

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Синхронные трехфазные двигатели (СД) широко применяются в ЭП самых разнообразных рабочих машин и механизмов, что объясняется их высокими технико-экономическими показателями.

СД имеют высокий коэффициент мощности $\cos \phi$, близкий к единице или даже опережающий.

Способность СД работать с опережающим $\cos \phi$ и отдавать при этом в сеть реактивную мощность позволяет улучшать режим работы и экономичность системы электроснабжения.

КПД современных СД составляет 96...98%, что на 1... 1,5% выше КПД АД с теми же габаритными размерами и скоростью.

В синхронных двигателях возможно регулирование перегрузочной способности посредством регулирования тока возбуждения, причем она меньше зависит от **напряжения сети, чем в АД.**

Синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой.

Важным преимуществом конструкции СД является наличие большого воздушного зазора, вследствие чего его характеристики и свойства мало зависят от износа подшипников и неточности монтажа ротора.

Электротехническая промышленность выпускает несколько серий СД различного назначения.

Для общего применения выпускаются двигатели

- серий СД2 и СД3 мощностью от 132 до 1000 кВт,
- СДН-2 и СДН-3 мощностью от 315 до 4000 кВт и напряжением питания 380 и 6000 В.

В приводе вертикальных насосов используются двигатели ВДС и ВДС2 мощностью от 4000 до 12 500 кВт и ВСДН мощностью от 630 до 3200 кВт.

Существуют и СД во взрывоопасном исполнении серий СДКП2 (315... 5000 кВт) и СТДП (630... 12 500 кВт).

Кроме того, выпускаются СД, предназначенные для привода быстроходных механизмов (серия СТД), мельниц (СДМ3 и СДС3-2), поршневых компрессоров (СДК2) и ряд других.

Типовые узлы схем автоматического управления синхронными двигателями

Для синхронных двигателей всегда применяют асинхронный пуск.

Таким образом, в отношении операций переключения, осуществляемых в цепи статора двигателя, ***пуск синхронных двигателей аналогичен пуску короткозамкнутых асинхронных двигателей:***

- **либо прямой пуск** с включением статорной обмотки сразу на полное напряжение сети,
- **либо пуск при пониженном напряжении** (через резисторы, реакторы или автотрансформатор) с последующим переключением в функции времени на полное напряжение.

Специфичная особенность пуска синхронного двигателя — **управление подачей в его обмотку возбуждения постоянного тока от возбудителя.**

В качестве последних **обычно используют генераторы постоянного тока.**

Для быстроходных двигателей вал возбудителя непосредственно соединяется с валом двигателя.

Для тихоходных двигателей применяют возбудитель с отдельным короткозамкнутым приводным асинхронным двигателем.

Разработаны также системы тиристорного возбуждения.

Типовые узлы схем автоматического управления синхронными двигателями

Типичные схемы включения обмотки возбуждения синхронного двигателя

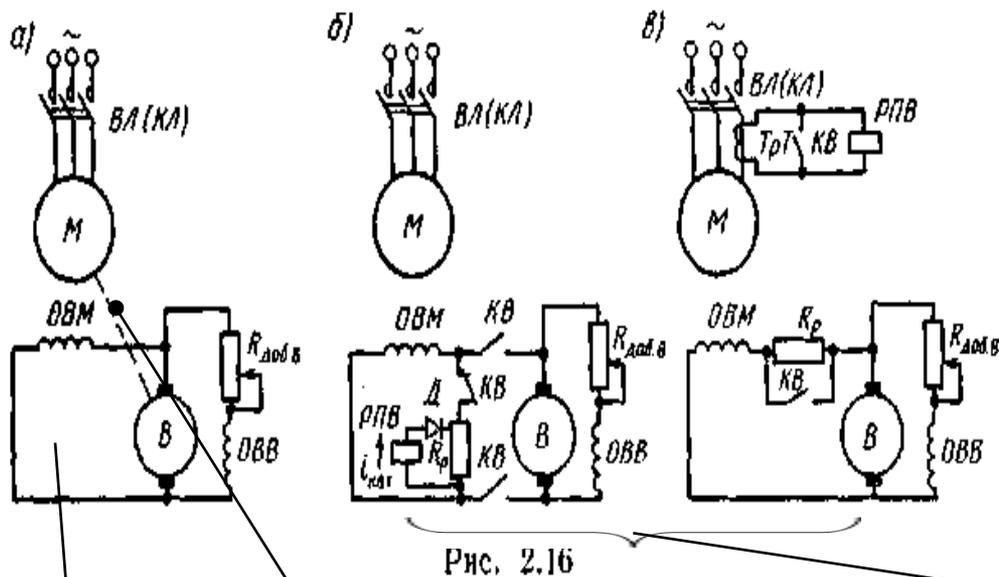


Рис. 2.16

Прямой пуск с наглухо подключенным возбудителем

Для быстроходных двигателей вал возбудителя непосредственно соединяется с валом двигателя.

Схемы на рис. 2.16, б и в применяют при более тяжелых условиях пуска.

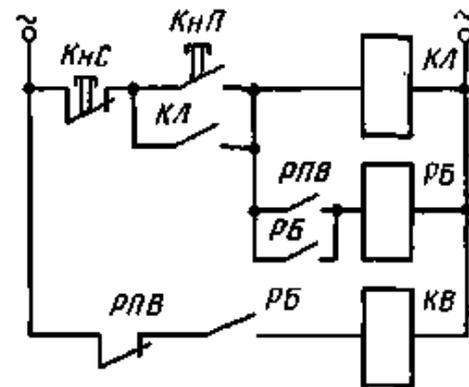


Рис. 2.17

Для тихоходных двигателей применяют возбудитель с отдельным короткозамкнутым приводным асинхронным двигателем. Разработаны также системы тиристорного возбуждения.

Типичные схемы включения обмотки возбуждения синхронного двигателя

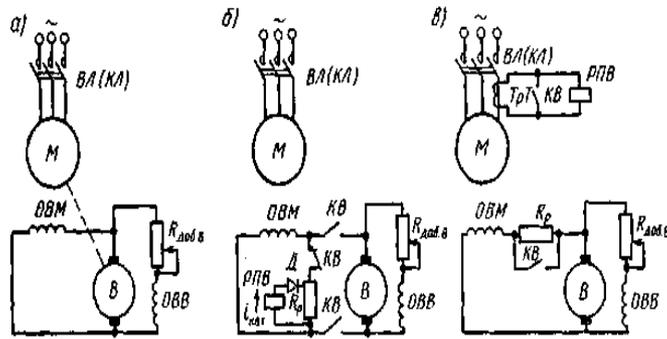


Рис. 2.16

Если позволяют питающая сеть и двигатель, то применяют прямой пуск с наглухо (постоянно) подключенным возбудителем (обычно при статическом моменте на валу двигателя, не превышающем $M_c < 0,4 M_n$) или с подключением возбудителя при подсинхронной скорости (при $M_c > 0,4 M_n$).

В случаях, когда **сеть и двигатель не допускают прямого пуска** и он производится при пониженном напряжении, различают:

- «**легкий**» пуск, при котором возбуждение подается до включения обмотки статора на полное напряжение (при небольшом M_c),
- «**тяжелый**» пуск — если подача возбуждения происходит при полном напряжении на обмотке статора (при значительном M_c).

Реакторный и автотрансформаторный пуск применяют преимущественно для двигателей высокого напряжения (выше 1000 В). Пуск с резисторами используют только для двигателей низкого напряжения (до 1000 В) мощностью до 400 кВт.

Типичные схемы включения обмотки возбуждения синхронного двигателя

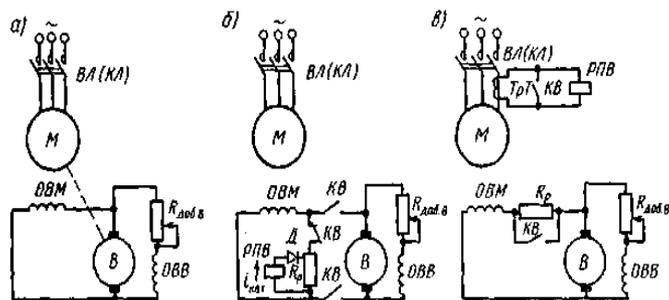


Рис. 2.16

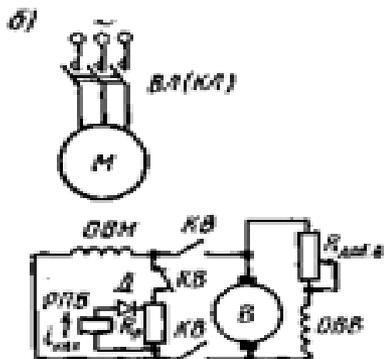
Схема на рис. 2.16, а отвечает прямому пуску с наглухо подключенным возбудителем *В*. Здесь операции управления пуском сводятся только к включению линейного выключателя *ВЛ* или контактора *КЛ*, присоединяющего статорную обмотку двигателя к сети.

По мере разгона двигателя напряжение возбудителя увеличивается, соответственно растет и ток возбуждения, который при подсинхронной скорости оказывается достаточным для вхождения двигателя в синхронизм.

Схемы на рис. 2.16, б и в применяют при более тяжелых условиях пуска. Начинается пуск здесь также с включения выключателя *ВЛ* (контактора *КЛ*). Катушка контактора возбуждения *КВ* при этом обесточена (цепь ее включения на схемах не показана), обмотка возбуждения двигателя *ОВМ* либо замкнута на разрядное сопротивление R_p (рис. 2.16, б), либо подключена к возбудителю последовательно с сопротивлением R_p (рис. 2.16, в).

По достижении двигателем подсинхронной скорости включается контактор *КВ* и присоединяет обмотку *ОВМ* непосредственно к якорю возбудителя *В*. Двигатель входит в синхронизм. Поскольку синхронные двигатели работают обычно в длительном режиме, целесообразно применять в качестве контактора *КВ* контактор с механической защелкой, удерживающей его якорь в притянутом положении. Тогда после включения контактора *КВ* можно снять напряжение с его катушки. Тем самым достигается не только устранение лишних потерь энергии в катушке *КВ*, но и сохранение возбуждения двигателя даже при исчезновении напряжения в цепи управления.

Типичные схемы включения обмотки возбуждения синхронного двигателя



Подачей возбуждения можно управлять в функции скорости (скольжения) или тока статора двигателя. Первый способ реализуют при помощи электромагнитного реле постоянного тока *РПВ* (реле времени с гильзой), катушка которого включена через диод *Д* на часть разрядного сопротивления (рис. 2.16, б).

При подключении обмотки статора двигателя к сети в обмотке возбуждения *ОВМ* наводится переменная однофазная э. д. с.

По катушке реле *РПВ* начнет протекать выпрямленный диодом *Д* ток в виде импульсов, амплитуда и частота которых пропорциональны скольжению двигателя *s*.

В самом начале пуска, когда $s = 1$, импульсы тока достаточно велики, и реле *РПВ* включится.

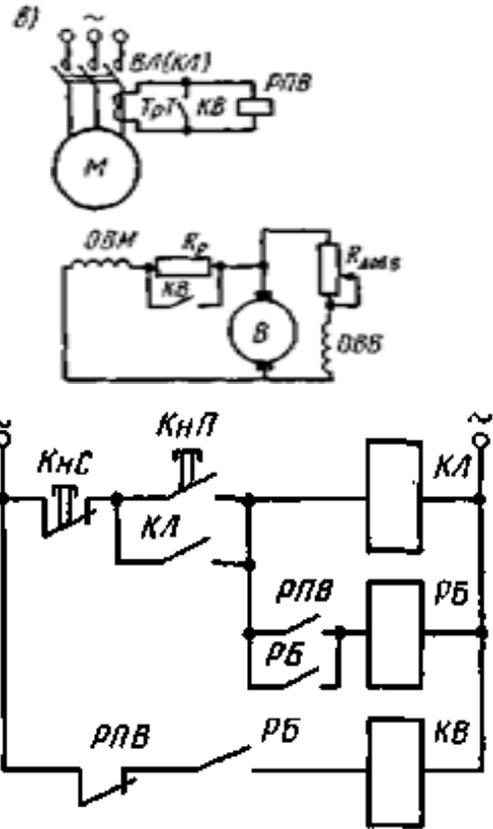
По мере разгона двигателя амплитуда импульсов уменьшается, а интервалы между ними увеличиваются.

При подсинхронной скорости эти интервалы станут равными времени отпускания якоря реле, и его контакт замкнется, включая контактор *КВ*.

Однако такой способ управления подачей возбуждения не обеспечивает четкого вхождения двигателя в синхронизм из-за разброса выдержек времени реле *РПВ*.

Типичные схемы включения обмотки возбуждения синхронного двигателя

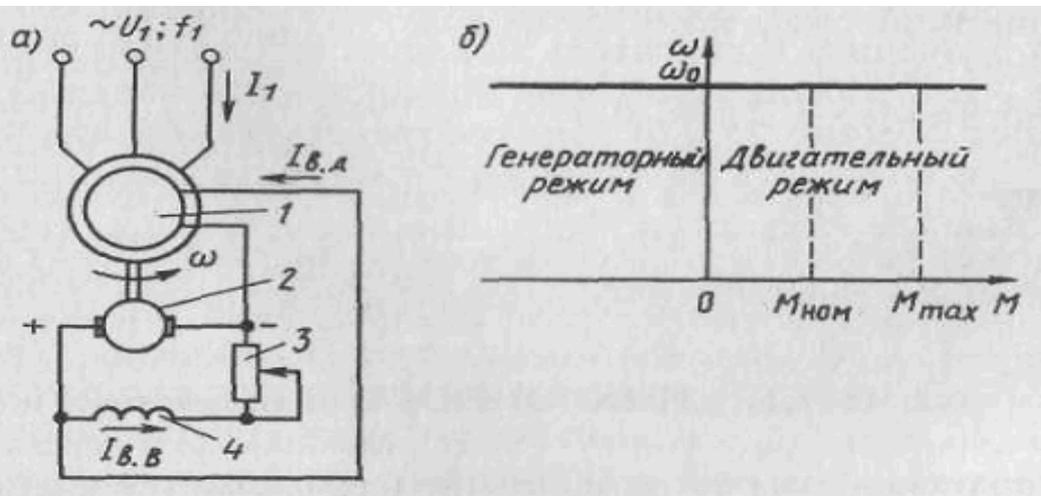
В настоящее время применяют, как правило, второй способ — управление в функции тока статора двигателя. Токовое реле *РПВ* получает питание от трансформатора тока *ТрТ*, включенного в фазу статорной цепи (рис. 2.16, в). Как известно, при асинхронном пуске ток статора особенно резко уменьшается в зоне подсинхронных скоростей. Это обстоятельство и используют для фиксации момента подачи возбуждения.



После нажатия на кнопку *КНП* и включения контактора *КЛ* (рис. 2.17) реле *РПВ* срабатывает от начального броска пускового тока. Оно открывает размыкающий контакт в цепи катушки контактора *КВ*, а замыкающим контактом включает блокировочное реле *РБ*. Это реле замыкает свои контакты, становится на самопитание и подготавливает к последующему включению цепь катушки контактора *КВ*. Когда двигатель достигнет подсинхронной скорости, ток статора снизится настолько, что реле *РПВ* отпустит свой якорь. Это приведет к включению контактора *КВ*. Его контакты закоротят соответственно разрядное сопротивление R_p и катушку реле *РПВ* (рис. 2.16, в), и последнее не сработает от броска тока статора при вхождении двигателя в синхронизм.

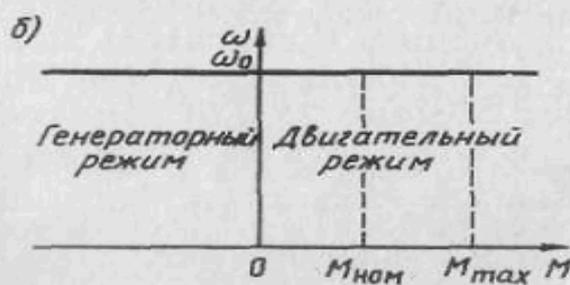
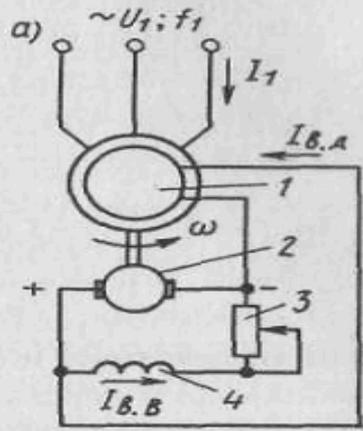
Рис. 2.17

Схема включения, статические характеристики и режимы работы СД

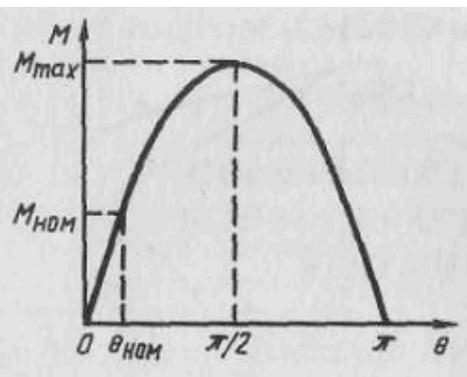


Вращающий момент СД обусловлен взаимодействием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, и магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения или постоянными магнитами на роторе.

Взаимодействие этих полей может создать постоянный по направлению вращающий момент СД только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью магнитного поля $\omega_0 = 2pf/p$, т.е. синхронно с вращающимся полем. Таким образом, механическая характеристика СД $\omega(M)$ представляет собой горизонтальную линию с ординатой ω_0 , которая имеет место до некоторого максимального момента нагрузки M_{\max} , превышение которого приводит к выпадению СД из синхронизма, т. е. к нарушению синхронного вращению ротора и магнитного поля.



Для определения максимального момента нагрузки M_{\max} , до которого сохраняется синхронная работа двигателя с сетью, служит угловая характеристика СД. Она отражает зависимость момента M от угла сдвига θ между векторами ЭДС статора E и фазного напряжения сети U_{ϕ} .



Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла θ

$$M = 3U_{\phi} E \sin \theta / (\omega_0 x_1) = M_{\max} \sin \theta,$$

где U_{ϕ} - фазное значение напряжения сети; E - ЭДС в обмотке статора СД; x_1 - индуктивное сопротивление фазы обмотки СД; ω_0 - скорость вращения магнитного поля.

Максимального значения момент СД достигает при $\theta = \pi/2$. Угол сдвига характеризует собой перегрузочную способность СД:

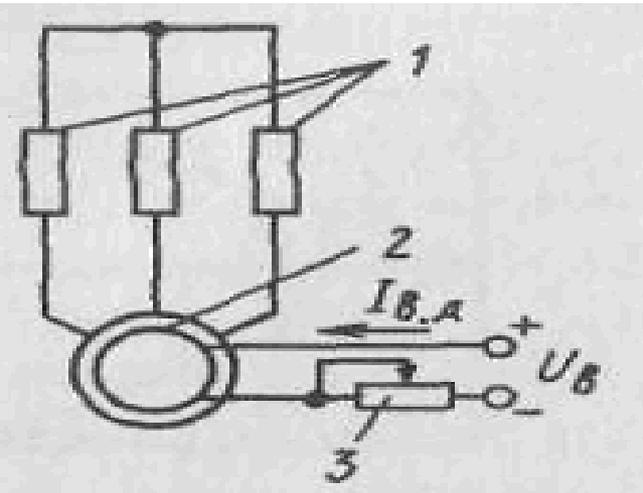
- при больших значениях θ двигатель выпадает из синхронизма,
- при небольших - его работа устойчива.

Номинальные значения угла θ составляют обычно $25...30^\circ$, им соответствует номинальный момент $M_{\text{ном}}$, и кратность максимального момента в этом случае $\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2...2,5$.

СД может работать во всех основных энергетических режимах:

двигательном и генераторном, с сетью и независимо от сети.

Регулирование скорости и торможение СД



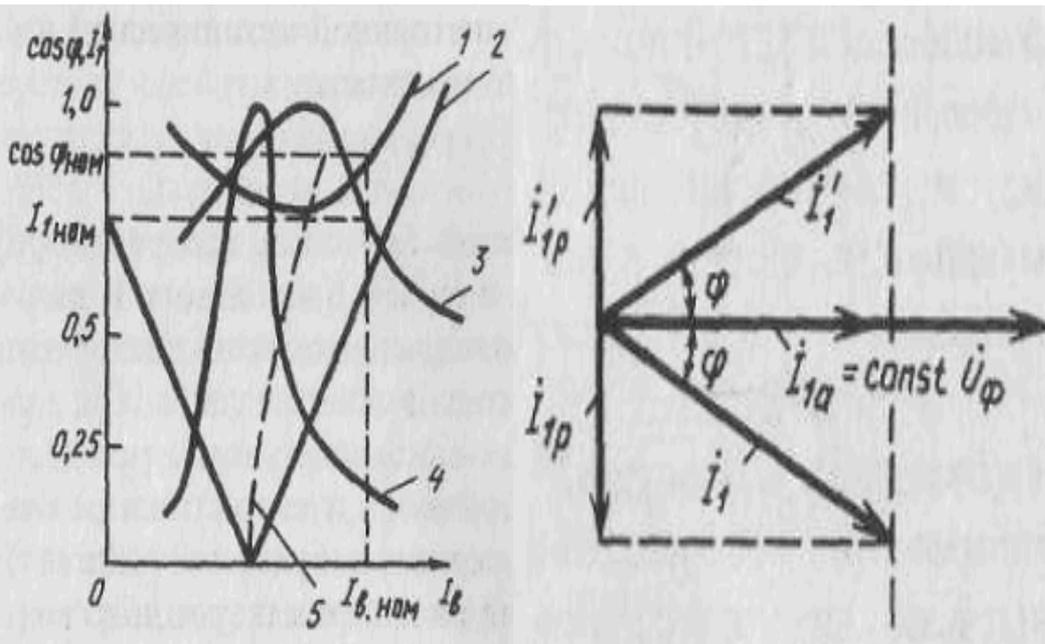
Основной областью применения СД до недавнего времени были нерегулируемые по скорости ЭП большой мощности. Появление статических преобразователей частоты определило практические возможности создания регулируемых синхронных ЭП по системе ПЧ - СД, основные принципы построения и свойства которой аналогичны системе ПЧ - АД.

Торможение СД, как и любого другого электродвигателя, осуществляется переводом его в генераторный режим.

Наиболее часто при этом используется **схема динамического торможения** (генераторный режим при работе СД независимо от сети переменного тока). В этой схеме обмотки статора СД 2 отключаются от сети переменного тока и закорачиваются на добавочные резисторы 1 (или накоротко), а обмотка возбуждения остается подключенной к источнику возбуждения U_B через резистор 3.

Торможение противовключением СД используется редко, так как перевод СД в этот режим сопровождается значительными бросками тока и момента, требует токоограничения и применения сложных схем управления.

СД как компенсатор реактивной мощности



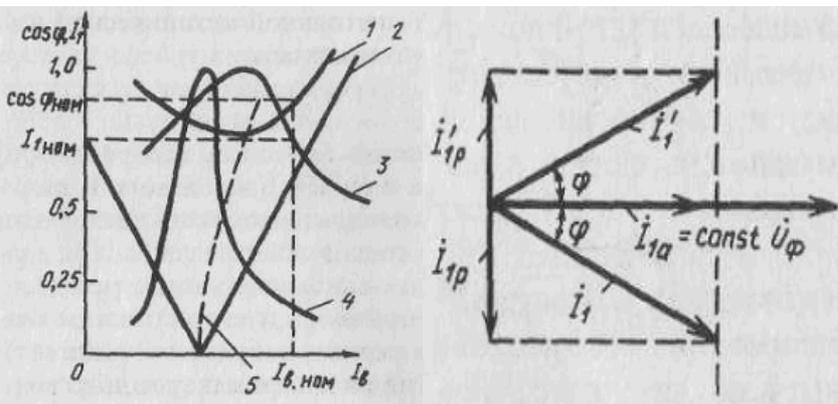
$I_1(I_B)$ – ток статора в зависимости от тока возбуждения возбудителя ;

1, 2 – графики $I_1(I_B)$ при постоянных напряжении, частоте и мощности $U_\varphi = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $P_1 = \text{const}$.

3, 4 – графики $\cos(\varphi)$ от тока возбуждения I_1 при постоянных напряжении, частоте и мощности $U_\varphi = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $P_1 = \text{const}$.

Минимуму зависимости $I_1(I_B)$ соответствует максимум коэффициента мощности $\cos \varphi = 1$, что можно объяснить с помощью фрагмента векторной диаграммы синхронного двигателя, показывающего расположение векторов напряжения сети U_φ , тока статора I_1 , его активной I_{1a} и реактивной I_{1p} составляющих при различных токах возбуждения СД.

СД как компенсатор реактивной мощности (продолжение)



Минимуму зависимости $I_1(I_B)$ соответствует максимум коэффициента мощности $\cos \varphi = 1$, что можно объяснить с помощью фрагмента векторной диаграммы синхронного двигателя, показывающего расположение векторов напряжения сети U_ϕ , тока статора I_1 , его активной I_{1a} и реактивной I_{1p} составляющих при различных токах возбуждения СД.

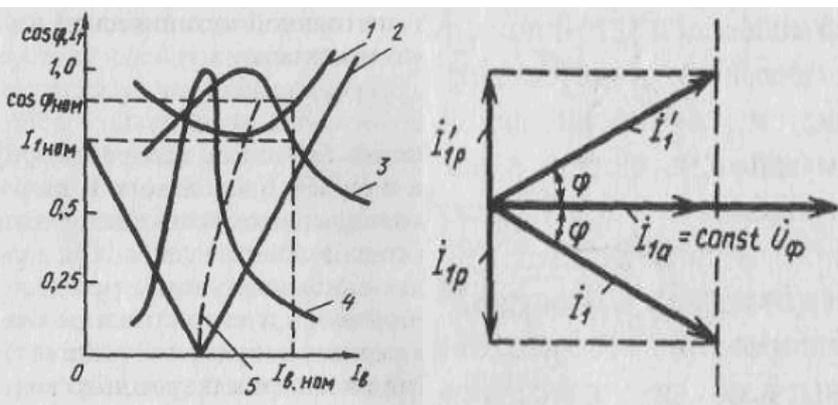
При небольших токах возбуждения ток статора I_1 отстает от напряжения U_ϕ на угол φ , что соответствует работе СД с отстающим $\cos \varphi$ и потреблению им реактивной энергии питающей сети, так как активная составляющая полного тока $I_{1a} = I_1 \cos \varphi$ совпадает по направлению с вектором напряжения сети U_ϕ , а реактивная составляющая I_{1p} отстает от него на 90° .

При увеличении тока возбуждения СД конец вектора полного тока I_1 будет перемещаться вверх до штриховой вертикальной линии, что означает уменьшение реактивной составляющей тока. При некотором токе возбуждения, близком к номинальному, реактивна составляющая тока станет равной нулю, т.е. ток статора будет чисто активным $I_1 = I_{1a}$.

Этому режиму и будут соответствовать точки минимумов кривых 1, 2 и максимально возможное значение $\cos \varphi = 1$.

При дальнейшем увеличении тока возбуждения СД вновь появится реактивная составляющая тока I_{1p} , но уже опережающая напряжение сети на 90° . За счет этого ток статора будет также опережать напряжение сети и СД начнет работать с опережающим $\cos \varphi$, отдавая реактивную энергию в питающую сеть.

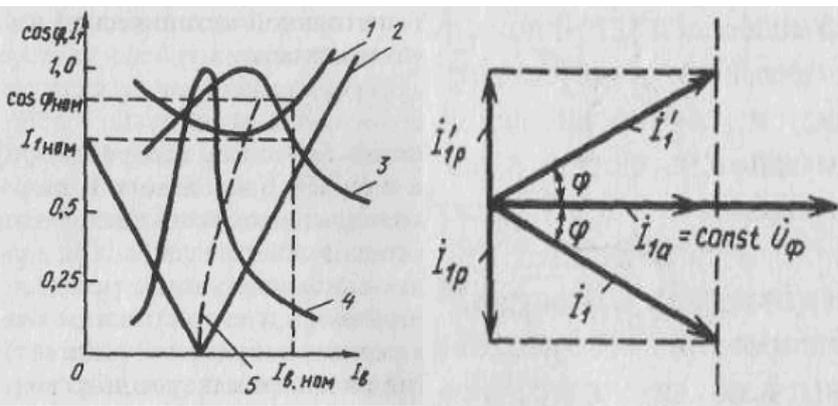
СД как компенсатор реактивной мощности (продолжение)



На рис. показаны зависимости $I_1, (I_B)$ - кривые 1,2 и $\cos \varphi(I_B)$ кривые 3, 4 при номинальной нагрузке СД $P_{ном}$ (1 и 3) и его холостом ходе (2 и 4). Область характеристик справа от штриховой линии 5 соответствует работе СД с опережающим $\cos \varphi$, слева от нее с отстающим, на самой этой линии $\cos \varphi = 1$. Отметим, что СД без механической нагрузки на валу носит название компенсатора реактивной мощности и часто используется в этой функции в системах электроснабжения.

Как видно из рис., с ростом мощности нагрузки область генерации реактивной мощности (опережающего $\cos \varphi$) смещается в I сторону больших токов возбуждения. Таким образом, если СД работает с переменной нагрузкой на валу, то для полного использования его компенсирующих свойств требуется соответствующее изменение тока возбуждения.

СД как компенсатор реактивной мощности (продолжение)

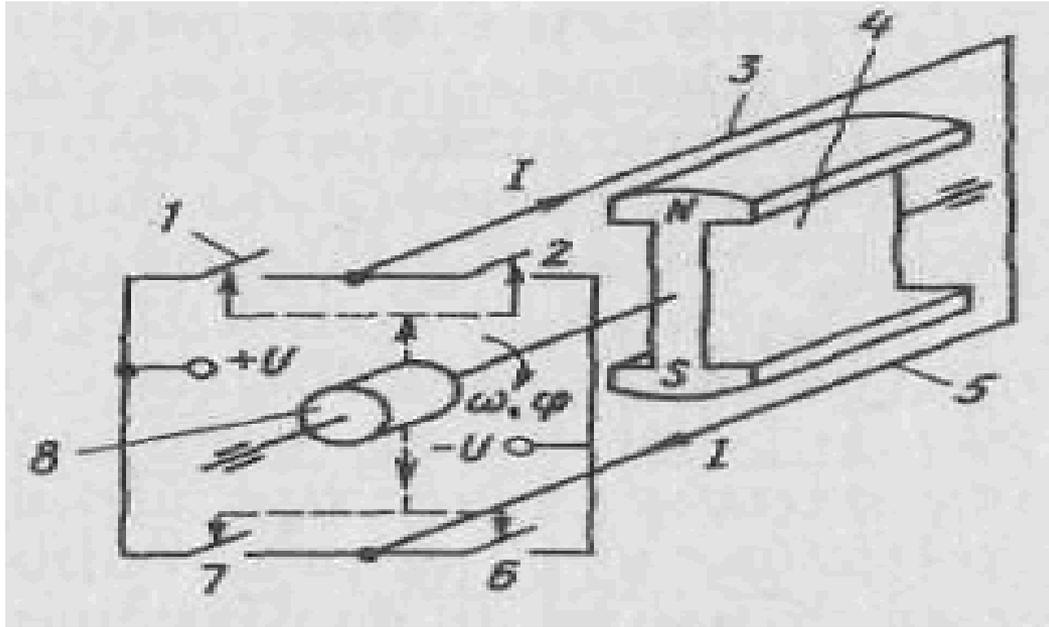


Регулирование тока возбуждения позволяет использовать СД как :

- компенсатор реактивной мощности в системе электроснабжения;
- обеспечивать при необходимости устойчивость работы двигателя при колебаниях механической нагрузки;
- поддержание нормального напряжения в узле системы энергоснабжения, к которому присоединен двигатель;
- минимум потерь энергии в двигателе и системе энергоснабжения;
- регулирование $\cos \varphi$ двигателя или в узле подключения его к системе энергоснабжения.

В общем случае регулирование тока возбуждения СД осуществляется системами автоматического регулирования возбуждения (АРВ), в которых используются тиристорные возбудители и различные виды обратных связей.

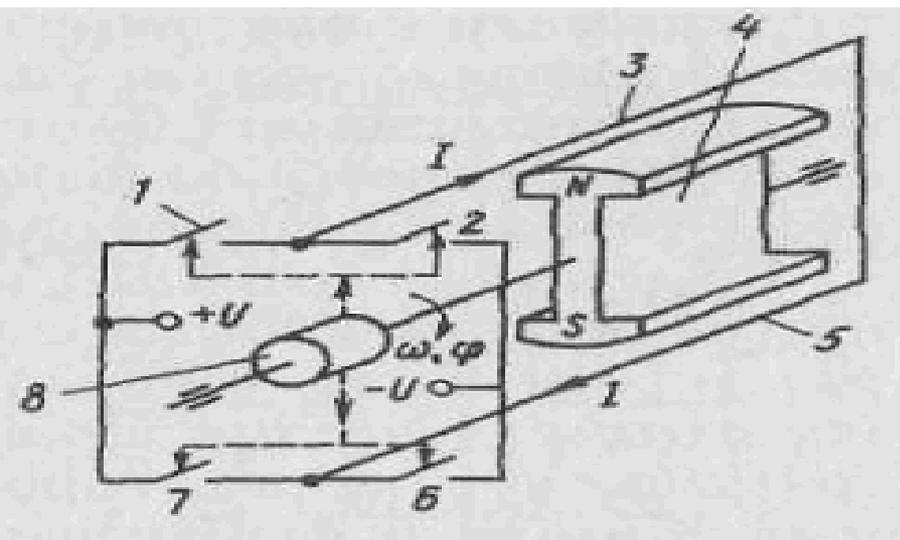
Электропривод с вентильным двигателем



Вентильным (ВД) называется синхронный двигатель с электронным коммутатором напряжения, к которому подключена обмоток статора, и датчиком положения ротора, установленным на валу двигателя и управляющим работой коммутатора в зависимости положения ротора.

Датчик положения ротора генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются ключи коммутатора, подключающего к сети соответствующие обмотки статора. В результате этого магнитное поле статора вращается той же средней скоростью, что и ротор.

Электропривод с вентильным двигателем (продолжение)



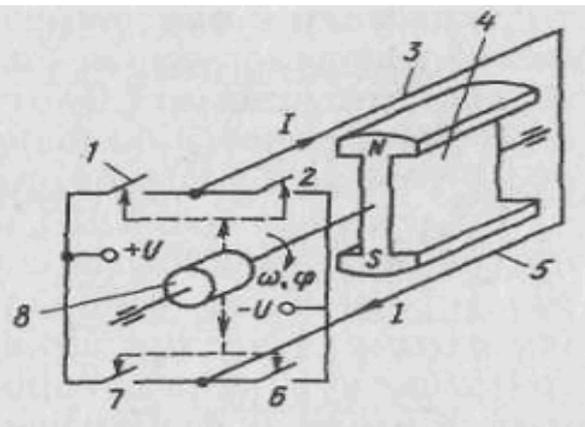
Ротор 4 которого представляет собой постоянный магнит N - S с датчиком положения на валу 8.

Коммутатор выполнен на четырех управляемых ключах 1, 2 и 6, 7 и связан с источником постоянного напряжения U .

Обмотка статора СД на схеме для упрощения анализа представлена двумя проводниками 3 и 5.

Рассмотрим работу схемы, предположив, что управляемые ключи могут скрываться и закрываться по сигналам с датчика 8 в любой требуемой последовательности и на любую длительность.

Электропривод с вентильным двигателем (продолжение)



Для протекания по проводникам 3 и 5 тока I в указанном направлении должны быть замкнуты ключи 1 и 6.

В результате взаимодействия магнитного поля ротора с током I в проводниках 3 и 5 на ротор будет действовать вращающий момент, I «вворачивающий его в соответствии с правилом левой руки по часовой стрелке.

После поворота ротора на 180° (на половину оборота) для сохранения прежнего направления вращающего момента на валу двигателя направление тока в проводниках 3 и 5 необходимо изменить на противоположное.

Для этого с датчика 8 поступает команда на размыкание ключей 7 и 6 и замыкание ключей 2 и 7.

После поворота ротора еще на 180° по сигналу с датчика 8 замыкаются ключи 1 и 6 и размыкаются ключи 2 и 7 и т. д.

Таким образом, по сигналам с датчика положения ротора 8 с помощью управляемых ключей происходит коммутация тока в обмотке статора, чем обеспечивается постоянное направление вращающего момента двигайся при любой скорости его вращения.

Электропривод с вентильным двигателем (продолжение)

Нетрудно заметить, что ВД по принципу своего действия аналогичен двигателю постоянного тока, у которого обмотка возбуждения (или постоянные магниты) находится на роторе (вращающейся масти).

Преимущество ВД при этом состоит в том, что у него **нет механического коллекторно-щеточного узла и потому он является полностью бесконтактным** при возбуждении от постоянных магнитов или имеет два контактных кольца при использовании обмотки возбуждения.

Совпадение принципов действия двигателя постоянного тока и ВД определяет схожесть их механических характеристик.

На статоре ВД располагается трехфазная обмотка переменного тока, питаемая от вентильного коммутатора.

Ротор, обеспечивающий возбуждение двигателя, может быть выполнен в виде постоянного магнита или с обмоткой возбуждения, питаемой от источника постоянного тока через контактные кольца и щетки.

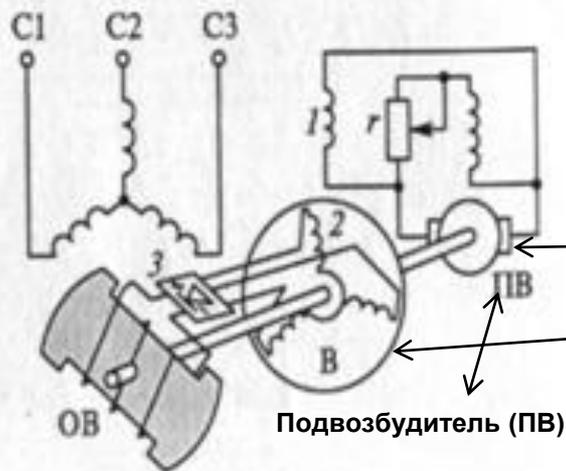
Двигатели с возбуждением от постоянных магнитов и мощностью до 30 кВт обычно многополюсные.

В этом диапазоне мощности двигатели с постоянными магнитами имеют меньшие габаритные размеры и массу и более высокий КПД по сравнению с двигателями, имеющими обмотку возбуждения.

Электропривод с вентильным двигателем (продолжение)

В ВД средней и большой мощности обычно используются СД с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе.

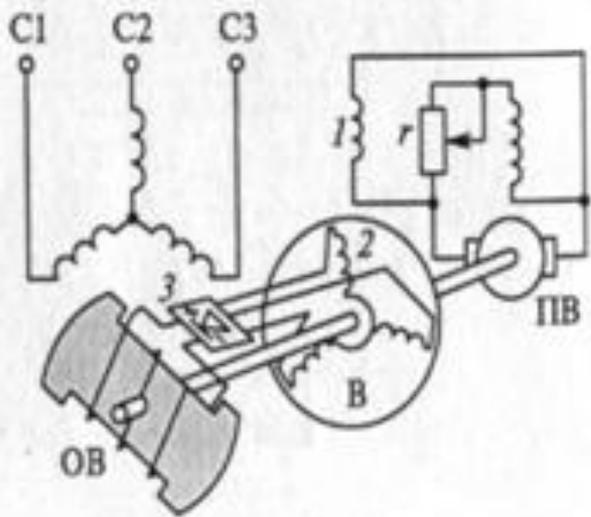
В последнее время ВД мощностью от 30 до 200 кВт стали использоваться бесконтактными с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой.



В качестве возбудителя в этом случае применяют синхронный генератор переменного тока **В**. Обмотка **2** этого генератора, в которой наводится ЭДС (обмотка якоря), расположена на роторе, а обмотка возбуждения **1** — на статоре. В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения синхронной машины оказываются вращающимися, и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток.

Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь 3, расположенный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с ее обмоткой возбуждения и якорем возбудителя. Питание постоянным током обмотки возбуждения 1 возбудителя В осуществляется от под-возбудителя ПВ — генератора постоянного тока. Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

Электропривод с вентильным двигателем (продолжение)



Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо (зубчатку), через которое замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока.

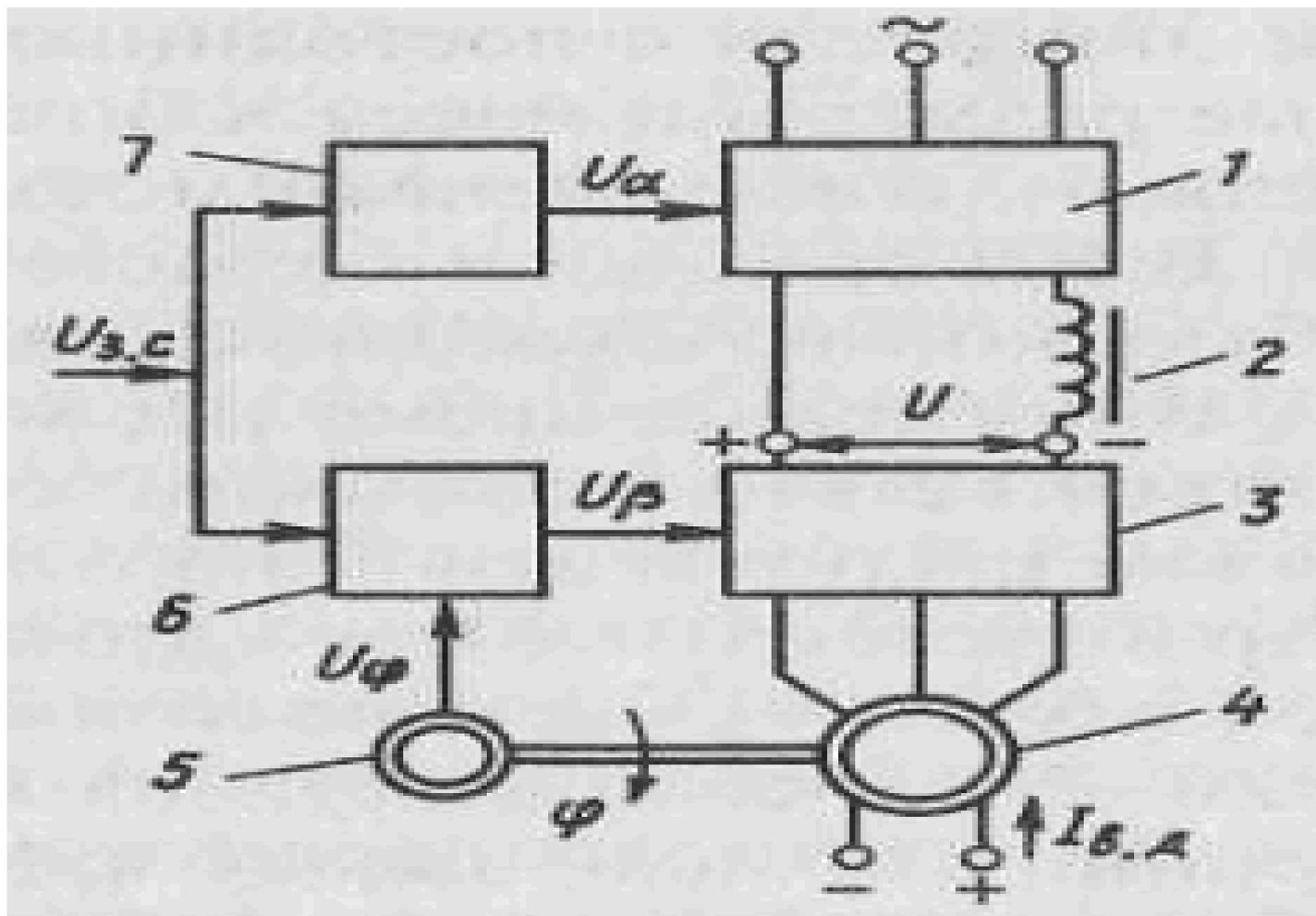
Вращается он синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой.

Обмотка возбуждения в этом случае усиливает магнитный поток и тем самым увеличивает вращающий момент двигателя.

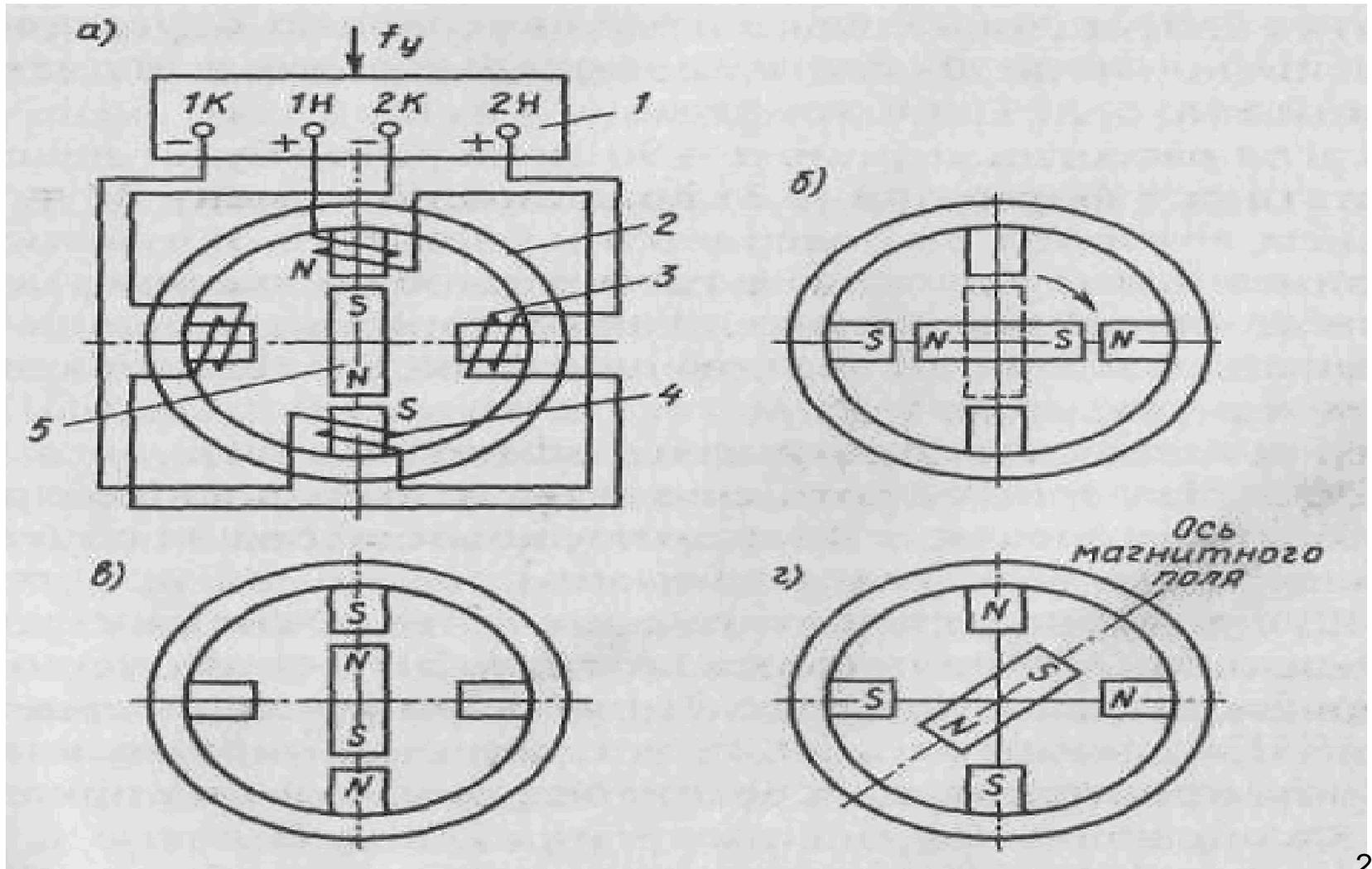
Коммутатор в схеме ВД представляет по принципу своего действия управляемый инвертор, который может питаться непосредственно от источника постоянного тока (сети постоянного тока, аккумуляторной батареи) или от управляемого выпрямителя, если двигатель подключается к сети переменного тока.

В этом случае коммутатор представляет собой преобразователь частоты со звеном постоянного тока.

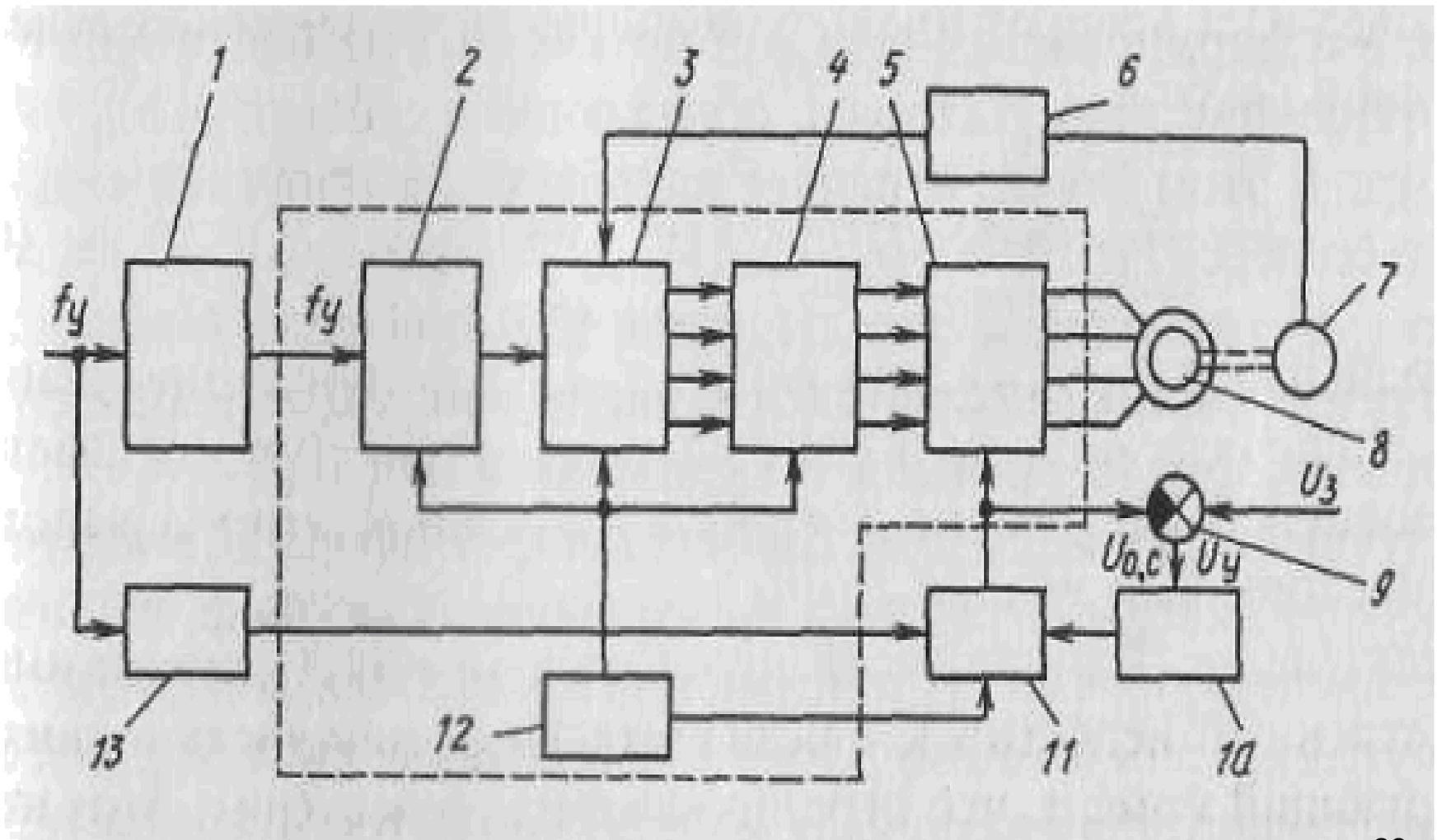
ВД с искусственной коммутацией



ЭП с шаговым двигателем



Схемы управления



Вентильно-индукторный ЭП

