

Машины переменного тока ч.2 (продолж.)

Синхронные машины (СМ) (продолж.).

Реактивный синхронный двигатель(РСД)

Вывод формулы для момента.

Реактивный момент СМ

Особенности конструкции РСД

Принцип работы РСД

Достоинства РСД

Выводы по теме РСД

Гистерезисные двигатели(ГД)

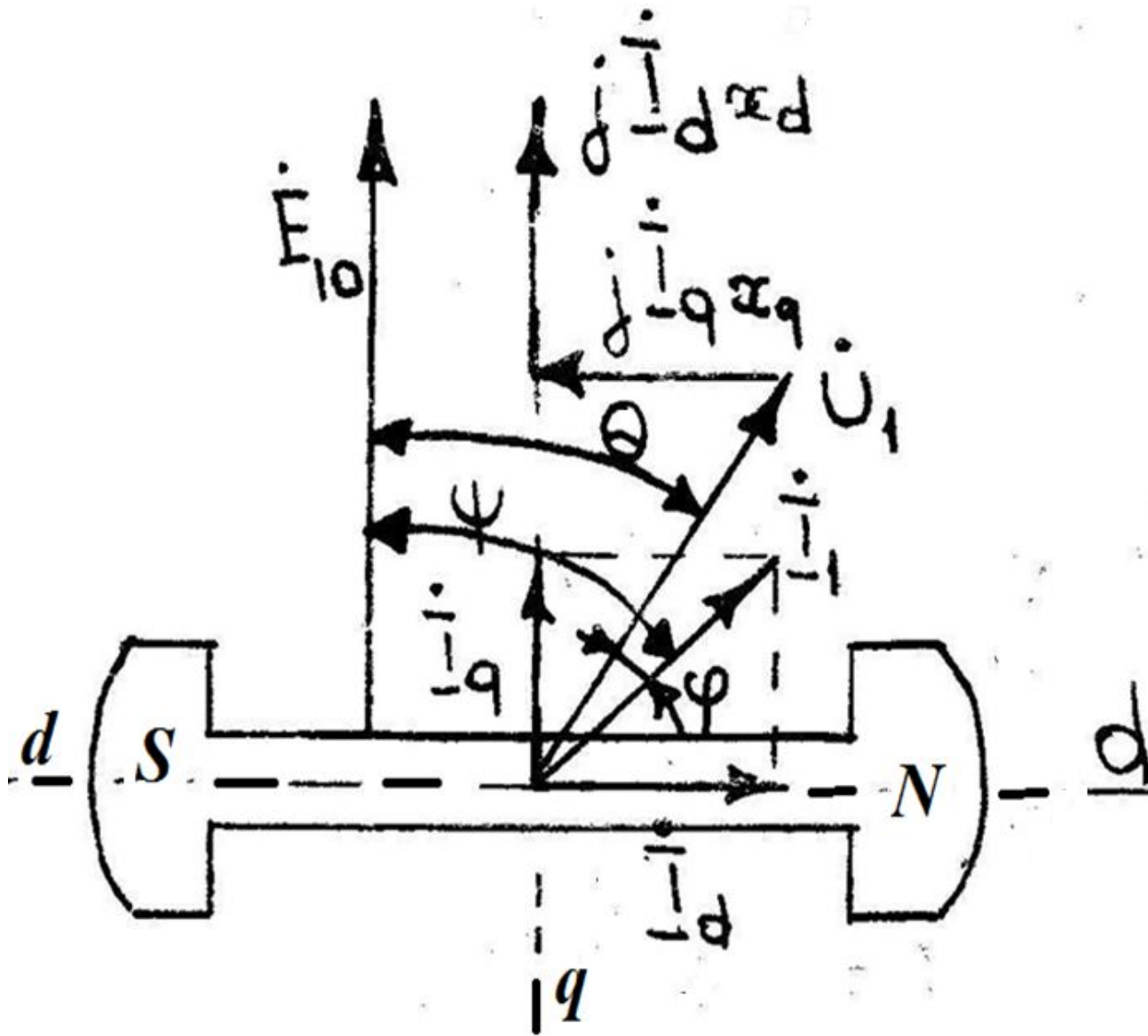
Области применения ГД

Особенности конструкции ГД

Образование момента в ГД

Достоинства и недостатки ГД

Вывод формулы для момента явнополюсной СМ



$$\phi = \psi - \theta$$

$$U_1 = E_{10} + E_{ad} + E_{aq} + E_p - I_1 r_1$$

$$E_{ad} = -jI_1 x_d$$

$$E_{aq} = -jI_1 x_q$$

$$U_1 + jI_1 x_d + jI_1 x_q = E_{10}$$

$$P_{\text{ЭМ}} = P + mI_1^2 r_1 \quad \text{полагаем } r_1 = 0$$

$$P_{\text{ЭМ}} = mU_1 I_1 \cos \varphi$$

$$\varphi = \psi - \theta \quad (1)$$

$$P_{\text{ЭМ}} \cong P$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ЭМ}} &= mU_1 I_1 \cos(\psi - \theta) = mU_1 (I_1 \sin \psi \sin \theta + I_1 \cos \psi \cos \theta) = \\ &= mU_1 (I_d \sin \theta + I_q \cos \theta) \quad (2) \end{aligned}$$

Для определения токов I_d и I_q спроектируем все векторы на соответствующие оси q и d .

$$E_{10} = U_1 \cos \theta + I_d x_d \quad (3)$$

$$U_1 \sin \theta = I_q x_q$$

$$I_d = \frac{E_{10} - U_1 \cos \theta}{x_d} \quad (4)$$

$$I_q = \frac{U_1 \sin \theta}{x_q}$$

Подставив (4) в (2), получим:

для явнополюсной конструкции СМ

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (5)$$

Разделив на ω_1 , получим момент:

Н.В. Выражение для момента СД

а) явнополюсной конструкции: здесь два момента – основной и реактивный

$$M_{ЭМ} = \underbrace{\frac{mU_1 E_{10}}{\omega_1 x_d} \sin \theta}_{\text{Основной } M_{ОСН}} + \underbrace{\frac{mU_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta}_{\text{Реактивный } M_P}$$

б) неявнополюсной конструкции: здесь один момент – основной

$$M_{ЭМ} = \frac{mU_1 E_{10}}{\omega_1 x_c} \sin \theta$$

Конструкция синхронного реактивного двигателя (СРД)

Статор СРД бывает с распределенной или с сосредоточенной обмоткой и состоит из корпуса (1) и сердечника с обмоткой (2).



**Рис.1. Статор СРД с
распределенной обмоткой**

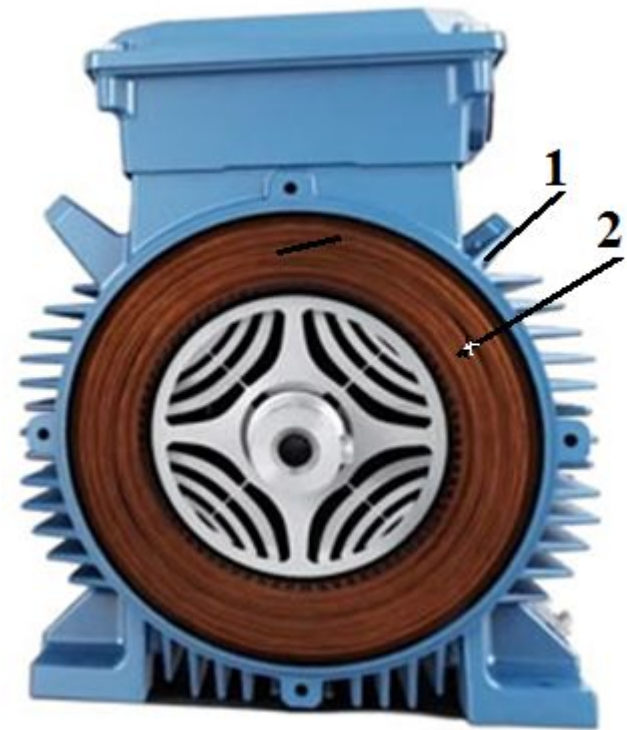


Рис.2. Общий вид СРД

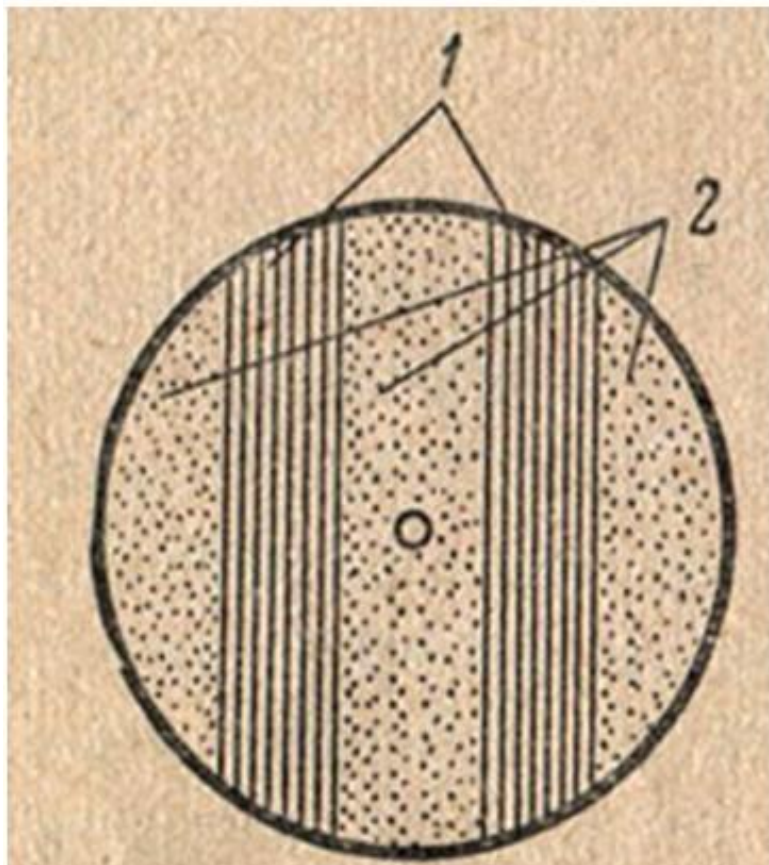


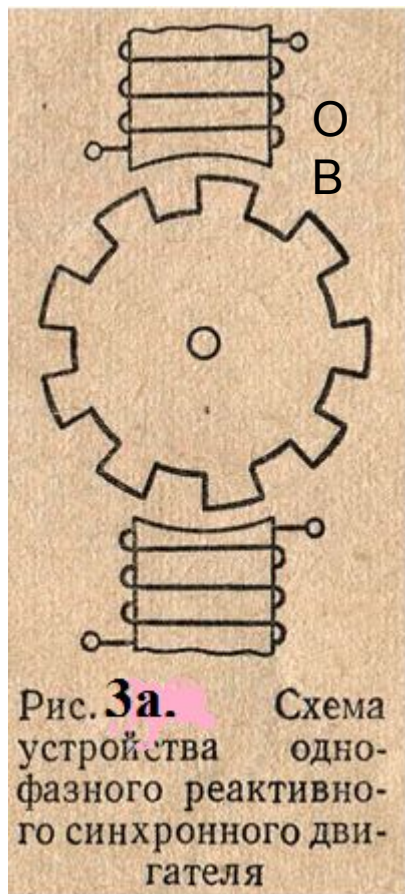
Рис.3 Схема устройства ротора реактивного синхронного двигателя:

1 — мягкая сталь,
2 — алюминий

Ротор РСД должен иметь явно выраженные полюсы. При очень малых мощностях ротор делают цилиндрическим из алюминия, в который при отливке закладывают стержни из мягкой стали, выполняющие функцию явно выраженных полюсов (рис.3).

Цилиндрическая форма ротора упрощает его обработку и балансировку, снижает потери на трение о воздух при работе машины, что весьма существенно для двигателей очень малых мощностей.

В РСД вращающий момент создается вследствие стремления ротора ориентироваться в магнитном поле так, чтобы магнитное сопротивление для этого поля было наименьшим.



Поэтому ротор всегда занимает такое положение в пространстве, при котором магнитные линии вращающегося магнитного поля статора замкнутся через сталь ротора и ротор будет вращаться синхронно с магнитным полем статора.

Иными словами, намагниченный ротор стремится стать по направлению потока вращающегося поля (подобно магнитной стрелке компаса).

Наряду с трехфазными широко используют и однофазные СРД, принципиальное устройство которых показано на рис. 3а.

На полюсных сердечниках, собранных из листовой стали, располагают обмотку возбуждения (ОВ), которую включают в сеть однофазного переменного тока. ОВ создаёт переменный магнитный поток.

Ротор выполнен из стали в виде диска, на поверхности которого имеются зубцы (выступы). Вращающий момент в таком двигателе создается в результате того, что при увеличении магнитного потока магнитные линии, стремясь замкнуться по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, притягивают зубец ротора к полюсу.

При уменьшении магнитного потока ротор по инерции подвигается далее и при последующем возрастании магнитного потока притягивается следующий зубец.

Таким образом, вращающий момент однофазного синхронного двигателя не остается постоянным и направленным в одну сторону, а непрерывно пульсирует, что является причиной неравномерного, толчкообразного хода двигателя. Для устранения этого недостатка роторы таких двигателей выполняют массивными. Используется также эластичное крепление статора в корпусе машины.

Число зубцов ротора соответствует числу полюсов; зубцы ротора определяют скорость его вращения. За один период изменения тока под полюсом проходит два зубца и число оборотов ротора в минуту находят из следующего выражения:

$$n = \frac{60f_1}{z} = \frac{120f_1}{z},$$

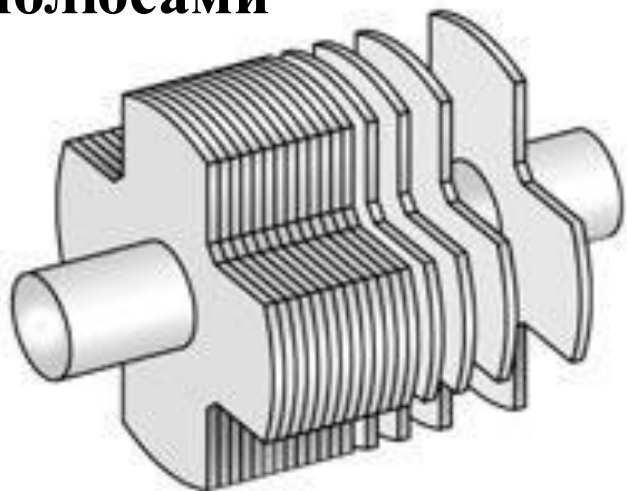
где z — число зубцов ротора;
 f_1 — частота тока сети

Число зубцов ротора должно быть нечетным во избежание «магнитного прилипания», при котором ротор не поворачивается.

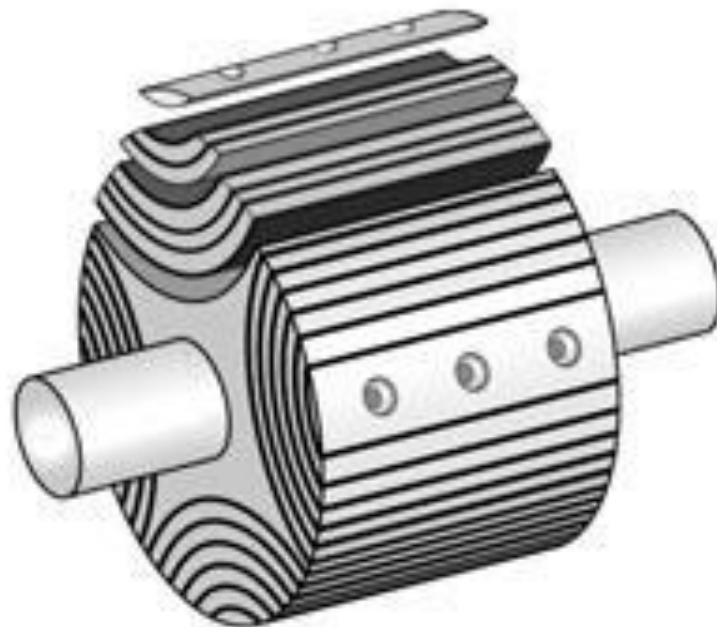
Для пуска однофазного РСД необходимо привести ротор во вращение при помощи постороннего усилия - большей частью непосредственно от руки. Это усилие определяет и направление вращения ротора...

На рис.4,5,6, показаны варианты исполнения ротора

а) Ротор с явно выраженными полюсами



б) Аксиально-расслоенный ротор



в) Поперечно-расслоенный ротор

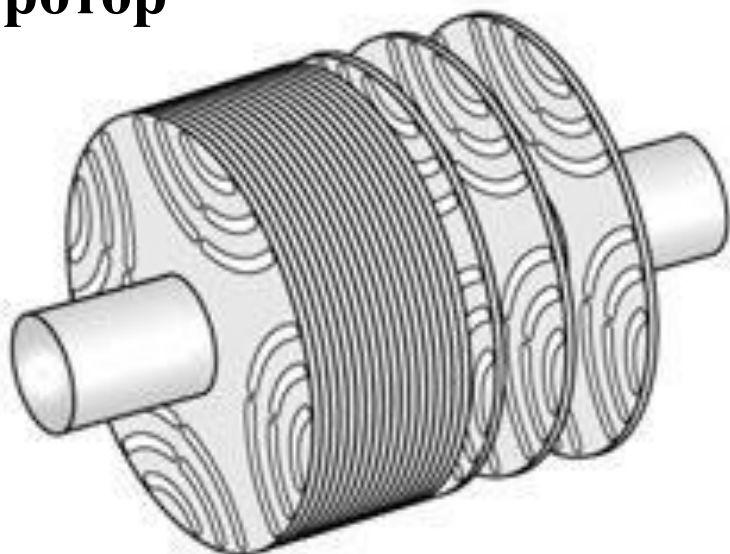


Рис.4.Ротеры РСД

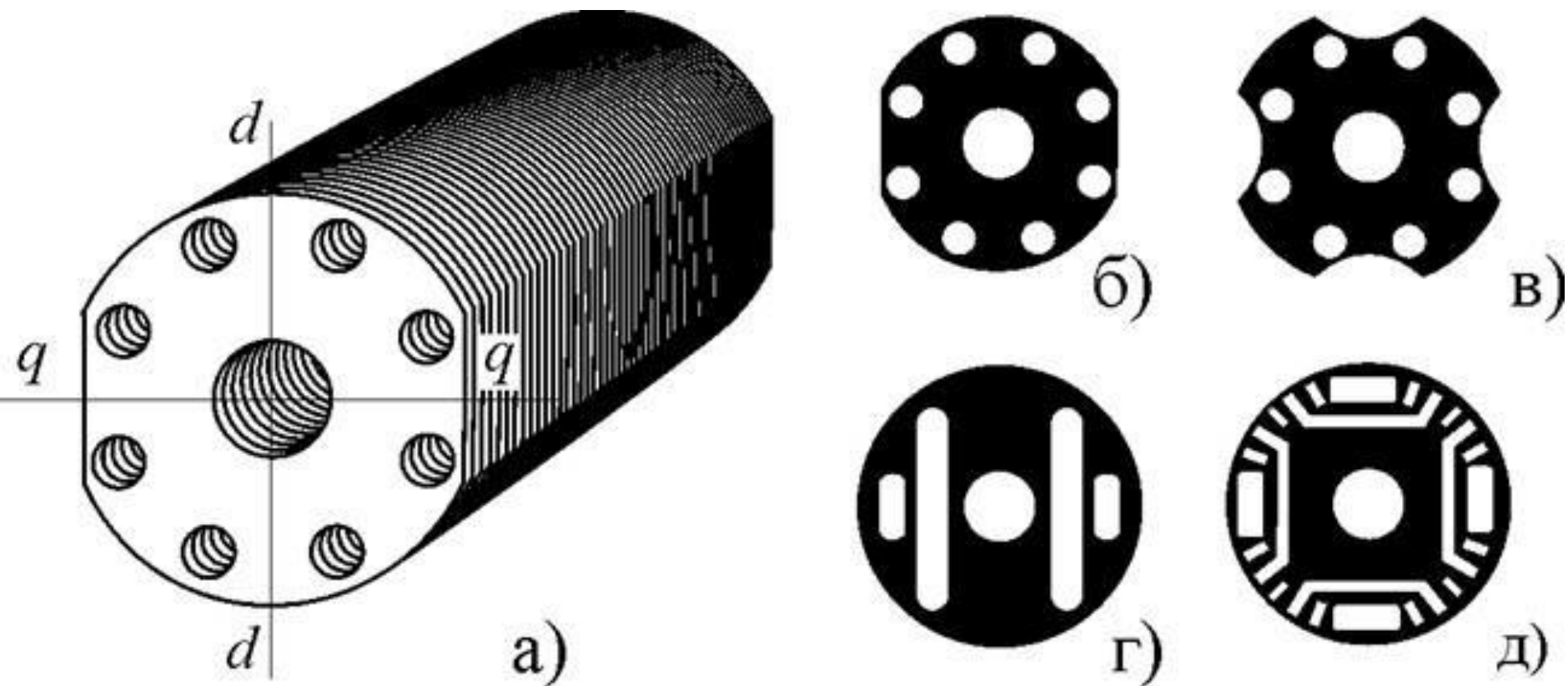
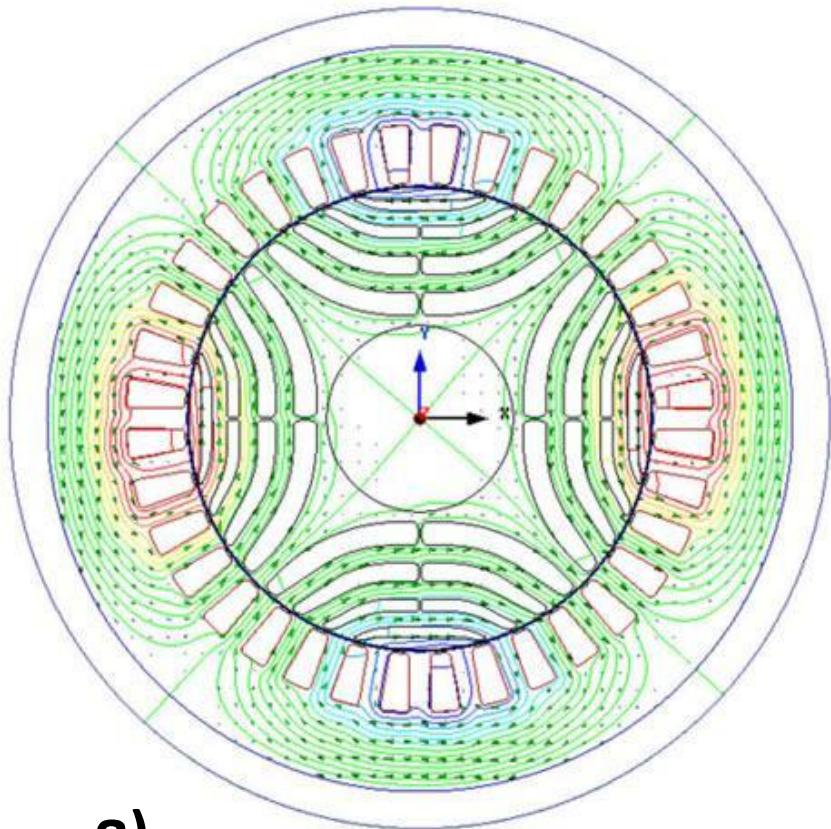


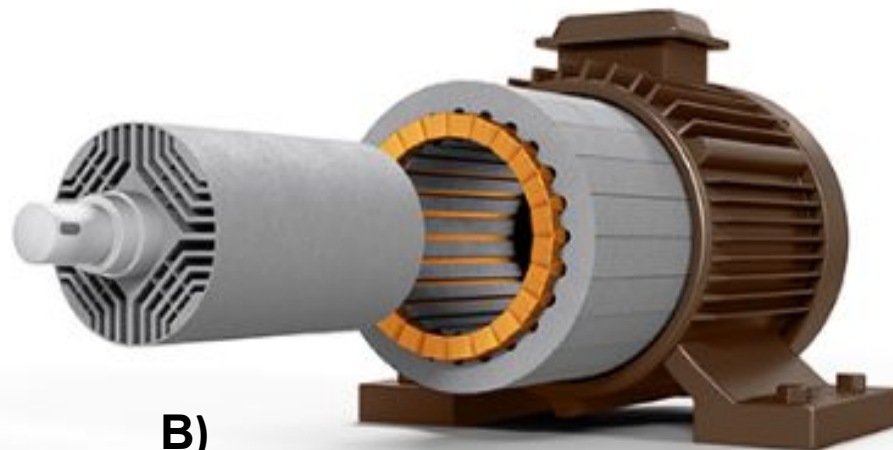
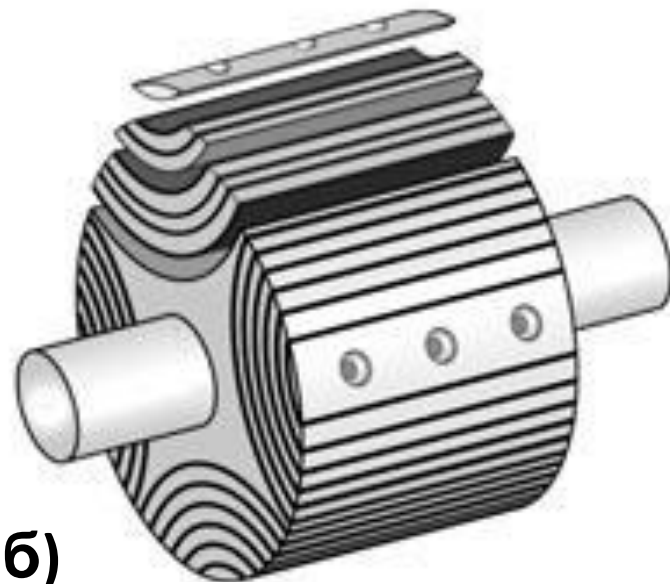
Рис. 5. Пакет сердечника ротора (а) и листы (б-д) пакета РСД



а)

Рис.6. а)пути магнитного потока , б) ротор , в) сборка РСД

б)



в)

Отличительная особенность (СРД) — отсутствие возбуждения со стороны ротора. Основной магнитный поток в этом двигателе создается исключительно за счет МДС обмотки статора. В двух- и в трехфазных СРД эта МДС является вращающейся.

Для выяснения принципа действия СРД обратимся к выражению электромагнитного момента явнополюсной СМ, из которого следует, что если отключить обмотку возбуждения ($E_0 = 0$), то основная составляющая момента становится равной нулю ($M_{\text{осн}} = 0$) и на ротор машины продолжает действовать лишь реактивная составляющая момента M_p :

$$M_p = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Явно выраженные полюсы ротора всегда стремятся ориентироваться относительно поля статора так, чтобы магнитное сопротивление для силовых линий поля было минимальным

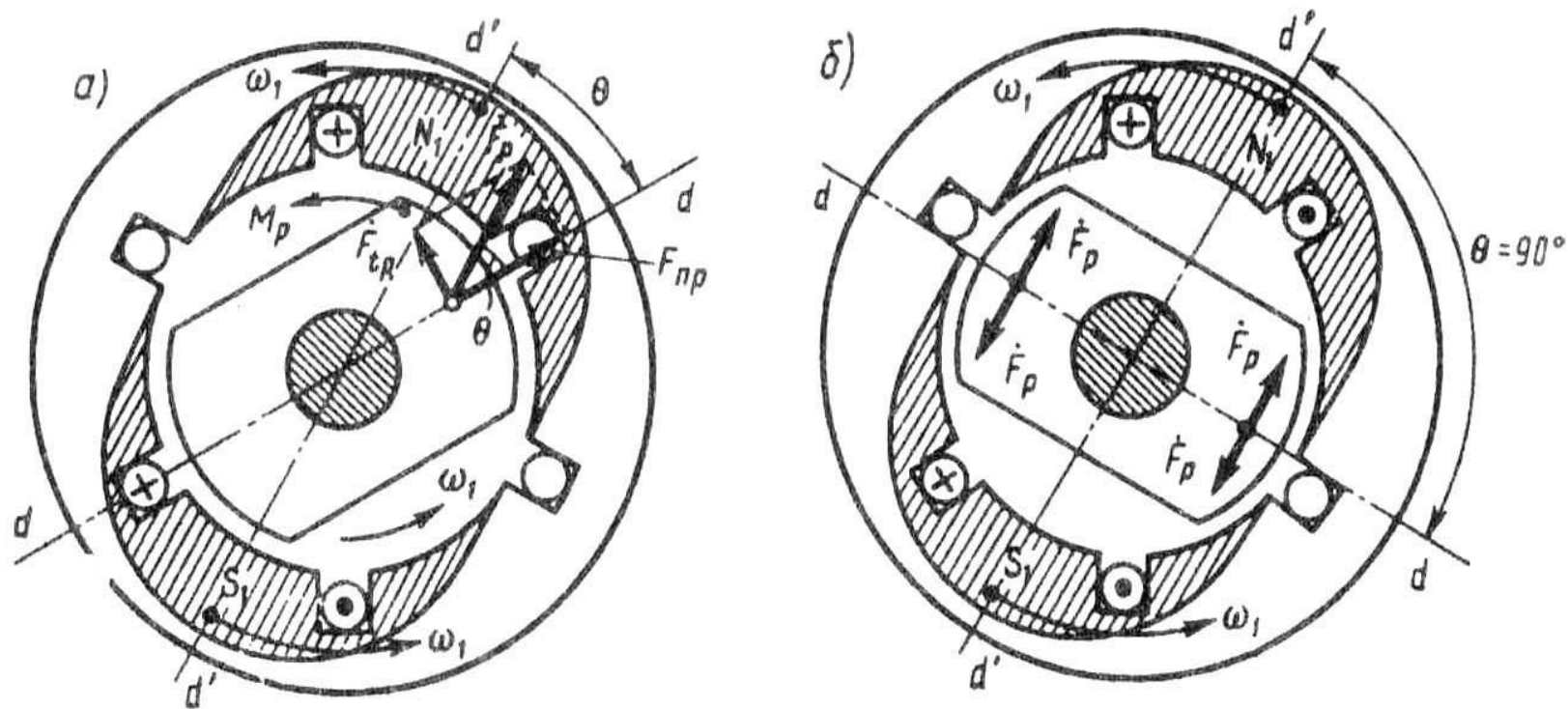
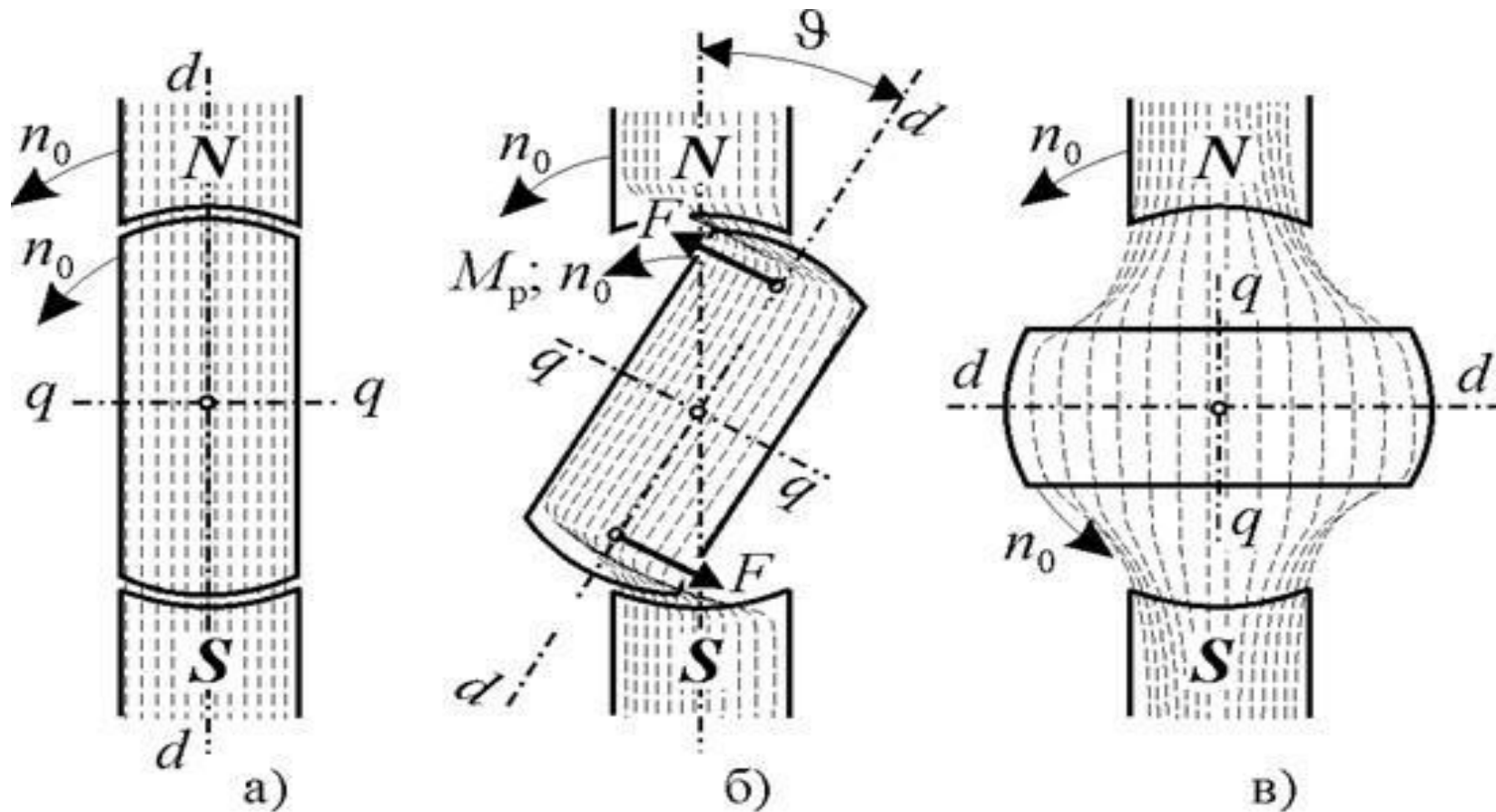


Рис 7. Силы магнитного притяжения в РСД



$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta = M_{p \max} \sin 2\theta$$

Рис. 8. Взаимодействие между статором и ротором; а) холостой ход, б) нагрузка, в) неустойчивое равновесие

Принцип действия РСД.

При включении обмотки статора в сеть возникает вращающееся магнитное поле. Как только ось этого поля $d' - d'$ займёт положение в пространстве расточки статора, при котором она будет смещена относительно продольной оси $d - d$ невозбужденных полюсов ротора на угол θ в сторону вращения (рис. 7, а), между полюсами этого поля и выступающими полюсами невозбужденного ротора возникнет реактивная сила F_p магнитного притяжения полюса ротора к полюсу вращающегося поля статора.

Вектор этой силы F_p смещен относительно продольной оси ротора также на угол θ , поэтому сила имеет две составляющие: нормальную F_{np} , направленную по продольной оси ротора, и тангенциальную F_{tp} , направленную перпендикулярно продольной оси полюсов ротора.

Совокупность тангенциальных составляющих реактивных сил F_{tr} на всех полюсах невозбужденного ротора создаст вращающий реактивный момент M_p , который будет вращать ротор с синхронной частотой ω_1 .

С ростом механической нагрузки на вал СРД угол θ увеличивается и момент M_p также увеличивается.

Из рис. 7, б видно, что при $\theta = 90^\circ$ реактивные силы магнитного притяжения F_p , действующие на каждый полюс невозбужденного ротора, взаимно уравниваются и реактивный момент $M_p = 0$.

Максимальное значение реактивного момента наступает при значении угла $\theta = 45^\circ$ (см. угловую характеристику на рис. N.В. 1).

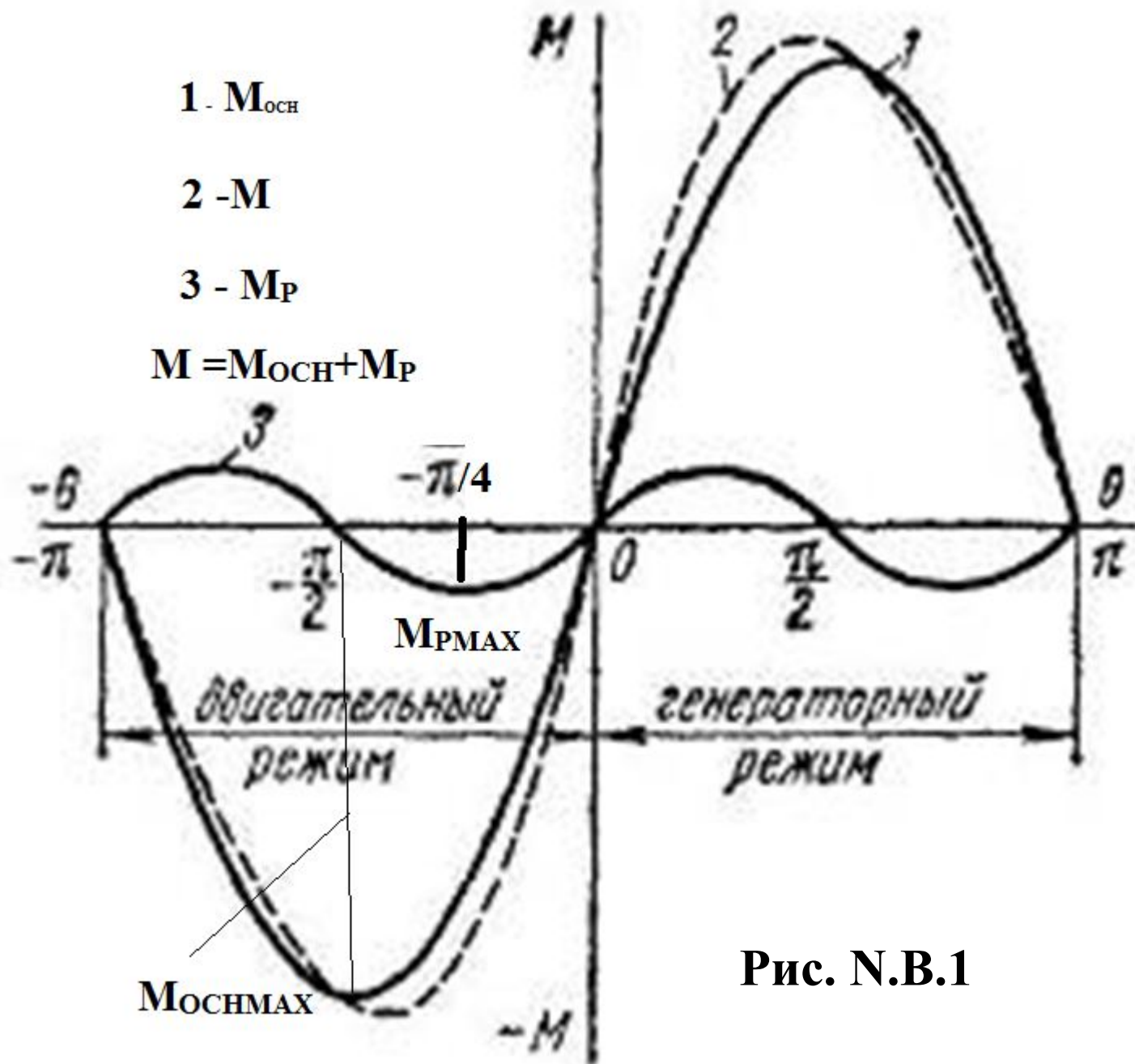


Рис. N.B.1

Мощность СРД и развиваемый им момент меньше, чем у СД с возбужденными полюсами ротора.

Объясняется это тем, что у СРД из-за отсутствия магнитного потока ротора ЭДС $E_0 = 0$, поэтому основная составляющая электромагнитного момента $M_{осн} = 0$ и электромагнитный момент СРД определяется лишь реактивной составляющей ($M = M_p$).

Поэтому при одинаковых габаритах СД с возбужденными полюсами ротора и СРД мощность на валу и развиваемый момент у СРД намного меньше.

Как же можно увеличить момент?

На рис.9,*а* показана традиционная конструкция ротора СРД, отличающаяся от ротора АД лишь наличием впадин, обеспечивающих ротору явнополюсную конструкцию.

Чем больше эти впадины, тем больше отношение X_d/X_q , а, следовательно, больше и реактивный момент M_p .

Однако, с увеличением впадин растет средняя величина воздушного зазора δ , что ведет к повышению намагничивающего тока статора, и, следовательно, к снижению энергетических показателей двигателя — коэффициента мощности ($\cos\varphi$) и КПД.

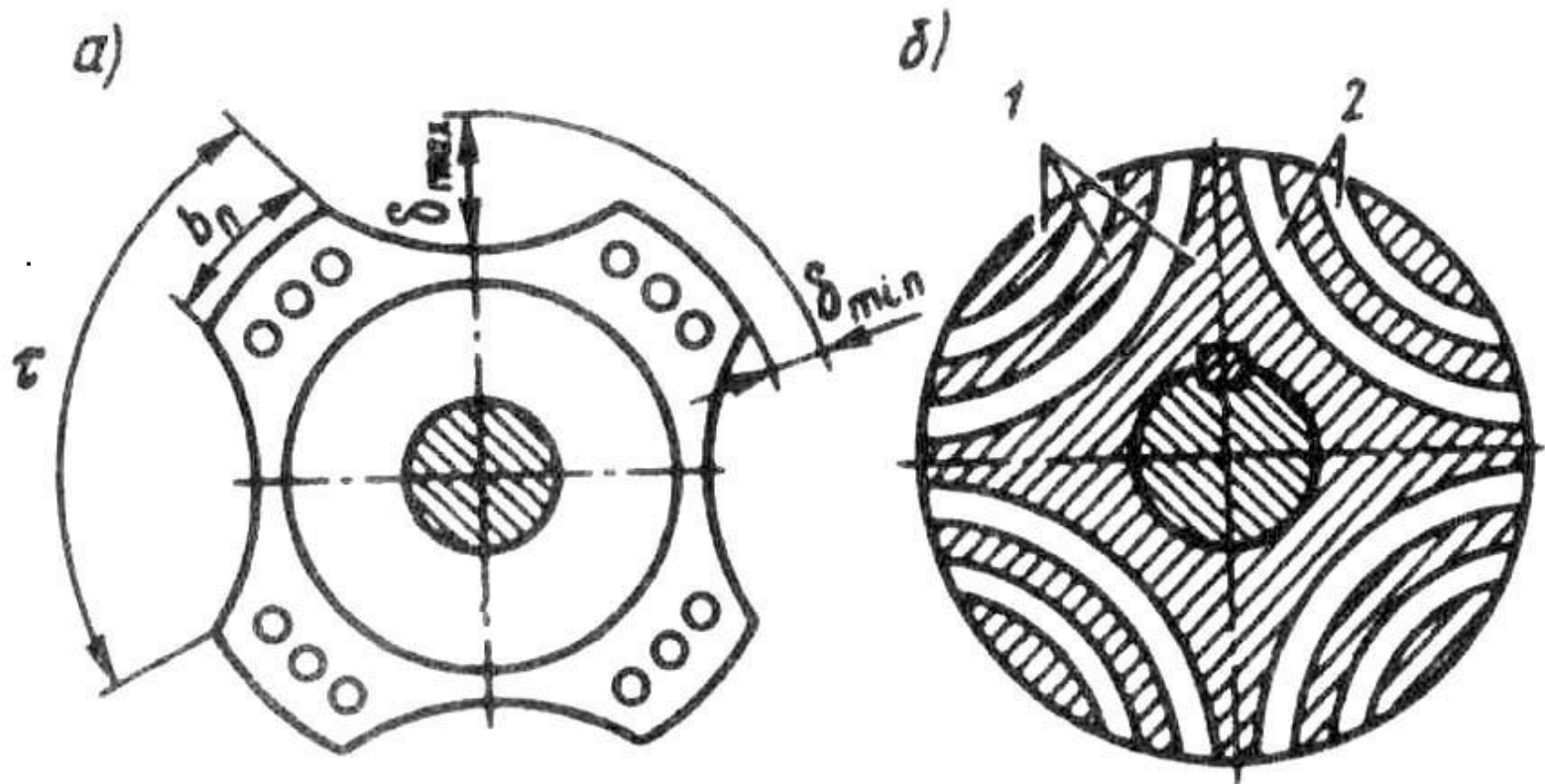


Рис. 9. Конструкция роторов РСД

Кроме того, с увеличением впадин сокращаются размеры пусковой клетки, что ведет к уменьшению асинхронного момента, т. е. к уменьшению пускового момента (M_{Π}) и момента входа в синхронизм ($M_{\text{ВХСИН}}$) (см.рис.N.B.2).

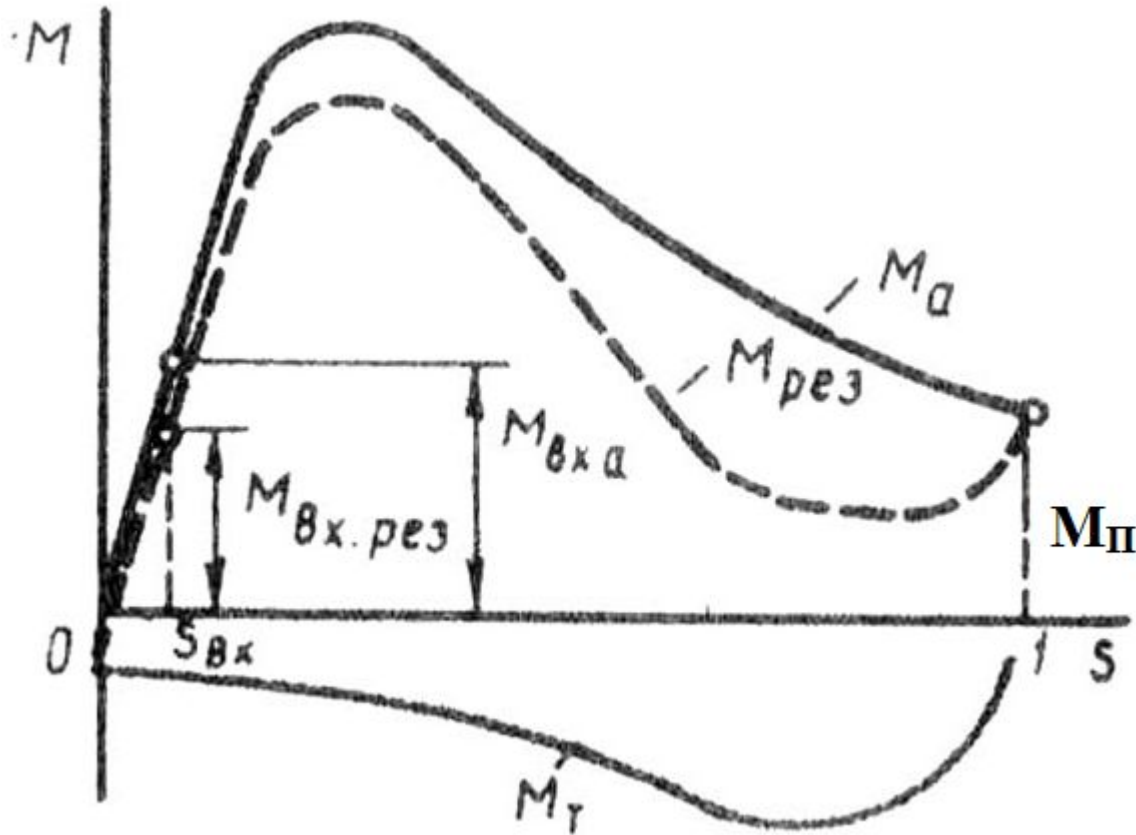


Рис. N.B.2.
Механическая характеристика пусковой клетки.

Наилучшие результаты получают при следующих соотношениях размеров ротора:

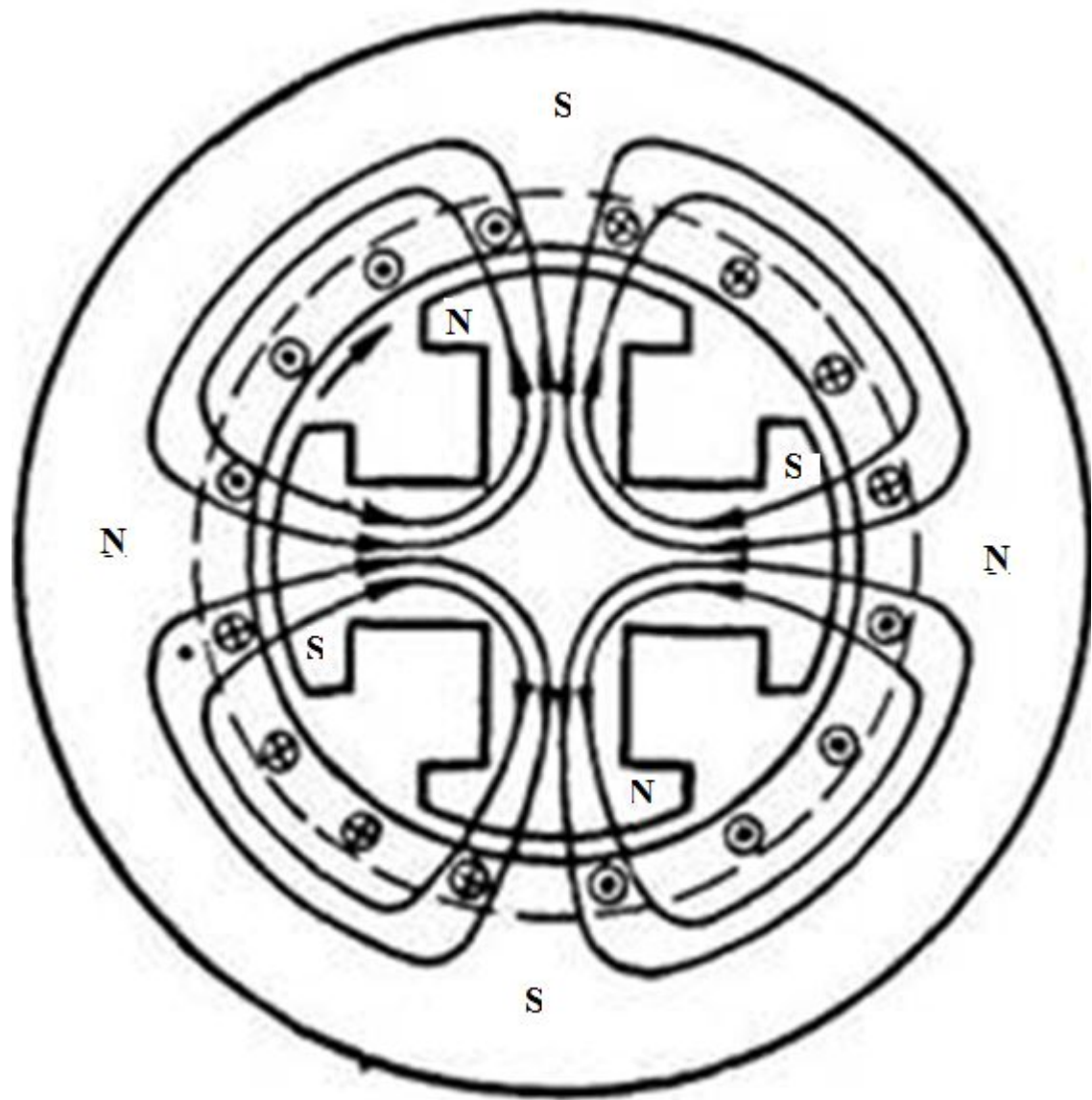
$$b_n / \tau = 0,5 \div 0,6 \quad \text{и} \quad \delta_{\max} / \delta_{\min} = 10 \div 12$$

В этом случае удастся добиться отношения $x_d / x_q \approx 2$.

Более совершенна секционированная конструкция ротора СРД, представляющая собой цилиндр, в котором стальные полосы 2 залиты алюминием 1 (рис. 9.б). Такая конструкция позволяет получить отношение $x_d / x_q \approx 4 \div 5$

За счет этого существенно возрастает момент $M_{p\max}$ при сохранении намагничивающего тока на допустимом уровне.

На торцах секционированного ротора имеются отлитые из алюминия кольца, замыкающие алюминиевые прослойки ротора, образуя к.з. пусковую клетку.



**Рис.10. Пути
замыкания
магнитного
потока статора в
роторе при $2p = 4$ в
РСД**

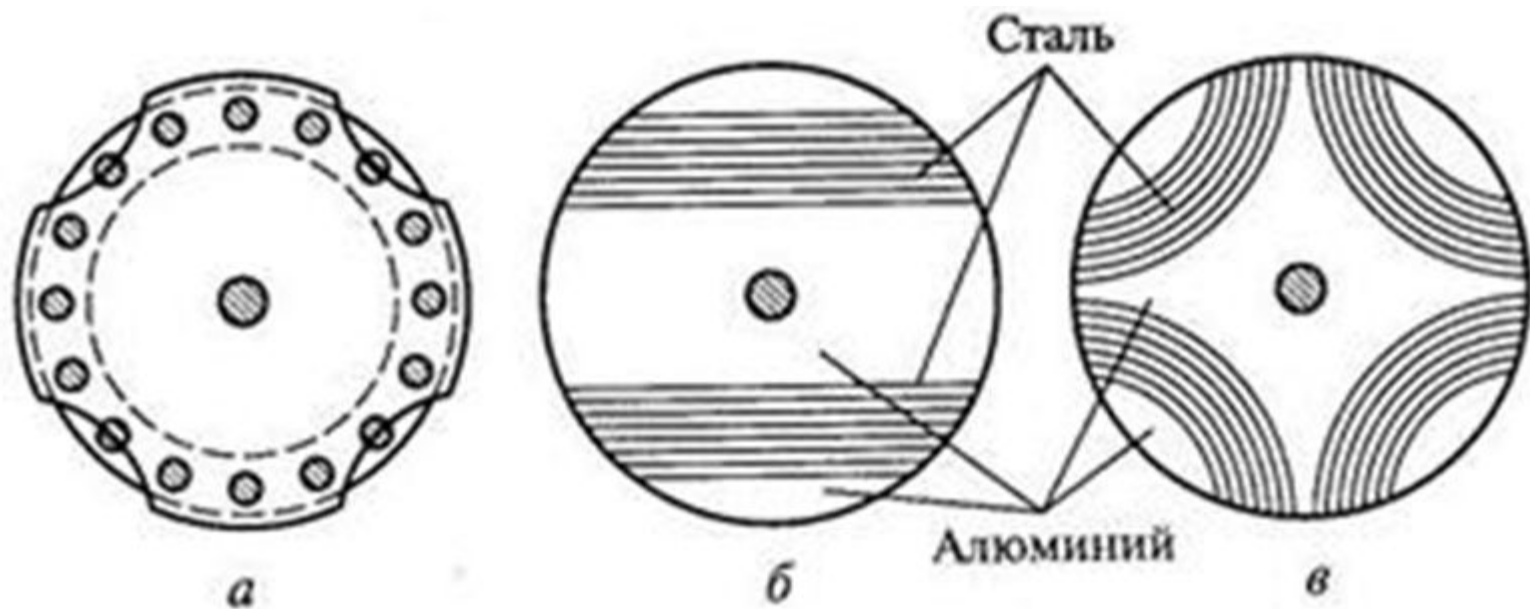


Рис. 11 Некоторые виды (а ... в) роторов синхронных реактивных двигателей

Достоинства РСД:

Простая и надежная конструкция ротора: ротор имеет простую конструкцию, состоящую из тонколистовой электротехнической стали, без магнитов и короткозамкнутой обмотки.

Низкий нагрев: так как в роторе отсутствуют токи, он не нагревается во время работы, увеличивая срок службы [электродвигателя](#).

Нет магнитов: снижается конечная цена электродвигателя, так как при производстве не используют редко земельные металлы. При отсутствии магнитных сил упрощается содержание и техническое обслуживание электродвигателя.

Низкий момент инерции ротора: так как на роторе отсутствует обмотка и магниты, [момент инерции ротора](#) мал, что позволяет [электродвигателю](#) быстрее набирать обороты и экономить электроэнергию.

Возможность регулирования скорости: в виду того, что РСД для своей работы требует [частотный преобразователь](#), имеется возможность управления скоростью вращения реактивного двигателя в широком диапазоне скоростей с коррекцией мощности.

Недостатки:

Частотное управление: для работы требуется частотный преобразователь.

Низкий коэффициент мощности: из-за того, что магнитный поток создается только за счет реактивного тока. Решается этот вопрос за счет использования частотного преобразователя с коррекцией мощности.

Применение

Простота конструкции и высокая эксплуатационная надежность обеспечили СРД малой мощности широкое применение в:

- устройствах автоматики для привода самопишущих приборов,
- устройствах звуко- и видеозаписи и других установках, требующего строгого постоянства частоты вращения.

Выводы по теме РСД

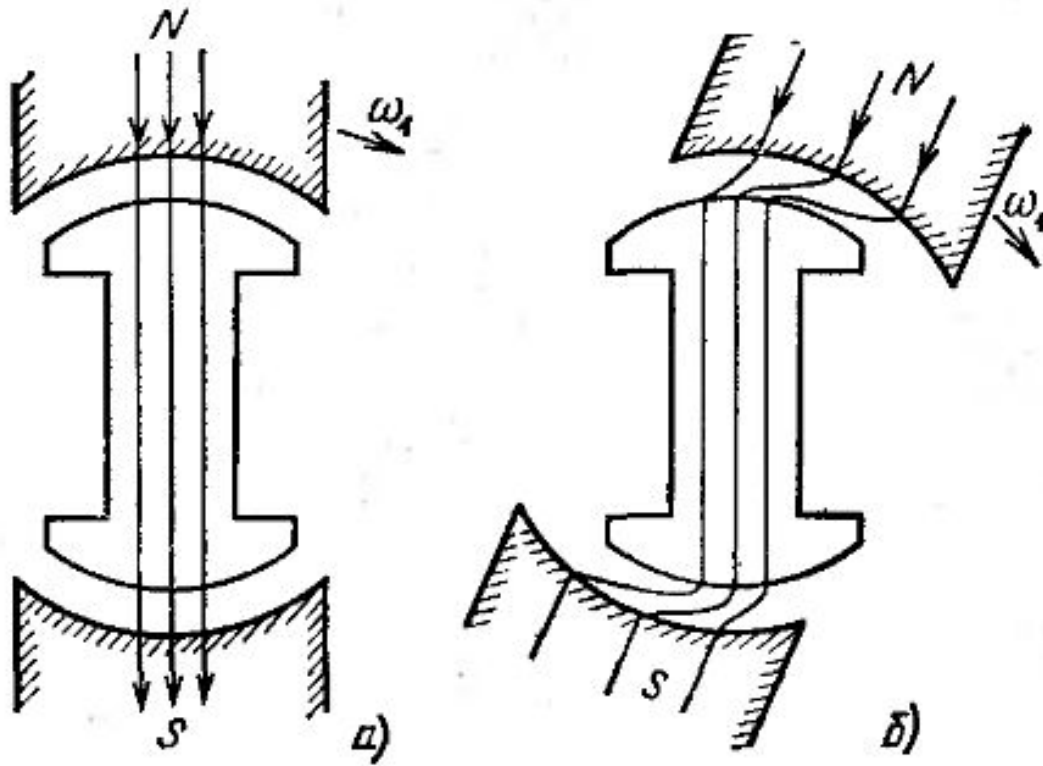


Рис.12.Принцип возникновения реактивного момента в явнополюсном СД

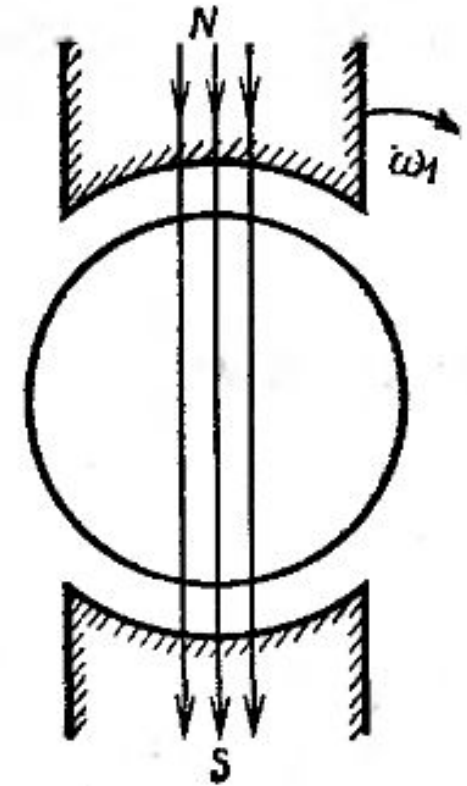


Рис. 13.Неявнополюсный ротор в магнитном поле

Вращающий момент образуется вследствие того, что в явнополюсном роторе магнитный поток, замыкаясь по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, проходит вдоль полюсов (рис. 12, а). Поэтому, если предварительно разогнать ротор до скорости, близкой к синхронной, вращающийся магнитный поток якоря вследствие тяжения индукционных линий будет увлекать за собой ротор (рис. 12, б), и он будет вращаться с ним синхронно.

У машин с неявнополюсным ротором (рис. 13) условия прохождения потока в любых направлениях будут одинаковыми, и у них при отсутствии возбуждения вращающий момент создаваться не будет. Таким образом, появление вращающего момента в реактивном двигателе обусловлено неодинаковыми магнитными проводимостями по продольной и поперечной осям. Этим проводимостям пропорциональны индуктивные сопротивления x_d и x_q . Вращающий момент в реактивном двигателе будет зависеть от соотношения между x_d и x_q



Рис. 14. Схема возникновения реактивного момента

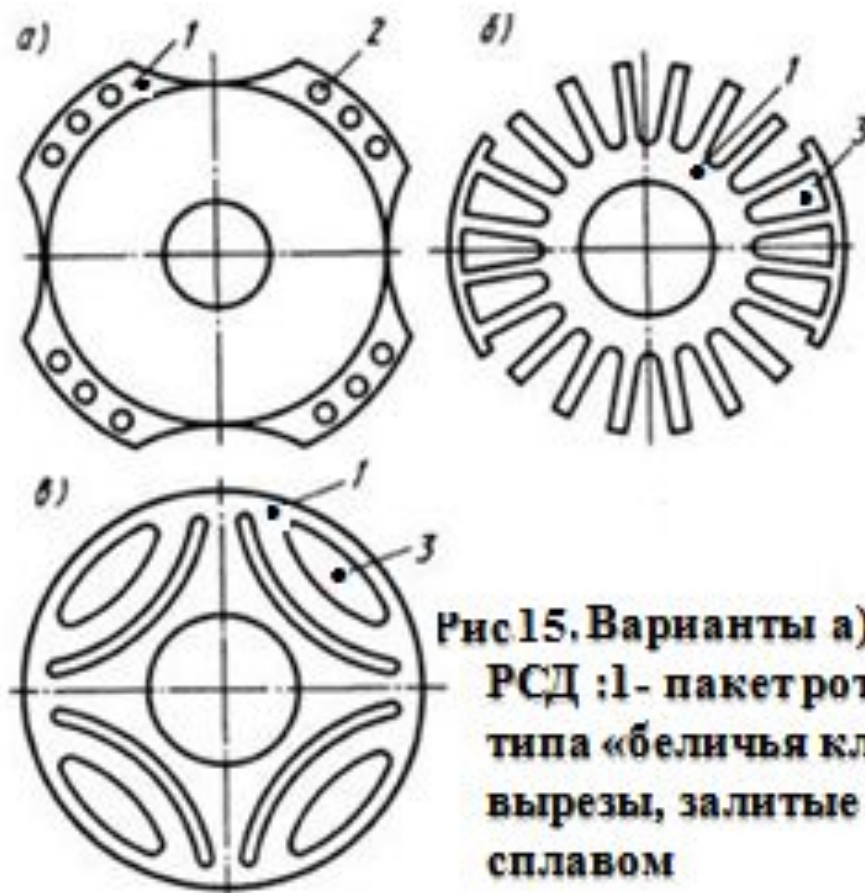


Рис 15. Варианты а),б),в) роторов РСД :1- пакет ротора; 2-обмотка типа «белчья клетка»; 3- вырезы, залитые алюминиевым сплавом

РСД возбуждается не со стороны ротора, как в обычных синхронных двигателях, а со стороны статора за счет реактивной составляющей тока, поступающей из сети в его обмотку. Эта составляющая тока в статоре создает продольный магнитный поток, являющийся потоком возбуждения.

Гистерезисные двигатели (ГД)

Области применения ГД

К настоящему времени ГД нашли широкое применение 1) в маломощных управляемых приводах, 2) системах автоматического управления, 3) в авиации, 4) в объектах навигации, 5) в маркшейдерских устройствах, 6) для привода гироскопов, 7) в атомной энергетике, 8) в пищевой, 9) химической, 10) медицинской промышленности, 11) для привода центрифуг, центробежных распылителей и турбомолекулярных насосов, 12) в устройствах записи воспроизведения информации для вращения дисков и магнитных головок, 13) для перемещения ленты в киноаппаратах, фототелеграфах и магнитофонах; 14) в счетчиках времени и программных механизмах часовой промышленности; 15) в качестве муфт, тахогенераторов, демпферов и т.д.

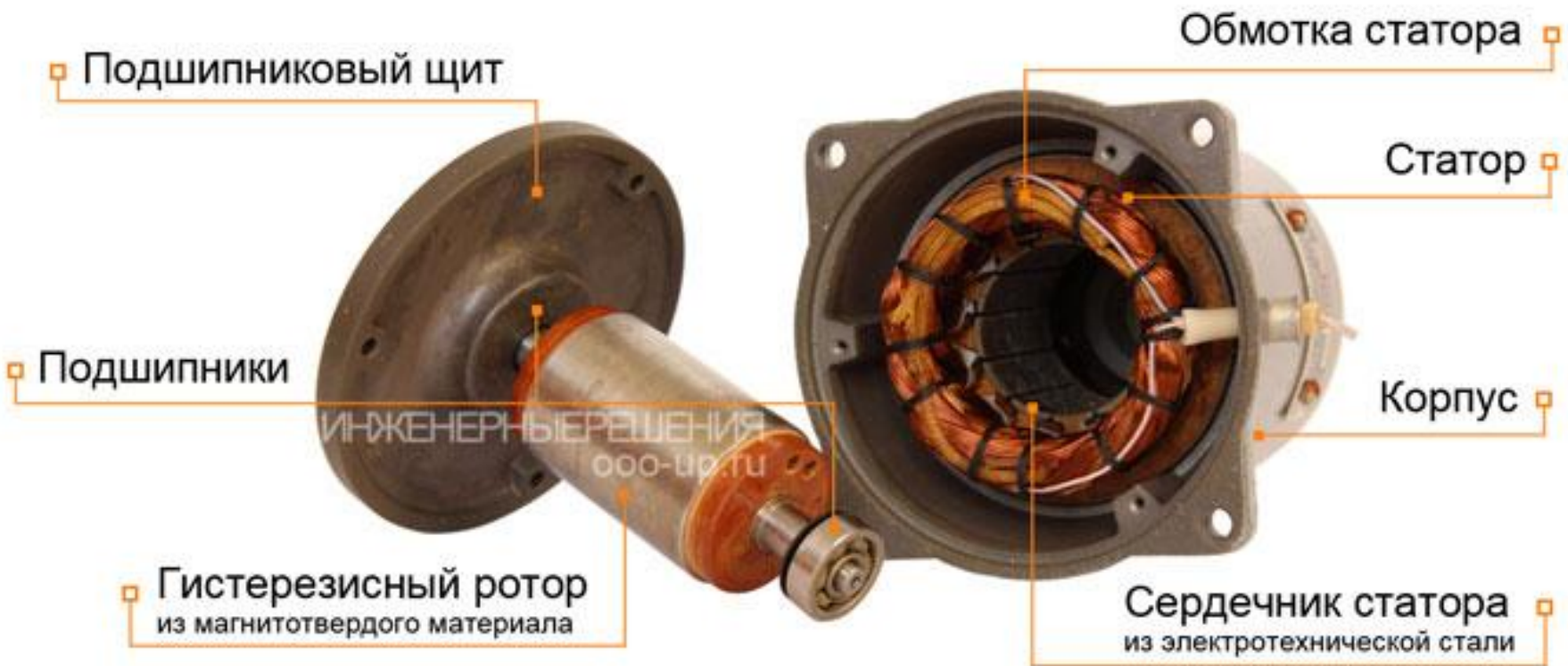


Рис.1. Синхронный гистерезисный электродвигатель

Гистерезисный электродвигатель - это неявнополюсный синхронный электродвигатель, без обмотки возбуждения, ротор которого выполнен из магнитного материала с большим остаточным намагничиванием, пуск в ход которого осуществляется за счет потерь на гистерезис в роторе.

Статор ГД (рис.1, справа) имеет обычную трех- или двухфазную обмотку, которая создает вращающееся магнитное поле.

Ротор представляет собой массивный цилиндр (рис.1, слева) без обмотки, изготовленный из магнитотвердого материала с широкой петлей гистерезиса (рис.2,а) (например, сплав викаллой). При этом в целях экономии дорогостоящего магнитотвердого материала ротор делают сборным (рис.2,б).

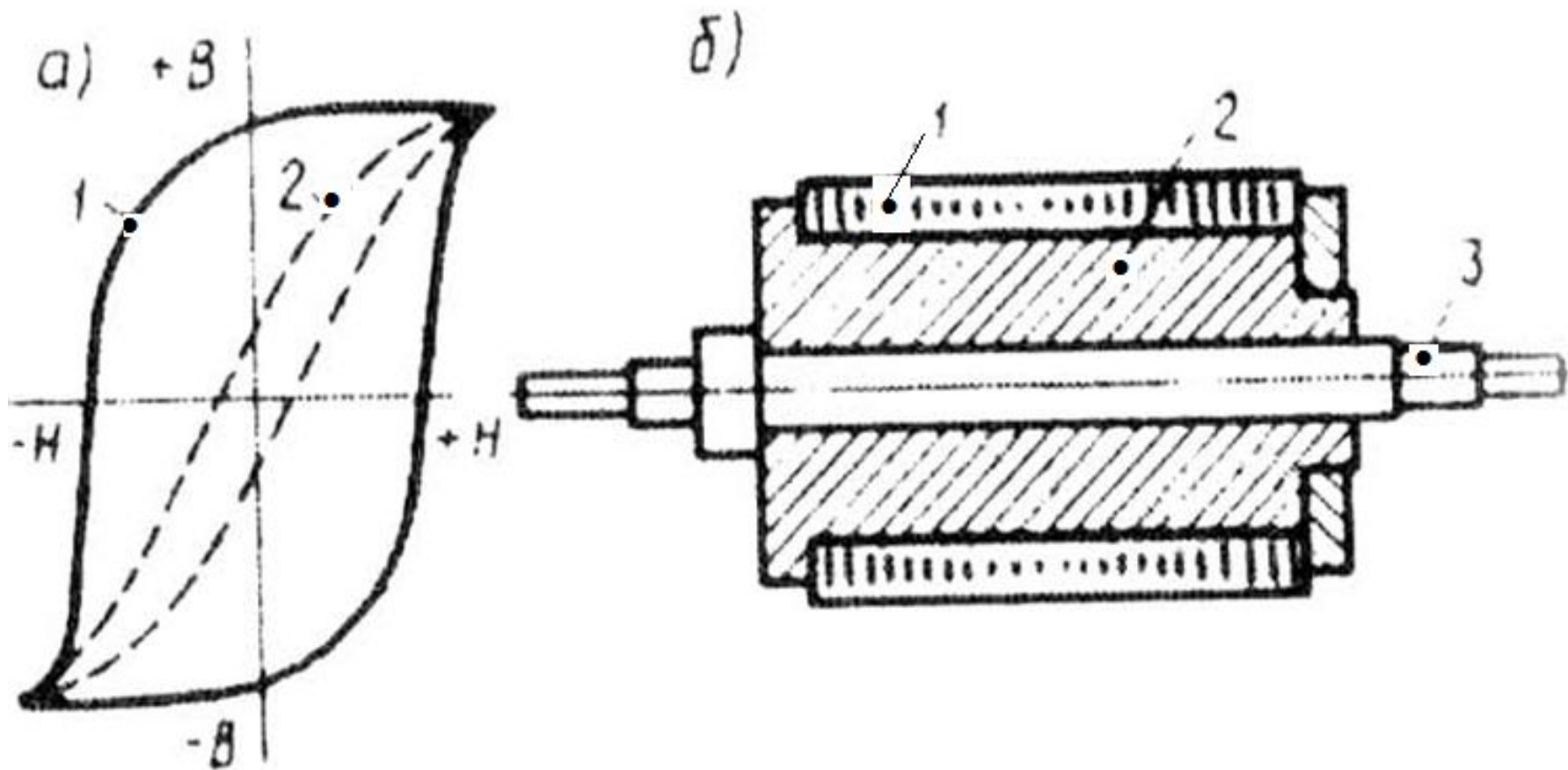


Рис.2. а) петли гистерезиса: сплава викаллой (кривая 1) и обычной электротехнической стали – (кривая 2); б) устройство сборного ротора гистерезисного двигателя

Применение обычной стали для изготовления ротора не обеспечивает гистерезисного момента достаточной величины. Только магнитно-твердые материалы, например, такие, как викаллоу (*это сплавы, содержащие около 50 % Co, 4 - 15 % V, остальное Fe. До окончательной термической обработки механические свойства викаллоев приблизительно аналогичны свойствам меди, а после обработки - свойствам стали*), дают возможность получить большой гистерезисный момент. Поэтому роторы ГД обычно делают сборными. Магнитно-твердую часть выполняют в виде шихтованного или массивного кольца 1, размещенного на втулке 2 (рис. 2, б). Последняя жестко посажена на вал 3.

В машинах с нешихтованным (массивным) ротором вращающееся поле статора наводит в роторе вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с полем статора возникает электромагнитный момент M_{BT} , значение которого пропорционально скольжению:

$$M_{B.T} = S P_{B.T.K} / \omega_1$$

где $P_{B.T.K}$ — потери на вихревые токи в роторе при $S = 1$, т. е. в режиме к.з., Вт; , ω_1 — угловая синхронная скорость, рад/с.

Наибольшего значения момент M_{BT} достигает при неподвижном роторе ($S = 1$), т. е. в момент пуска электродвигателя. Затем по мере возрастания частоты вращения (уменьшении скольжения) момент убывает (см. рис. 3.), при синхронной частоте M_{BT} становится равным нулю.

Таким образом, электромагнитный вращающий момент ГД создается совместным действием моментов: момента от вихревых токов M_{BT} и гистерезисного M_G :

$$M = M_{B.T} + M_G = S P_{B.T.K} / \omega_1 + P_{Г.К} / \omega_1$$

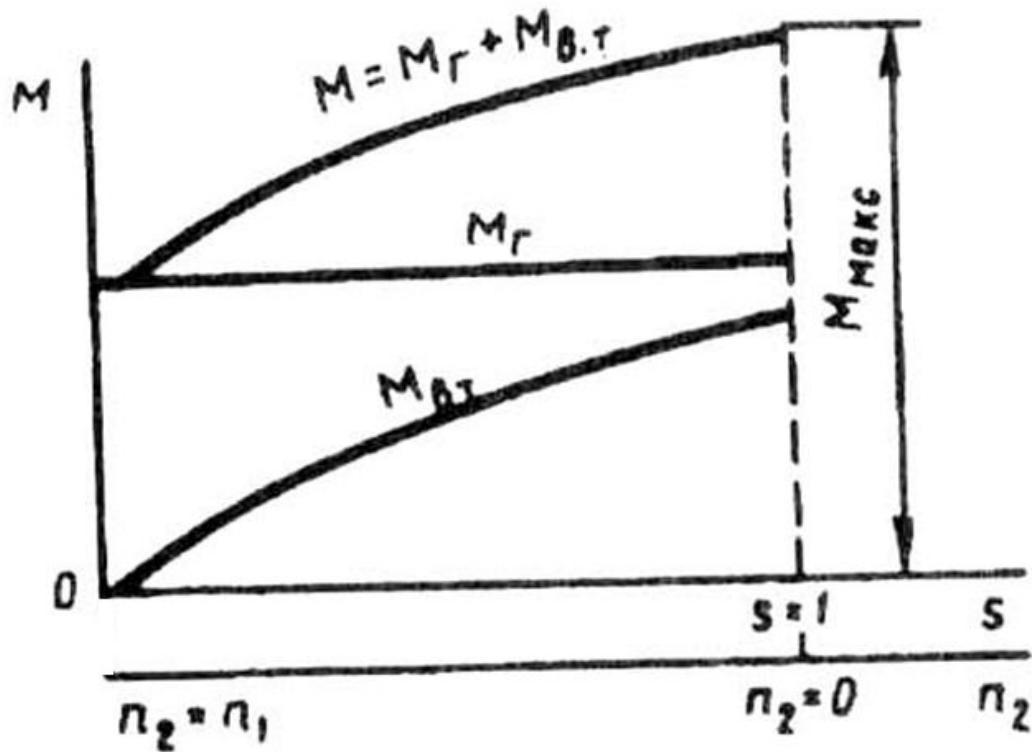


Рис. 3. Механические характеристики ГД

На рис.3 представлена зависимость результирующего момента ГД от скольжения: $M = f(S)$.

Характер этой кривой зависит от соотношения моментов $M_{в.т}$ и M_{Γ}

.ГД может работать с синхронной и асинхронной частотами вращения. Работа ГД в асинхронном режиме неэкономична, из-за значительных потерь на перемагничивание ротора, величина которых возрастает с увеличением скольжения..

Принцип работы синхронного гистерезисного двигателя
основан на действии гистерезисного момента.

Для наглядности на рисунке ниже показаны только два элементарных магнитика ns 1 и 2. Сила взаимодействия между этими магнитиками и полем статора NS направлена по оси последнего (рис.4,а). Если поворачивать поле NS , например, против часовой стрелке, то в том же направлении поворачиваются и элементарные магнитики. Однако вследствие магнитного гистерезиса магнитики ns не сразу повернутся на тот же угол, что и поле NS . Между осями NS и ns появится некоторый угол рассогласования γ . Помимо радиальных сил появляются тангенциальные (рис. 4,б), которые и создадут гистерезисный момент M_{Γ} . Угол γ определяется формой петли гистерезиса материала, из которого изготовлен ротор.

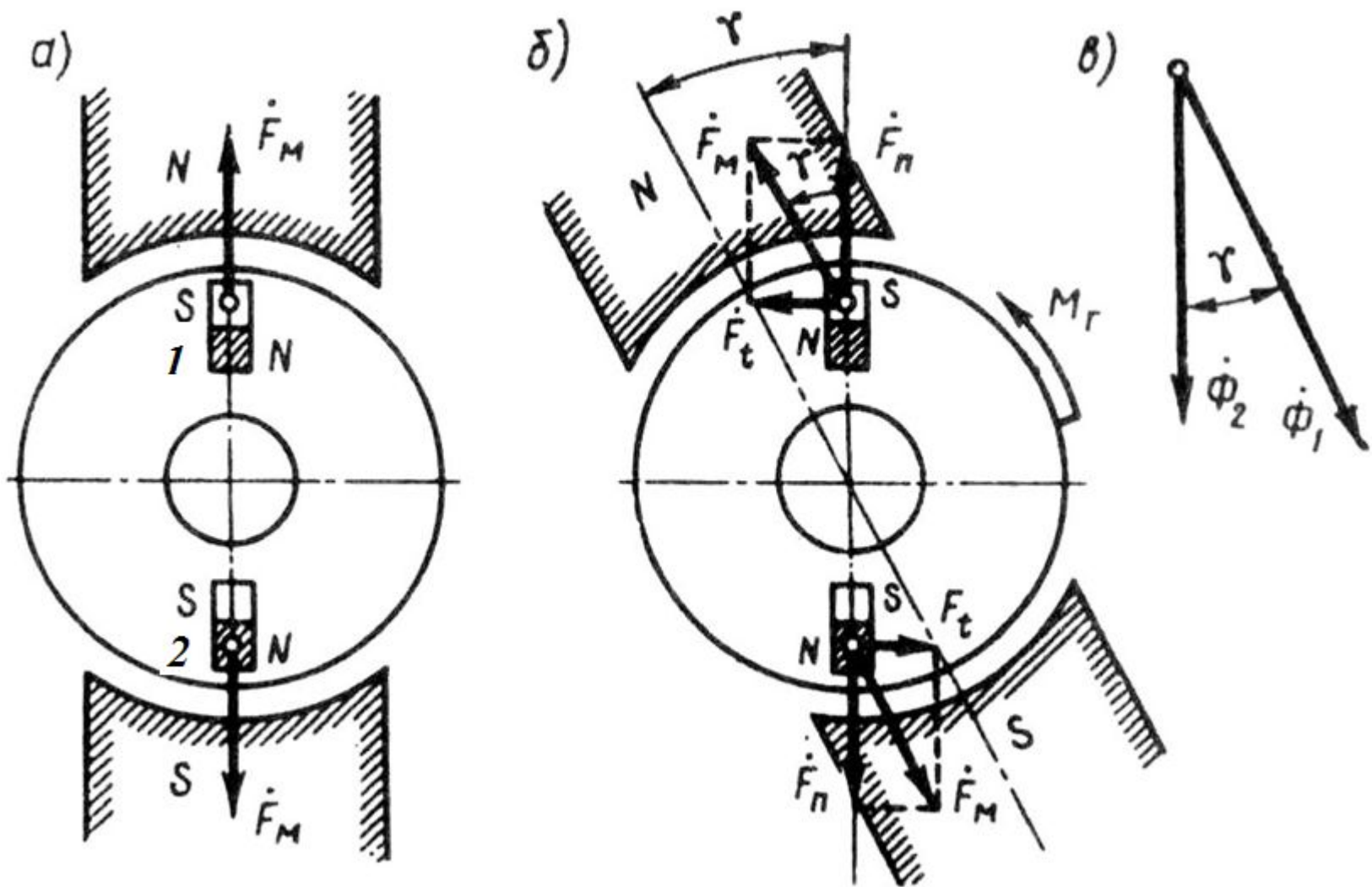


Рис.4. К понятию о гистерезисном моменте

Гистерезисный момент M_r не зависит от частоты вращения ротора. Радикальный способ увеличения вращающего момента ГД- применение магнитотвердых материалов с прямоугольной петлей гистерезиса (рис.2,а кривая 1). Частота вращения такого двигателя синхронна с частотой вращения поля, КПД высокий - до 80%.

Явление магнитного запаздывания заключается в том, что частицы ферромагнитного материала ротора, представляющие собой элементарные магниты, стремятся ориентироваться в соответствии с направлением внешнего магнитного поля.

Если внешнее магнитное поле изменит свое направление, то элементарные частицы также меняют ориентацию.

Однако повороту элементарных частиц в магнитотвердом материале препятствуют силы молекулярного трения. Этим и объясняется появление угла сдвига γ между вектором магнитного потока ротора Φ_2 и вектором магнитного потока обмотки статора Φ_1 (рис. 4,в) . Этот угол зависит исключительно от магнитных свойств материала *ротора*.

• Достоинства ГД—

• 1)простота конструкции, 2)бесшумность и 3)надежность в работе, 4)большой пусковой момент, 5)плавность входа в синхронизм, 6)сравнительно высокий КПД (до 80%), 7) малое изменение кратности тока от пуска до номинальной нагрузки

$$I_n / I_{ном} = 1,3 - 1,4$$

Недостатки ГД—

1) низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi = 0,4-0,6$),

2) сравнительно высокая стоимость материала ротора, хотя, как правило, ротор изготавливают из обычной стали и на него насаживают лишь полый цилиндр небольшой толщины из магнитотвердого материала,

3) при резких колебаниях нагрузки ГД склонны к качаниям, что создает неравномерность хода (вращения).

Объясняется это отсутствием у ГД пусковой клетки, которая при резких изменениях нагрузки оказывает на ротор успокаивающее (демпфирующее) действие. Наиболее сильные качания наблюдаются у шихтованного ротора, в котором вихревые токи сильно ограничены.

Вызываемая качаниями неравномерность вращения ограничивает области применения ГД.