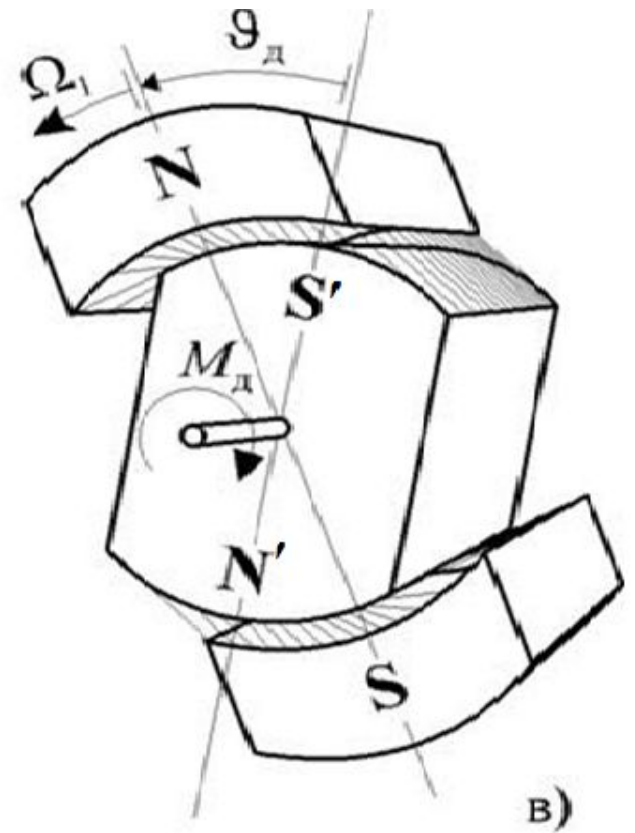
***Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например, при записи и воспроизведении звука.***



Холостой ход



Генератор



Двигатель

Рис.6 Угол нагрузки  $\theta$  при разных режимах работы СМ

## Угловая характеристика СД

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

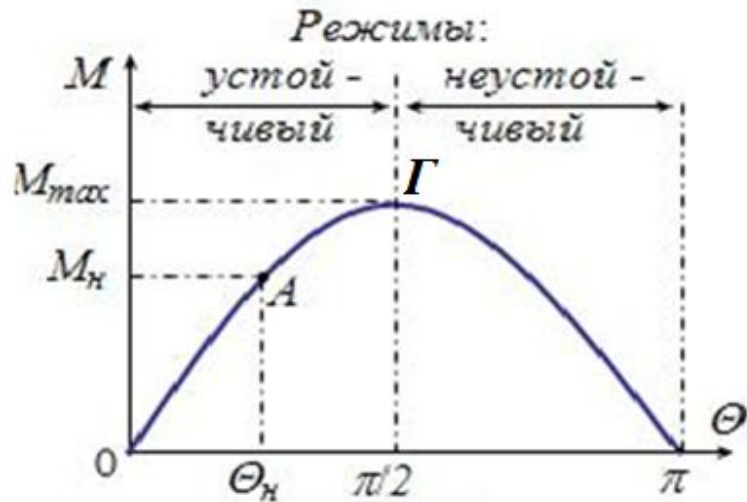


Рис.7

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

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  $2\theta$ :

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



N.B

Момент для неявнополюсной СМ – кривая 1:

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

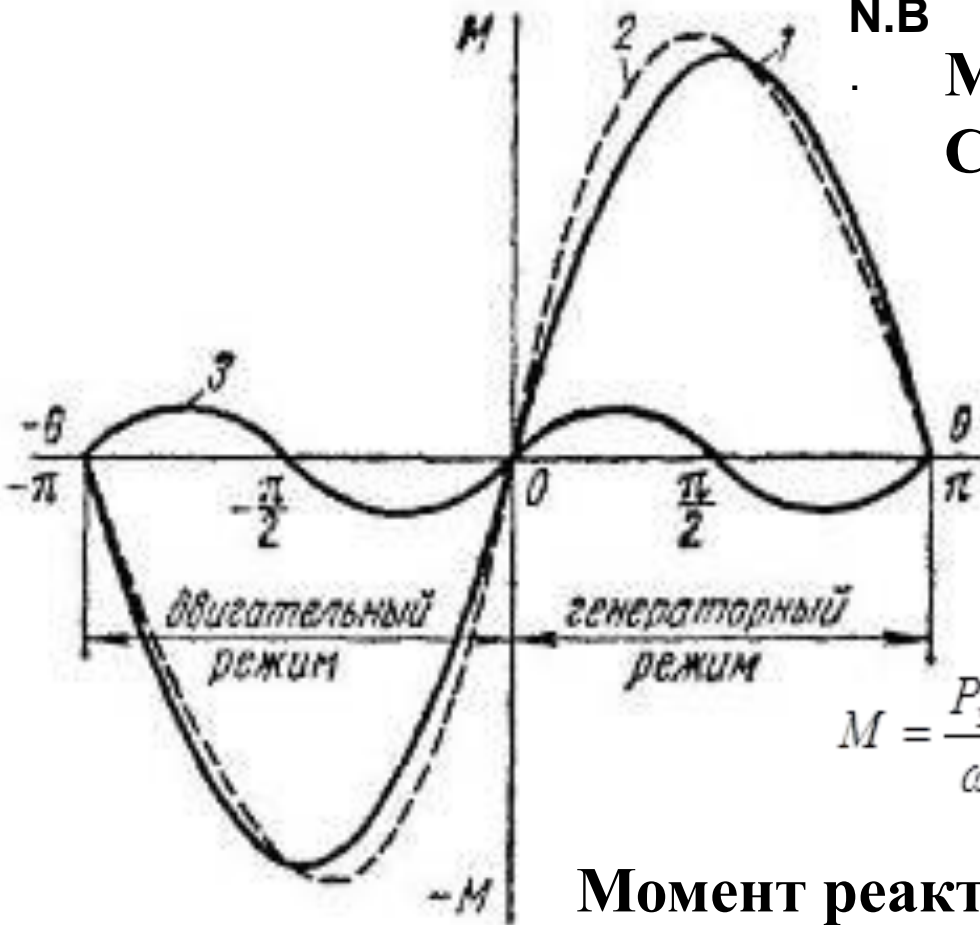
Момент для явнополюсной СМ – кривая 2:

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

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):**

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

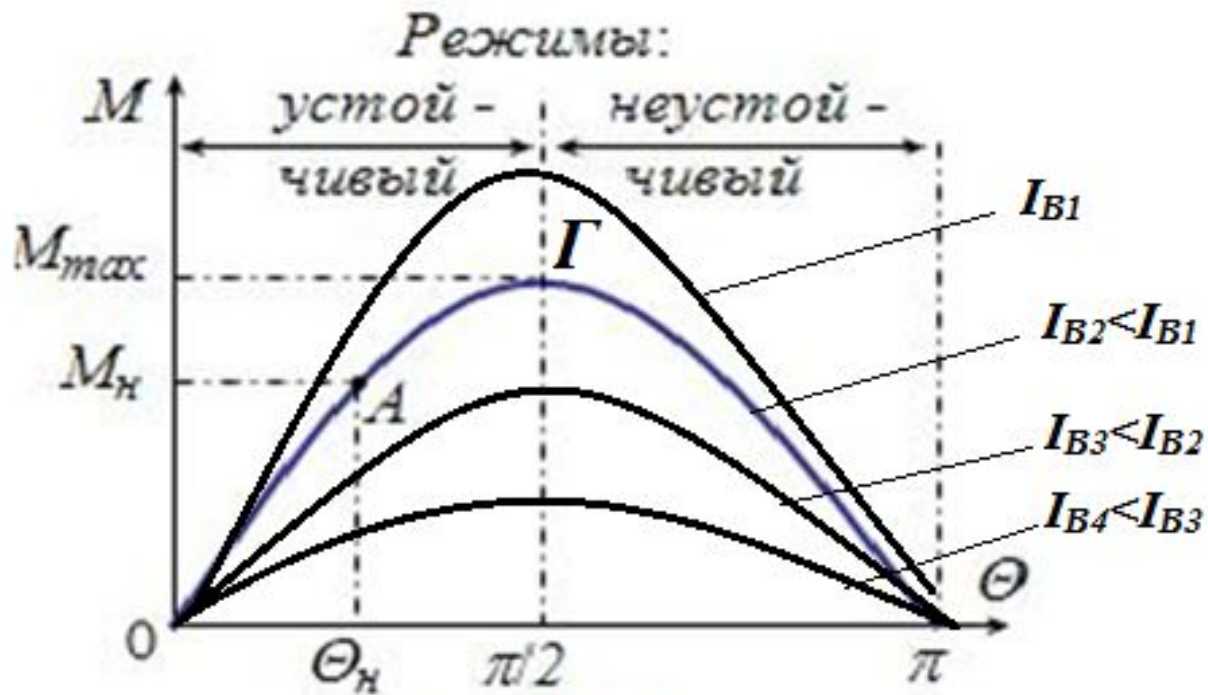


Рис. 9. Влияние тока возбуждения на устойчивую работу СД

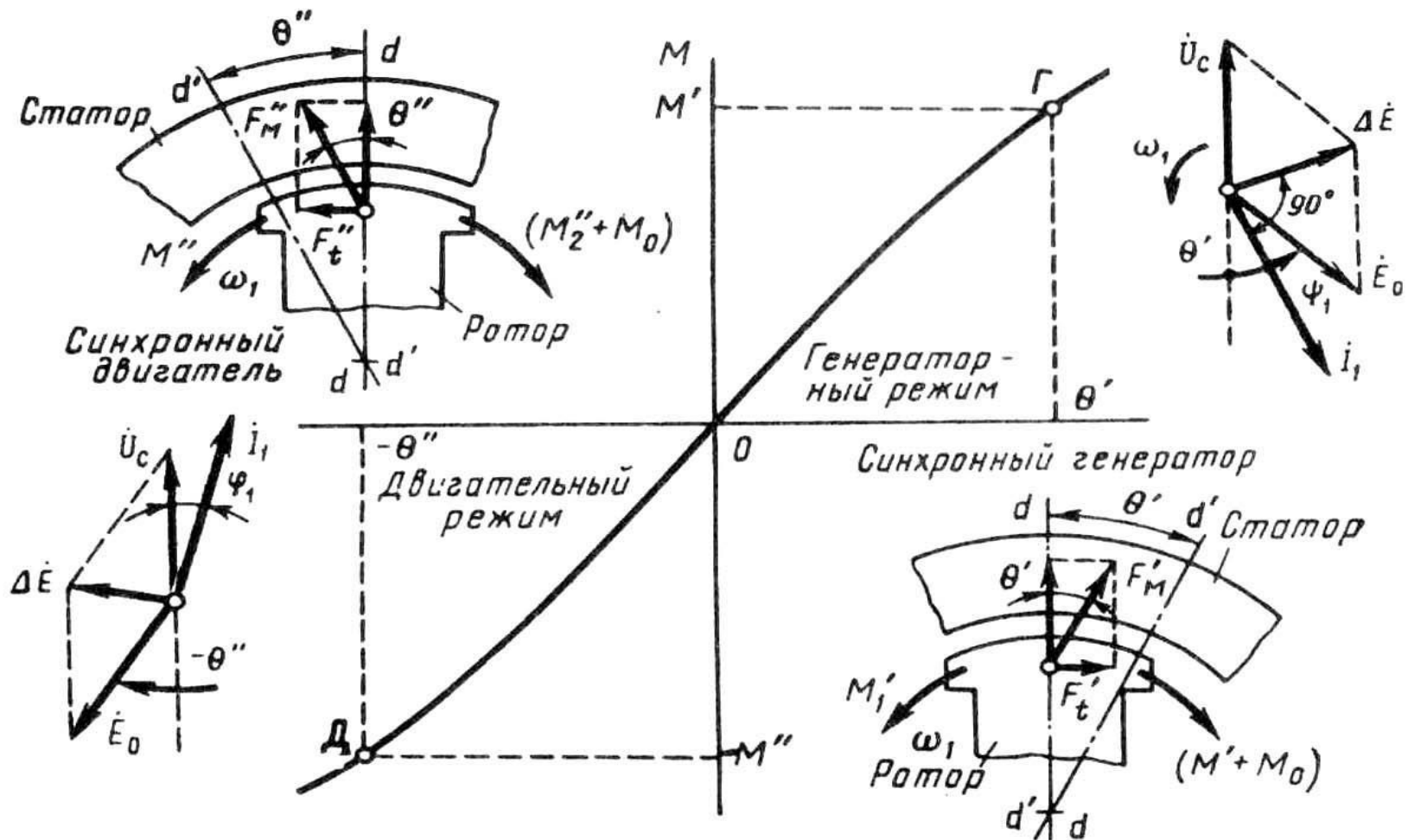
Обычно перегрузочная способность СД  $\lambda = 1,7 \div 3$  ,  
что при номинальной нагрузке двигателя соответствует

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

При изменениях нагрузки на валу СД меняется угол  $\theta$ .

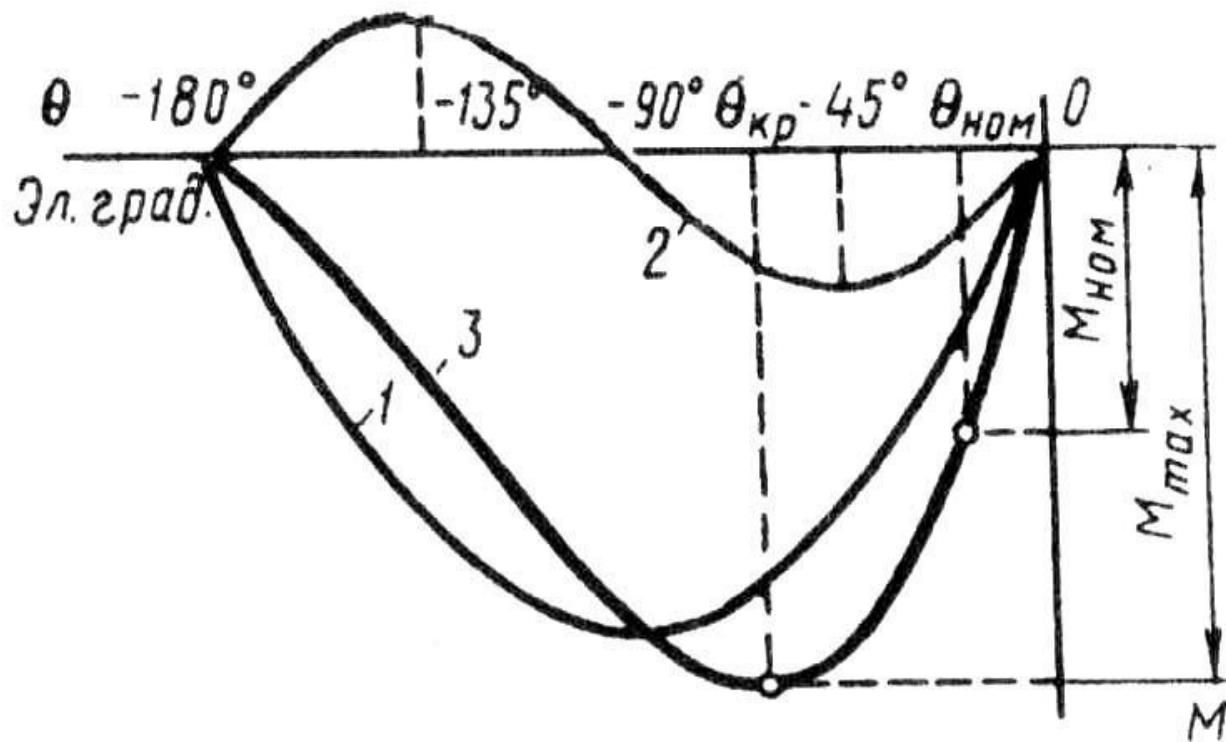
При этом ротор вследствие инерции вращающихся масс агрегата не сразу занимает положения, соответствующие новой нагрузке, а некоторое время совершает колебательные движения.

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**

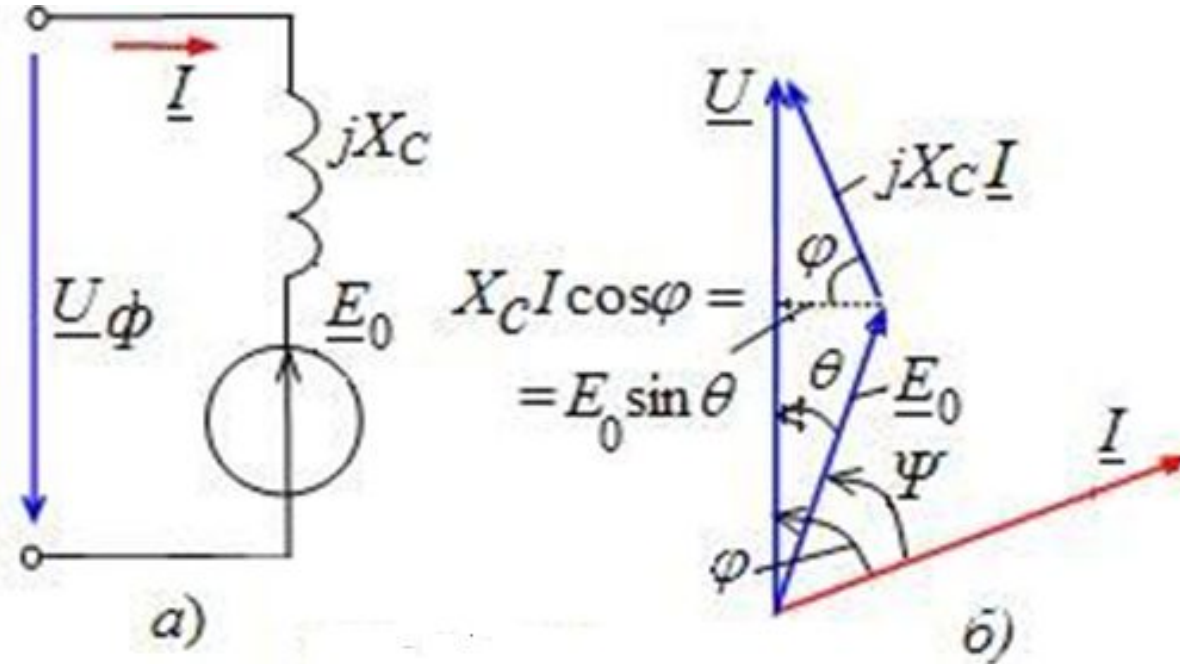
**Все значения момента на угловой характеристике СД откладывают в отрицательном направлении оси ординат, так как при переходе СМ из генераторного режима в двигательный электромагнитный момент меняет свое направление.**

**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  $\Theta$  от вектора фазного напряжения  $\underline{U}_ф$  сети, с которым связано положение полюсов результирующего магнитного поля  $N - S$  статора машины (рис.6).**

**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  $\Phi_0$  отстает на угол  $\theta$  от оси результирующего магнитного потока  $\Phi_{\text{рез}}$ .**

**Поэтому в двигательном режиме вектор ЭДС  $E_0$  отстает по фазе на угол  $\theta$  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  $90^\circ$  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:  $P_2 = 0$ ,  $P_2 = 0,5P_{2ном}$ ,  $P_2 = P_{2ном}$

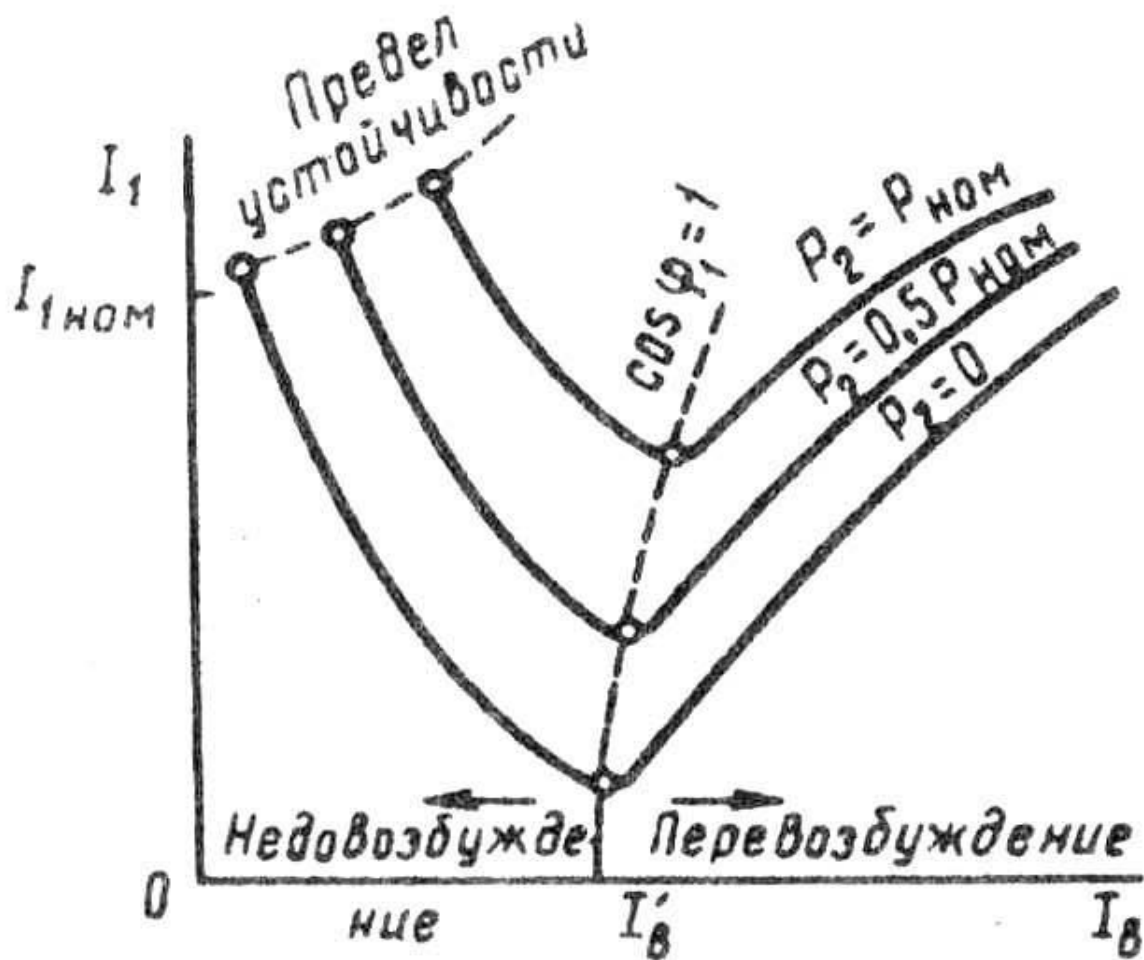
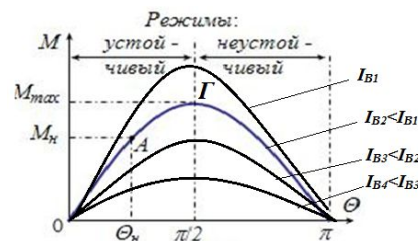


Рис.13. U-образные характеристики СД

**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.**





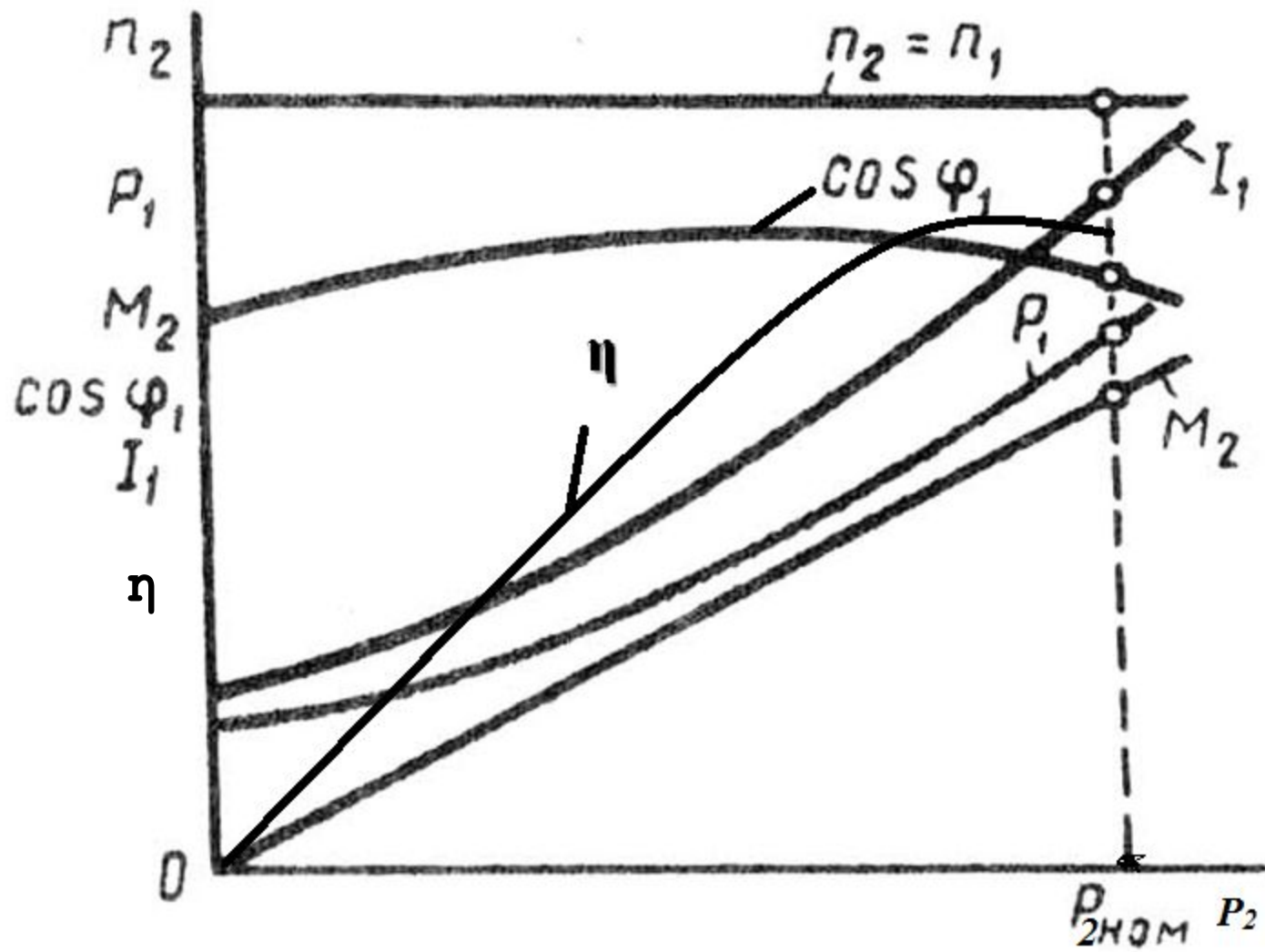


Рис.14. Рабочие характеристики СД

**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 ( $\eta$ )

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  $\Theta$ , 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.

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

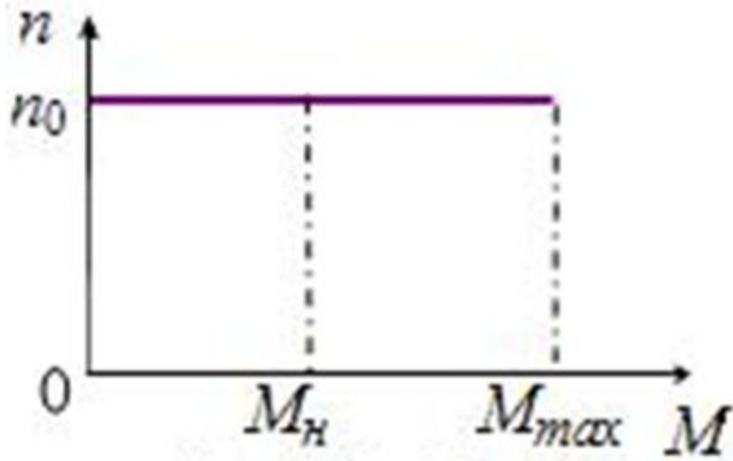


Рис.15

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 .

**Н.В.**

**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 cosφ и малый габарит, СД предпочтительней АД.**