

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Алгоритмы управления систем  
синхронного электропривода

## *Назначение и требования к синхронному электроприводу*

Синхронные двигатели применяются в электроприводах, обеспечивающих постоянную скорость в установившихся режимах. Такие двигатели используются так же, как генераторы реактивной мощности, в системе электроснабжения.

В синхронных электроприводах требуется быстросействующая форсировка возбуждения двигателя при работе привода с резкопеременной нагрузкой и при снижении напряжения сети.

В качестве таких АРВ получили применение статические тиристорные возбудители, выпускаемые электротехнической промышленностью в виде комплектных устройств мощностью от 15 до 74 кВт типа ТЕ8-320 и от 40 до 400 кВт типа КТУ

Автоматическое регулирование возбуждения синхронного двигателя выполняется по различным алгоритмам в статических и динамических режимах

В установившихся режимах регулирование обусловлено требованиями системы электроснабжения, и осуществляется по одному из следующих алгоритмов обеспечивающих стабилизацию тока возбуждения синхронного двигателя ( $I_v = \text{const}$ ); напряжения питания ( $U_n = \text{const}$ ); реактивной мощности, вырабатываемой синхронным двигателем ( $Q = \text{const}$ );  $\cos \varphi$  двигателя ( $\cos \varphi_d = \text{const}$ ) и  $\cos \varphi$  системы питания ( $\cos \varphi_n = \text{const}$ ).

Непосредственный контроль некоторых регулируемых величин затруднен, поэтому они оцениваются косвенно

Координатами регулирования в синхронных электроприводах являются ток возбуждения (ток ротора)  $I_v$ ; ток статора (полный  $I$  и его активная  $I_a$  и реактивная  $I_r$  составляющие); фаза тока статора угол  $\varphi$ ; напряжение (питания  $U_n$  реактивная мощность двигателя  $Q$  и угол мощности двигателя  $\Theta$ ).

Стабилизация тока возбуждения синхронного двигателя осуществляется при всех алгоритмах управления. Ее необходимость определяется изменениями напряжения питания возбудителя и температуры окружающей среды.

Выбор других алгоритмов управления производится в зависимости от вида нагрузки электропривода.

При плавно изменяющейся нагрузке двигателя, вызывающей колебания напряжения питания, превышающие допустимые значения, используется управление, обеспечивающее стабилизацию напряжения питающей сети ( $U_n = \text{const}$ ). Это достигается автоматическим регулированием потока реактивной мощности, вырабатываемой или потребляемой синхронным двигателем. Регулируемыми координатами при этом являются реактивная мощность  $Q$ , активный  $I_a$  и полный  $I$  ток статора двигателя. При управлении с алгоритмом  $U_n = \text{const}$  вводятся ограничения верхнего и нижнего значения тока возбуждения  $S_D$ , что определяется пределом статической устойчивости двигателя при заданной нагрузке ( $I_b \geq I_{b\min}$ ) и тепловым режимом двигателя ( $I_b \leq I_{b\max}$ ).

Если нагрузка меняется плавно и колебания напряжения сети незначительны, то осуществляется стабилизация  $\cos \varphi_d$ . Регулируемыми координатами при этом являются угол мощности  $\Theta$ , а также  $I_a$  и  $I$ . При переменной нагрузке с превышением ее пиков максимального момента двигателя используются алгоритмы  $Q = \text{const}$  и  $\cos \varphi_d = \text{const}$ .

В крупных синхронных электроприводах, работающих с равномерной или плавно меняющейся нагрузкой с большим резервом мощности в сети и колебаниях напряжения питания, не превышающих допустимые значения, применяется стабилизация  $\cos \varphi_n$ .

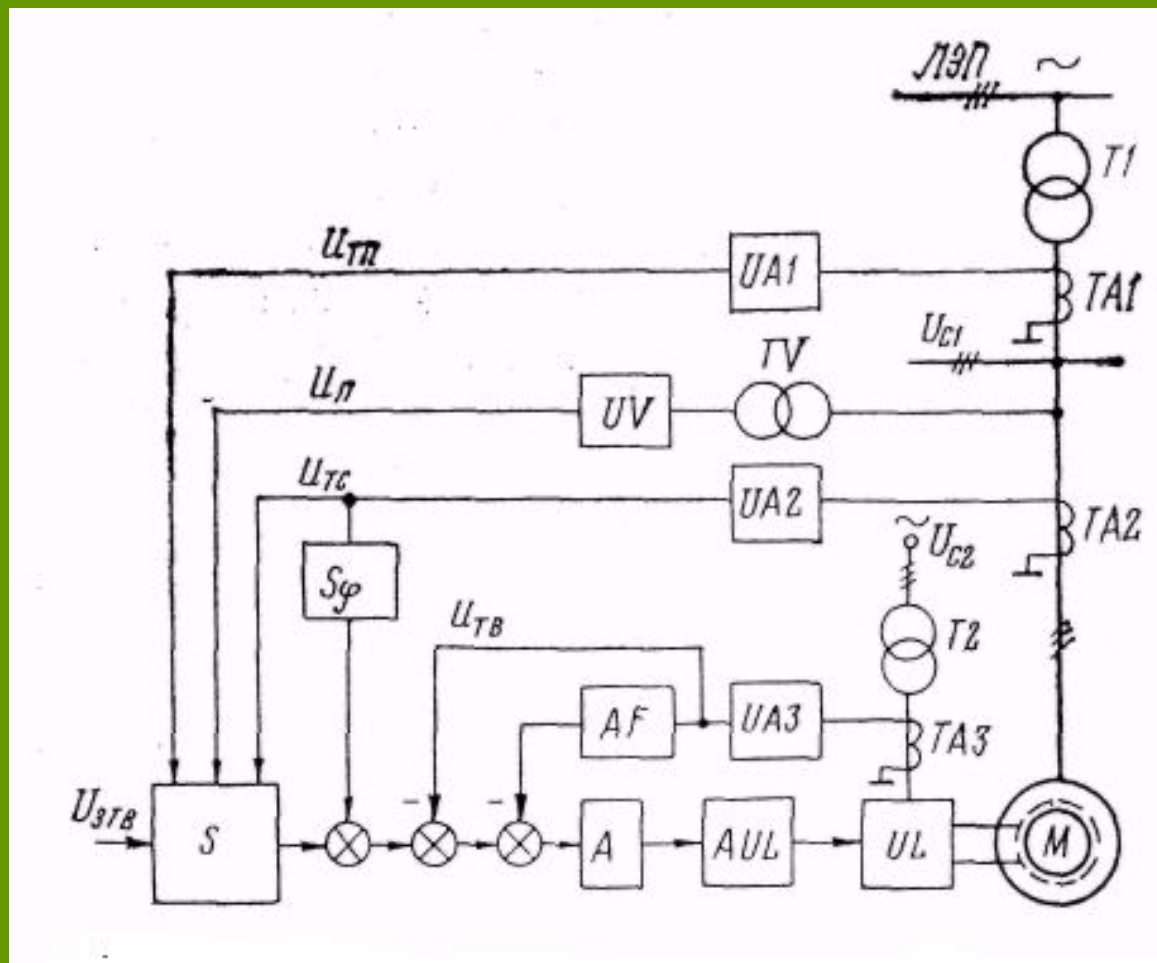
При резкопеременной и знакопеременной нагрузках стабилизируется реактивная мощность двигателя ( $Q = \text{const}$ ). При этом обеспечиваются минимальные колебания питающего напряжения

$$\Delta U_n = \frac{\Delta Q}{S_{кз}} = \frac{Q_\phi - Q_p}{S_{кз}}$$

Стабилизация реактивной мощности одновременно обеспечивает максимальное значение вырабатываемой синхронным двигателем реактивной мощности, ограничиваемой его допустимым тепловым режимом. При недостатке реактивной мощности алгоритм  $Q = \text{const}$  обеспечивает минимум потерь энергии. Регулируемыми координатами при стабилизации реактивной мощности являются  $Q$ ,  $I_a$  и  $I$ .

Для осуществления требуемых динамических режимов при возмущающих воздействиях в системе электропривода используются гибкие обратные связи по производной активной составляющей тока статора, обеспечивающей демпфирование колебаний ротора при набросе нагрузки на вал СД, и квадрату активного или полного тока статора, повышающей быстродействие системы автоматического регулирования за счет форсирован тока возбуждения.

# Система управления синхронного электропривода с суммирующим усилителем



При ручном управлении СЭП обеспечивает пуск синхронного двигателя при полном (прямой) или пониженном (легкий или тяжелый) напряжениях на обмотке статора, с автоматической подачей возбуждения с контролем тока статора и форсировку возбуждения до  $1,75 I_{в\text{ ном}}$  при снижении напряжения питания двигателя до 15—20% от номинального значения,

Алгоритмы управления формирует задатчик статического режима S. Он получает сигналы обратных связей по току питающей сети  $I_{тп}$ , напряжению  $U_{п}$  и току  $I_{тс}$  статора и вырабатывает сигналы управления, пропорциональные напряжению статора и одной из следующих величин: полному, активному и реактивному токам статора; (углам сдвига фаз питающей сети  $\varphi_{п}$  и двигателя  $\varphi_{д}$  и реактивному току питающей сети.

Задатчик угла  $S_{\varphi}$  работает аналогично задатчику статического режима S и предназначен для изменения угла нагрузки, когда S изменяет другие переменные

При превышении током ротора его номинального значения используется ограничитель тока ротора АР, который с выдержкой времени, включает отрицательную обратную связь по току ротора, снижающую ток ротора до номинального значения.

Алгоритм управления формируется задатчиком статического режима

$$u_{ув} = U_{зв} - u_{тв} = U_{зв} - k_{тв} i_v$$

ЭДС возбудителя СД при этом определяется

$$E_B = u_{ив} k_y k_{пв}$$

Стабилизация напряжения питания при спокойной нагрузке осуществляется за счет отрицательной обратной связи по напряжению

$$u_{ув} = U_{зв} - k_{тв} i_v + k_H (U_{зп} - u_{п})$$

Отрицательная обратная связь по напряжению в комбинации с отрицательной связью по току возбуждения позволяет при резко переменной нагрузке стабилизировать реактивную мощность за счет изменения  $U_{зп}$  в функции изменения реактивного тока статора

$$U_{зп} = U_{n,сп} = f \left[ \int_0^t (I_{зр} - i_p) dt \right]$$



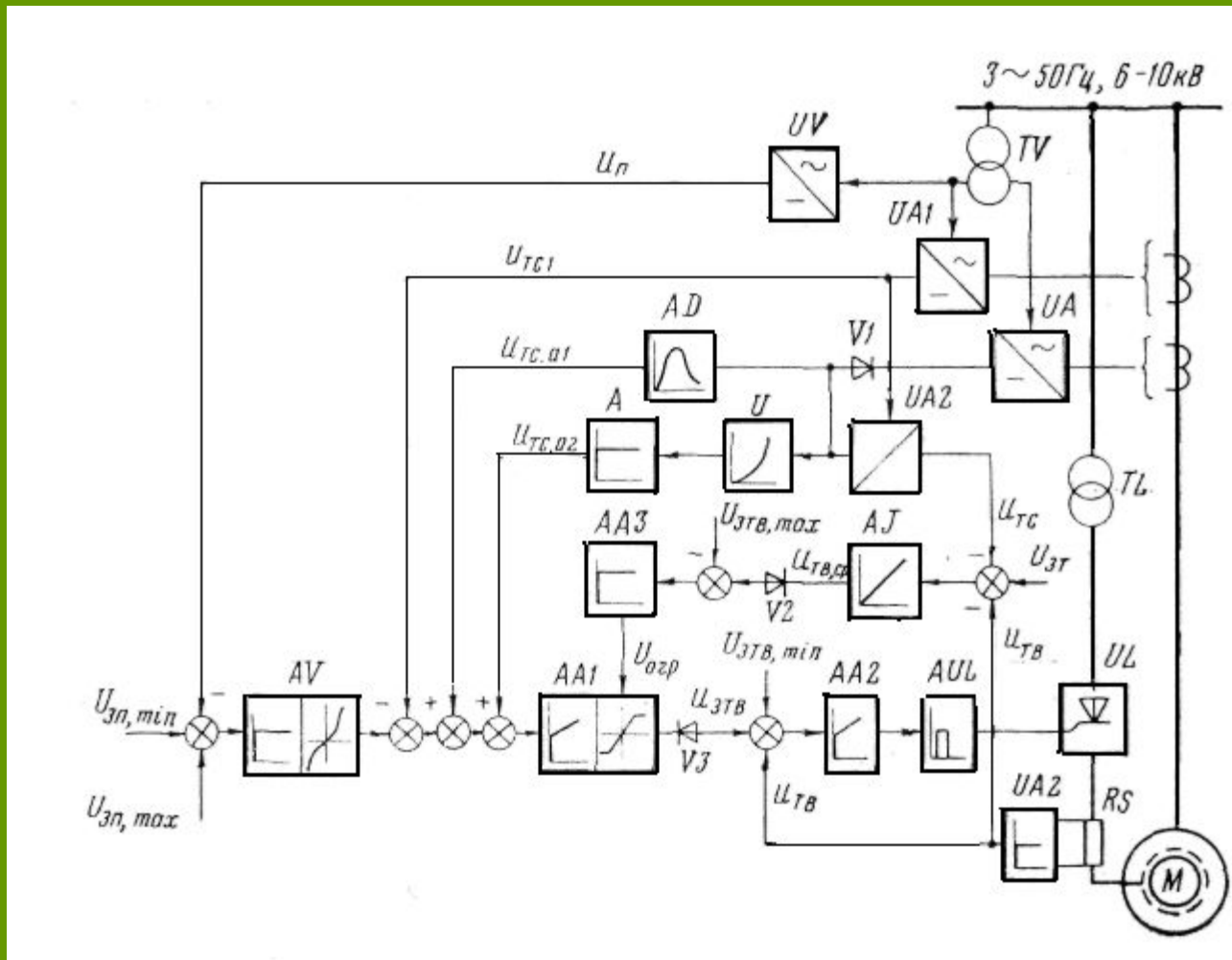
Для создания динамических режимов используются положительные обратные связи по производной и квадрату активной составляющей тока статора, обеспечивающие соответственно демпфирование колебаний ротора и форсировку тока возбуждения СД. Тогда напряжение управления АРВ

$$U_{ув} = U_{зв} - k_{тв} i_v + k_n(U_{зп} - u_n) + k_{та1} di_a / dt + k_{та2} i_a^2$$

Для регулирования реактивной мощности ( $Q = \text{const}$ ) в электроприводах с резкопеременной нагрузкой используются отрицательные обратные связи по току возбуждения и по реактивному току статора, а для требуемых динамических режимов используется еще связь по производной и квадрату активной составляющей тока статора, обеспечивающие демпфирование колебаний ротора и форсировку тока возбуждения

$$U_{ув} = U_{зв} - k_{тв} i_v + k_{та1} di_a / dt + k_{та2} i_a^2 + k_{тр}(I_{зр} - i_p)$$

# Система управления синхронного электропривода с подчиненным регулированием координат

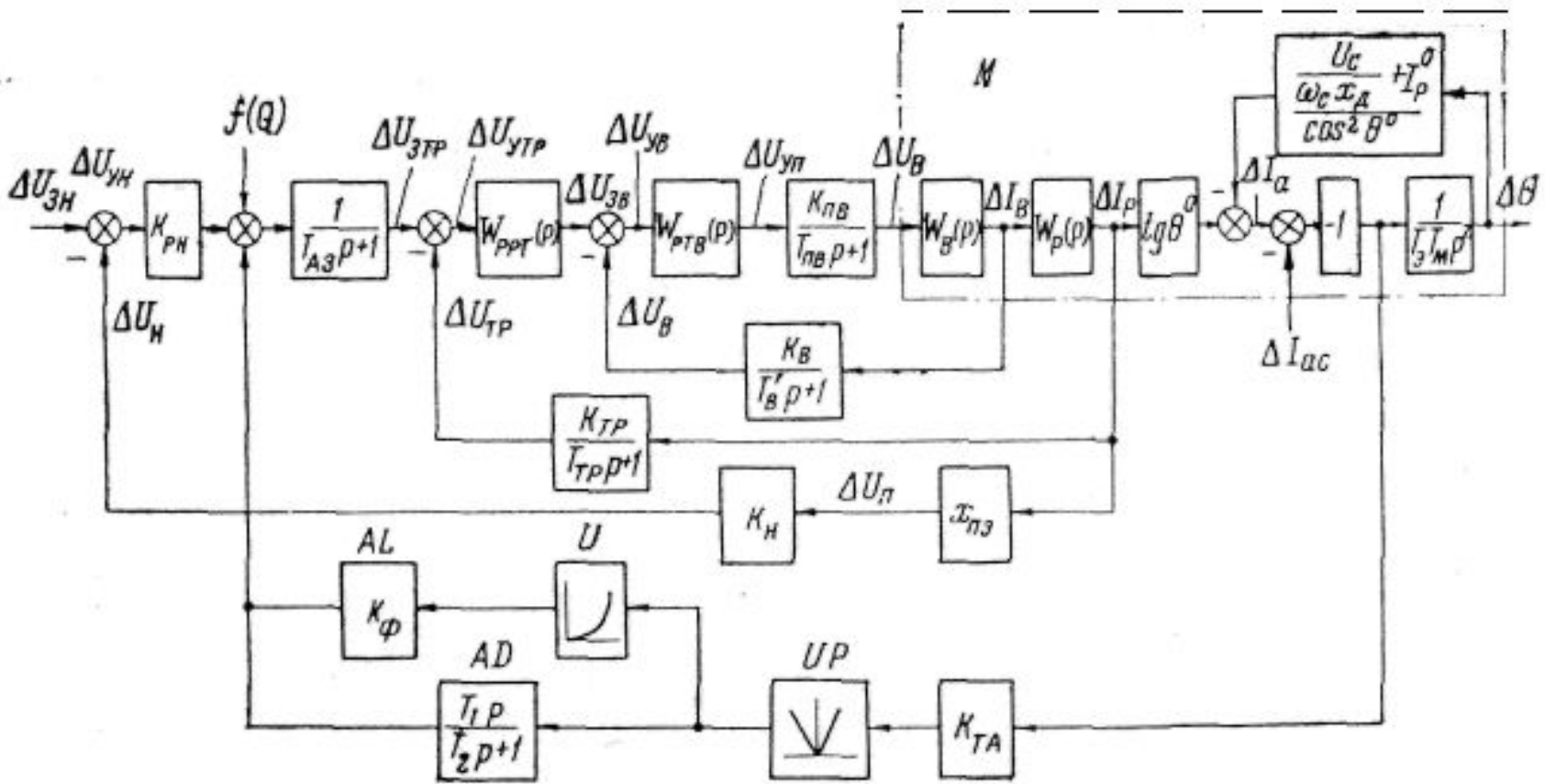


Для улучшения динамических режимов на регулятор АА1 дополнительно вводятся сигналы, пропорциональные производной  $u_{та,1}$  и квадрату  $u_{та,2}$  активной составляющей тока статора, обеспечивающие соответственно демпфирование колебаний ротора и форсировку тока возбуждения при набросе нагрузки на СД

Минимальное значение тока возбуждения задается в виде уставки  $U_{зтв,мин}$ , подаваемой на регулятор АА2, а максимальное — через регулятор АА1 в виде напряжения ограничения  $U_{огр}$ .

Это напряжение формируется в дополнительном пропорциональном регуляторе тока возбуждения АА3, на вход которого подаются уставка максимального значения тока возбуждения  $U_{зтв,мах}$  и напряжение обратной связи  $u_{тв,ср}$ , пропорциональное среднеквадратичным значениям токов статора и ротора, получаемое с интегратора АЈ

На входе АЈ напряжение задания тока  $U_{зт}$  сравнивается с сигналами, пропорциональными полному току статора  $u_{тс}$  и току возбуждения ротора  $u_{тв}$



Цепь возбуждения двигателя

$$W_{\epsilon}(p) = \frac{\Delta I_{\epsilon}}{\Delta U_{\epsilon}} = \frac{T_{\epsilon}'' p + 1}{R_{\epsilon} (T_{\epsilon} p + 1)(T_{\epsilon}' p + 1)},$$

Цепь реактивного тока

$$W_p(p) = \frac{\Delta I_p}{\Delta I_{\epsilon}} = k_{cd} \frac{T_{pm} p + 1}{T_{\epsilon}'' p + 1}$$

$T_{\epsilon} = L_{\epsilon}/R_{\epsilon}$  — постоянная времени цепи возбуждения;  $T_{\epsilon}'$  — постоянная времени, учитывающая взаимную индуктивность обмоток ротора и статора;  $T_{\epsilon}''$  — постоянная времени, учитывающая не мгновенное нарастание  $\Delta u_{\epsilon}$ .

$k_{cd}$  — коэффициент СД;  $T_{рт}$  — постоянная времени датчика реактивного тока

Напряжение питания СД приближенно оценивается по реактивному току статора

$$\Delta u_n \approx \Delta i_p x_{нэ}$$

хпэ — эквивалентное фазное реактивное сопротивления питающей сети

Цепь активного тока

$$\Delta I_a = \Delta I_p \operatorname{tg} \Theta^0 - \frac{\frac{U_n}{\omega_c} + I_p^0}{\cos^2 \Theta^0} \Delta \Theta$$

$I_p^0$  — фиксированное установившееся значение реактивного тока статора;  
 $\omega_c$  — угловая частота тока статора;  $x_d$  — реактивное фазное сопротивление двигателя

Электромагнитный момент СД оценивается активным током

$$\Delta I_a - \Delta I_{ac} = -T_{\varepsilon} T_M p^2 \Delta \Theta$$

За малую некомпенсируемую постоянную времени принимается  $T_{\mu} = T_{пв} + T_{в'} + T_{в''} + T_{тр}$

$$W_{птв}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p} \frac{R_{\epsilon}(T_{\epsilon}p+1)}{k_{нв}(T_{\epsilon}''p+1)} \frac{(T_{\epsilon}''p+1)}{k_{тв}} = \frac{R_{\epsilon}(T_{\epsilon}p+1)}{2T_{\mu}pk_{нв}k_{тв}}$$

Передаточная функция замкнутого оптимизируемого контура тока возбуждения

$$W_{зктв}(p) = \frac{(T_{\epsilon}''p+1)}{k_{тв}} \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1}$$

Регулятор реактивного тока принимается пропорционально-интегральным с передаточной функцией

$$W_{ррт}(p) = \frac{(\sqrt{2}T_{\mu}p+1)k_{тв}}{2T_{\mu}mpk_{сд}k_{мп}p}$$

Регулятор напряжения выполняется пропорциональным с нелинейной характеристикой.

$$\Delta i_p \approx \frac{x_{нэ}}{2U_n} i_a^2$$

Корректирующие связи по производной и квадрату активного тока статора выполняются в виде дифференциального регулятора (ДР) АД и регулятора форсировки (РФ) АЛ

Д Р обеспечивает демпфирование колебаний ротора при набросе нагрузки на вал СД. В этом случае передаточная функция системы регулирования равна

$$W_p(p) = \frac{\frac{\cos^2 \theta^0}{U_n / (\omega_c x_\delta) + I_p^0} (T_\delta p + 1)}{\frac{\cos^2 \theta^0}{U_n / (\omega_c x_\delta) + I_p^0} T_\varepsilon T_m p^2 + T_\delta p + 1}$$

Оптимальный коэффициент демпфирования колебаний получается при

$$T_\delta = \sqrt{\frac{2 \cos \theta^0}{U_n / (\omega_c x_\delta) + I_p^0} T_\varepsilon T_m}$$



Это реализуется введением ДР с передаточной функцией

$$W_{др}(p) = T_1 p / (T_2 p + 1)$$

где  $T_1 = (k_{mp} / k_{ma} \operatorname{tg} \theta^0) T_\Delta$

;  $T_2 = T_1 - T_{ктр}$ ;  $T_{ктр}$  — постоянная времени замкнутого контура регулирования реактивного тока

Регулятор форсировки возбуждения АЛ осуществляет форсировку тока возбуждения, пропорциональную сигналу квадрата активной составляющей тока, формируемому квадратичным преобразователем U. Постоянство знака сигнала обратной связи по  $i_a$  обеспечивает устройство выделения модуля АР

# Системы частотного управления синхронного электропривода

При необходимости регулирования скорости и момента СД его обмотка статора питается от преобразователя частоты, обеспечивающего регулирование частоты и напряжения питания СД

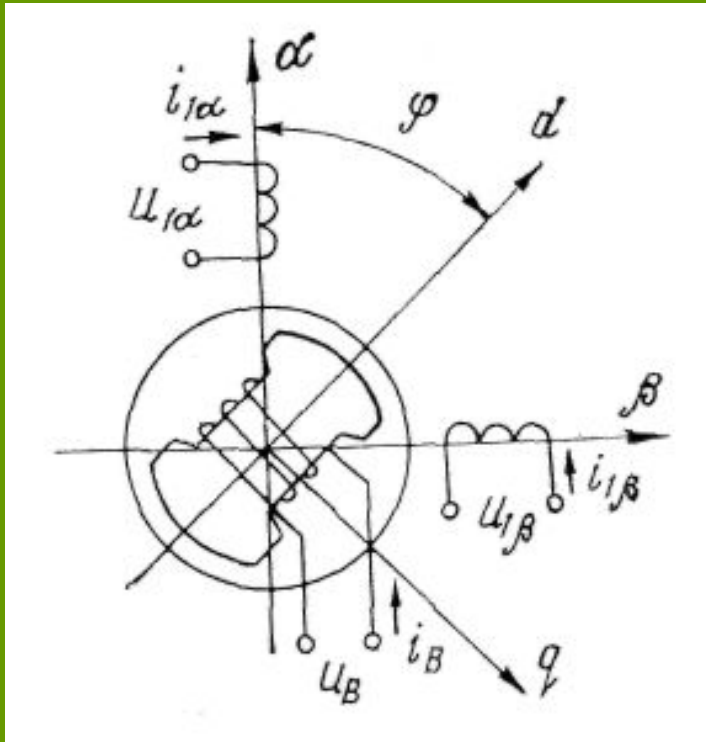
Такие СЭП позволяют обеспечить двухзонное регулирование скорости как вниз, так и вверх от синхронной скорости

При регулировании скорости СД, так же как и в АД, необходимо вместе с регулированием частоты  $f$  осуществлять регулирование напряжения  $U$

Системы с СД получаются проще из-за отсутствия необходимости стабилизации скорости при изменении нагрузки

Разомкнутые СЭП применяются при продолжительных режимах работы синхронного электропривода, в которых основное значение имеют статические установившиеся режимы

В динамике такие СЭП обеспечивают частотный пуск СД с невысоким быстродействием. При необходимости высоких быстродействий для электроприводов, работающих в кратковременных и повторно-кратковременных режимах, используются замкнутые системы регулирования скорости и момента с управлением преобразователем частоты в функции положения ротора или положения результирующего вектора потокосцепления. Для управления такими СЭП применяется векторное управление.



В СД ротор синхронно вращается с полем статора и при работе в двигательном режиме ротор отстает от поля статора на угол  $\Theta = \varphi_0 - \varphi$ , где  $\varphi_0 = \omega_0 t$  — угол, определяемый вращением поля статора, а  $\varphi = \omega t$  — вращением (положением) ротора.

$$u_{1d} = R_1 i_{1d} + \frac{d\Psi_{1d}}{dt} - \omega \Psi_{1q};$$

$$u_{1q} = R_1 i_{1q} + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + \omega \Psi_{1d};$$

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt};$$

$$M = \frac{m}{p_n} (\Psi_{1d} i_{1q} - \Psi_{1q} i_{1d})$$

Потокосцепления с учетом, что для явно полюсного ротора СД  $L_{1d} \neq L_{1q}$  и  $L_{12d} \neq L_{12q}$  :

$$\Psi_{1d} = L_{1d}i_{1d} + L_{12d}i_{\epsilon};$$

$$\Psi_{1q} = L_{1q}i_{1q};$$

$$\Psi_{\epsilon} = L_{\epsilon}i_{\epsilon} + L_{12d}i_{1d}$$

Вектор напряжения  
статора

$\overset{\omega}{U}_1$

определяющий поле статора, вращается со  
скоростью поля ротора, отставая от него на  
угол  
 $\Theta$ , как и поле статора

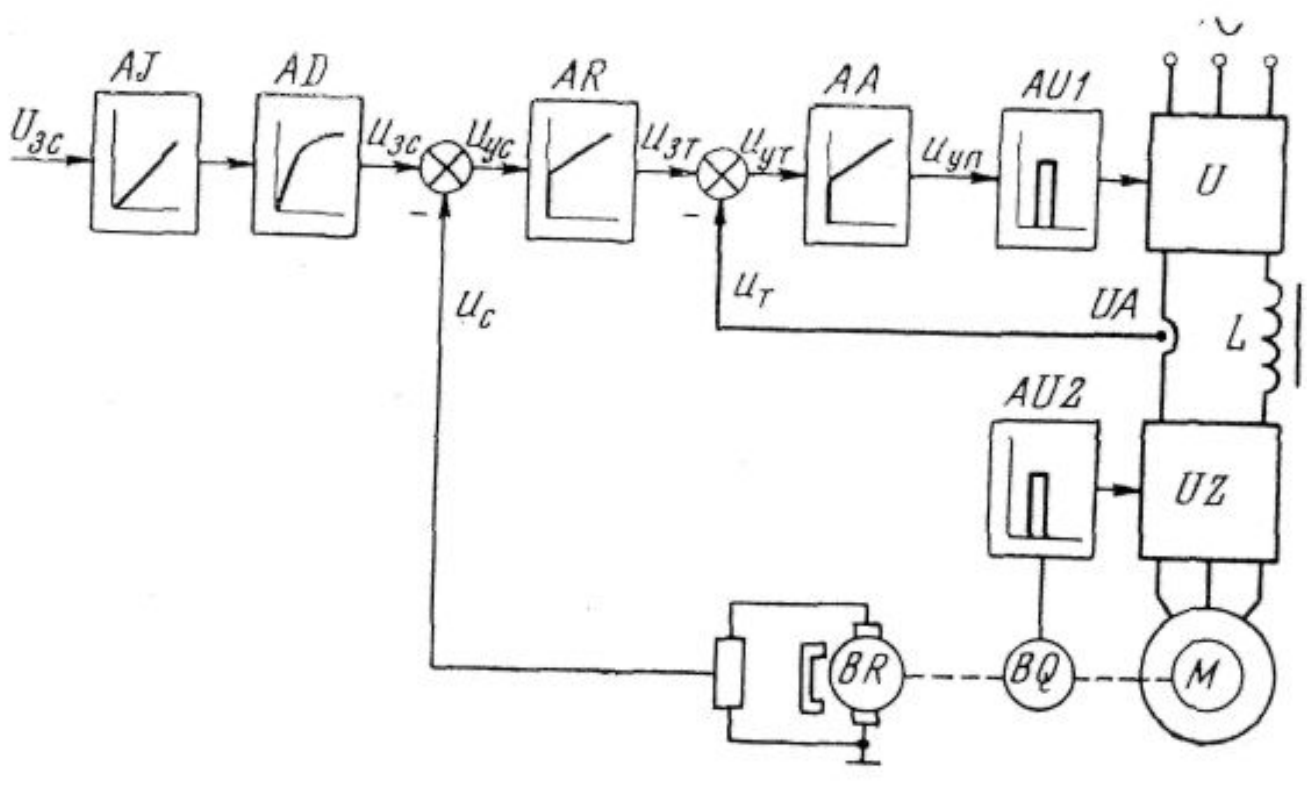
$$U_{1d} = U_1 \sin \theta;$$

$$U_{1q} = -U_1 \cos \theta,$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \Psi_{\epsilon} i_{1q} \frac{L_{12}}{L_{\epsilon}}$$

Разработаны различные системы векторного управления СД

Особый интерес представляет система с управлением инвертором ПЧ в  
функции положения ротора



преобразователь частоты, кроме регулирования напряжения и частоты, выполняет роль электронного коммутатора (коллектора), осуществляющего переключение обмоток статора при повороте вала ротора на определенный угол

Переключение фаз обмотки статора СД обеспечивает инвертор с помощью СУИ АУ2, представляющей собой формирователь и распределитель импульсов, управляющих переключением тиристоров

переключение осуществляется в функции угла поворота вала ротора  $\varphi$ , контролируемого и задаваемого датчиком положения ВQ

угол  $\Theta$  не зависит от момента нагрузки и определяется лишь начальной установкой датчика, т. е. его ориентированием относительно геометрических осей машины. Поэтому электропривод с ВД более устойчив, чем с СД, так как у него нет склонности к качаниям ротора и возможности потери статической устойчивости, поскольку процесс коммутации тиристоров UZA происходит только при повороте ротора на угол  $\varphi_p$ .

Для упрощения конструкции ВД на его роторе вместо обмотки возбуждения используются постоянные магниты, что исключает применение коммутационного вращающегося узла в роторе

Однако ВД лишили основного положительного свойства СД — независимости скорости от нагрузки. В механических характеристиках ВД появился статизм, что в общем-то не является большим недостатком и легко исправляется в СЭП с подчиненным регулированием координат

В вентильном двигателе значительное размагничивающее действие оказывает реакция якоря, что возможно исправить, если включить обмотку ротора последовательно в звене постоянного тока — скомпенсировать влияние реакции якоря увеличением потока возбуждения пропорционально току статора СД. Тогда получается машина последовательного возбуждения с ее мягкими нелинейными механическими характеристиками.

Синтез регуляторов тока и скорости производится по структурной схеме, применяемой для СЭП постоянного тока