

СКАЛЯРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Управляемость АД обеспечивается совместным регулированием либо частоты f_1 и напряжения U_1 , либо частоты f_1 и тока I_1 статорной обмотки. Первый способ управления принято трактовать как *частотное* управление, второй – как *частотно-токовое* управление

Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространенным в асинхронном электроприводе. Ему свойственна техническая простота измерения и регулирования переменных АД, а также возможность построения разомкнутых систем управления скоростью

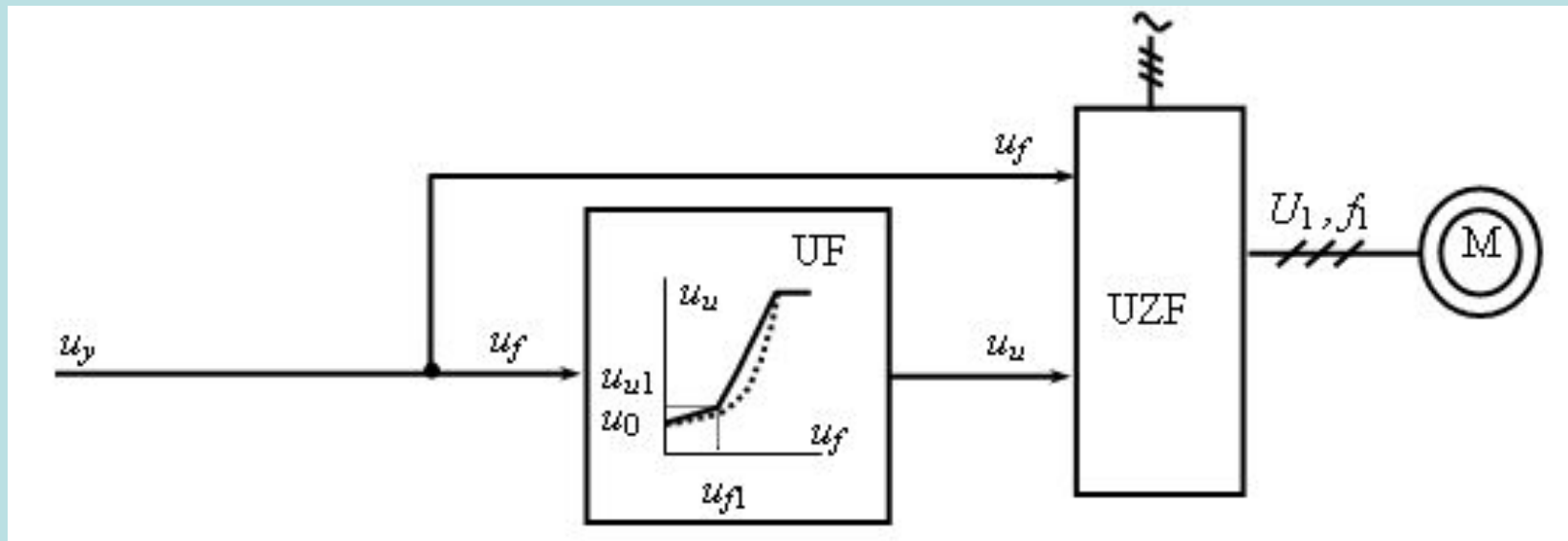
Недостаток : ***трудность реализации желаемых законов регулирования скорости и момента АД в динамических режимах***

Скалярное частотно-токовое управление АД характеризуется малым критическим скольжением и постоянством критического момента при постоянстве питающего АД тока и изменении его частоты

В разомкнутых системах подобное управление практически исключено, поскольку с увеличением нагрузки (скольжения) резко падает магнитный поток АД и для обеспечения желаемых перегрузочных способностей АД по моменту потребуется заметное превышение номинальных значений напряжения питания и тока статора

Разомкнутые системы управления

При невысокой точности и ограниченном диапазоне регулирования скорости АД наиболее целесообразным является его частотное управление в разомкнутой системе электропривода



Для компенсации падения напряжения во внутренних сопротивлениях преобразователя UZF и возможных колебаний напряжения его питающей сети в преобразователях частоты, как источниках напряжения, принято использовать внутренние контуры стабилизации выходного напряжения преобразователя

Для сохранения постоянства перегрузочной способности АД по моменту в функциональном блоке UF предусматривается такое соотношение между напряжениями задания частоты u_f и напряжения u_u на выходе ПЧ, при котором обеспечивается компенсация падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора. Теоретически это соотношение характеризуется нелинейной функцией, когда u_u снижается в меньшей степени, чем u_f

Для большинства серийных преобразователей частоты эта функция линеаризуется выбором в статической характеристике блока UF двух базовых координат: u_{u1} при u_{f1} и u_{u0} при $u_f = 0$. Первая координата определяет задание минимального значения частоты f_1 и соответствующего ему напряжения U_1 на выходе преобразователя UZF, при которых еще сохраняется постоянство соотношений $U_1/f_1 = U_{1.н} / f_{1.н}$. Для АД общего назначения при диапазоне регулирования скорости в разомкнутой системе частотного управления до 8 :1 значение минимальной частоты выбирается в пределах $(0,3 - 0,4) f_{1н}$

Вторая координата выбирается с учетом уменьшения теплоотвода заторможенного двигателя (в режиме динамического торможения) из условий ограничения тока статора на уровне $(0,6 - 0,7) I_{1н}$. При известном активном сопротивлении статорной обмотки АД это соответствует установке выходного напряжения преобразователя частоты при $u_f = 0$ на уровне $U_1 \cong (0,6 - 0,7) I_{1н} R_1$

Реально наименьшее значение выходной частоты преобразователя и соответствующее ему значение u_f полезно выбирать из условия $f_{1min} \cong \omega_{0н} p s_c / 2\pi$, при котором пусковой момент АД будет близок моменту сил сопротивления на валу двигателя.

s_c - скольжение АД при его статической нагрузке.

При вентиляторной нагрузке на валу АД, для которой $Mс \cong \omega^2$, соотношение между u_f и u_u должно обеспечивать закон управления близкий к постоянству U_1 / f_1^2 (пунктир)

Для нагрузки с постоянной мощностью соотношение между u_f и u_u должно обеспечивать постоянство соотношения U_1^2 / f_1 (завышение установленной мощности преобразователя частоты пропорционально $\sqrt{\alpha}$)

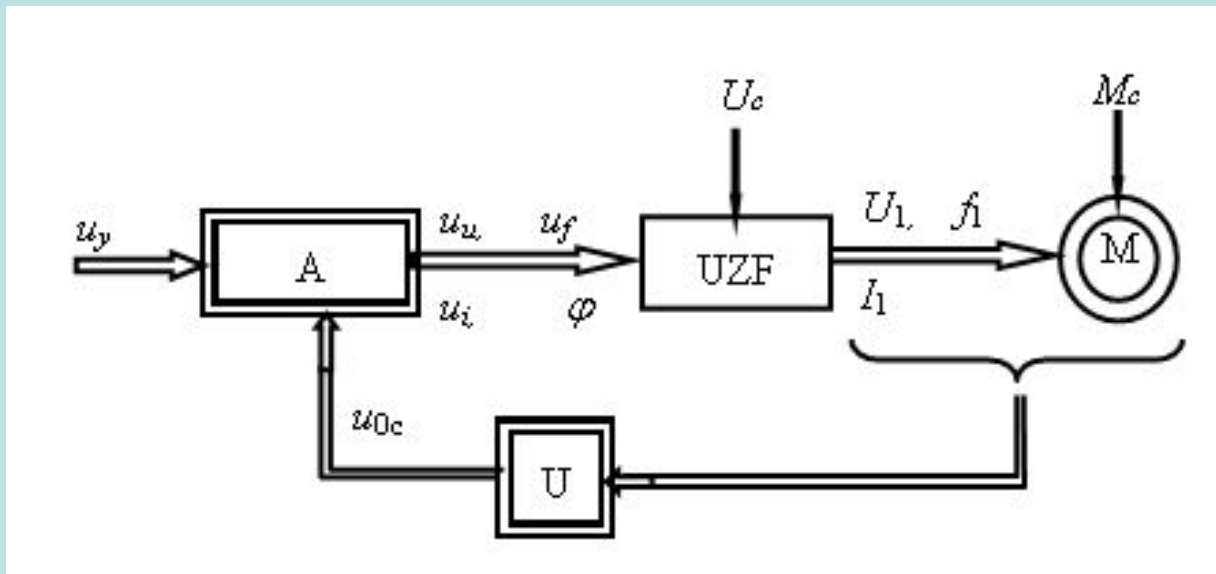
В статическом режиме разомкнутая система частотного управления с приведенными выше соотношениями U_1/f_1 практически обеспечивает сохранение номинальной перегрузочной способности АД в диапазоне изменения частоты не более (8–10):1 при постоянной нагрузке и (10–25):1 при вентиляторной

Недостатком разомкнутой системы частотного управления является и отсутствие ограничений от возможных перегрузок по току преобразователя и двигателя.

Замкнутые системы частотного управления

Формирование требуемых статических и динамических свойств асинхронного частотно-регулируемого электропривода возможно лишь в замкнутой системе регулирования его координат

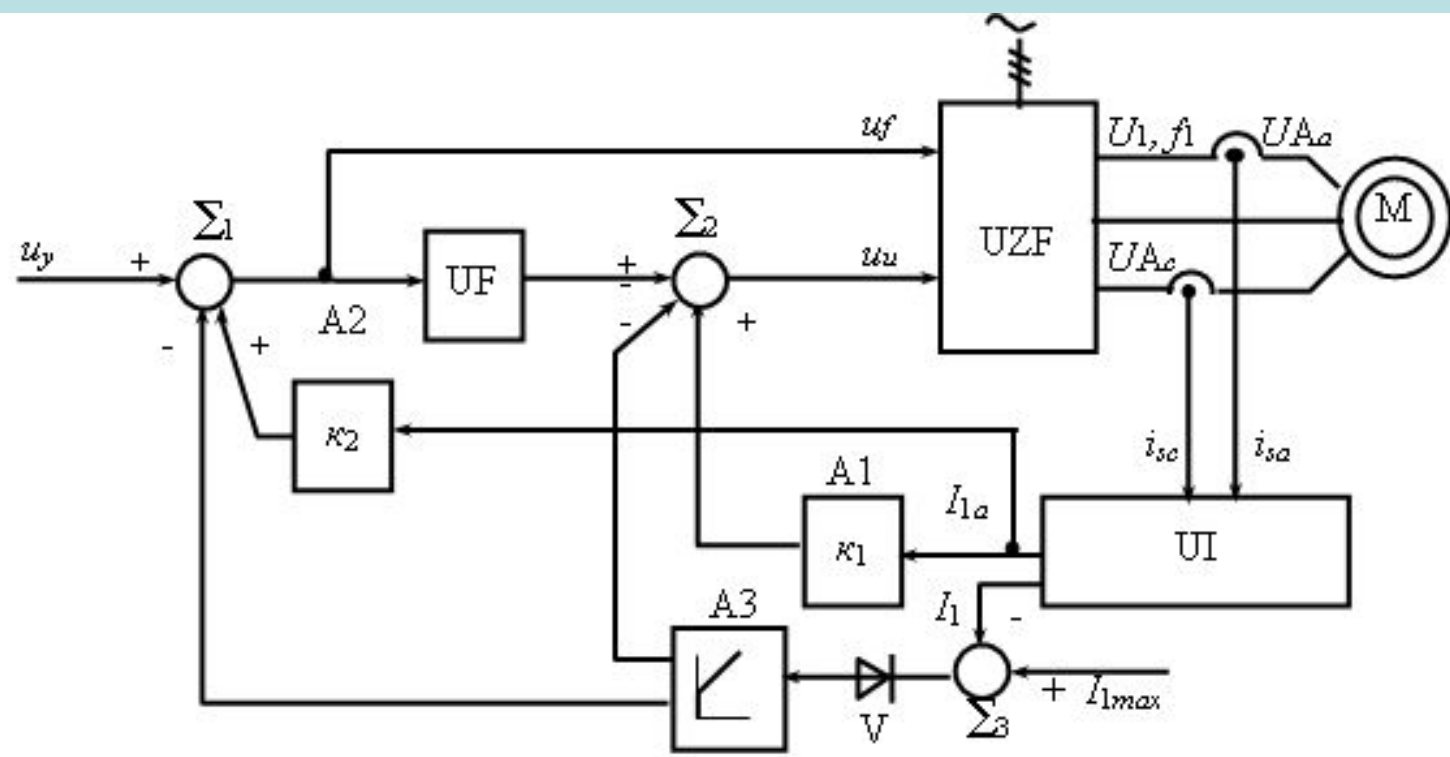
Входными сигналами датчиков U являются переменные АД, как доступные для непосредственного их измерения, так и определяемые расчетным путем с помощью математической модели АД.



Системы управления с обратной связью по току статора

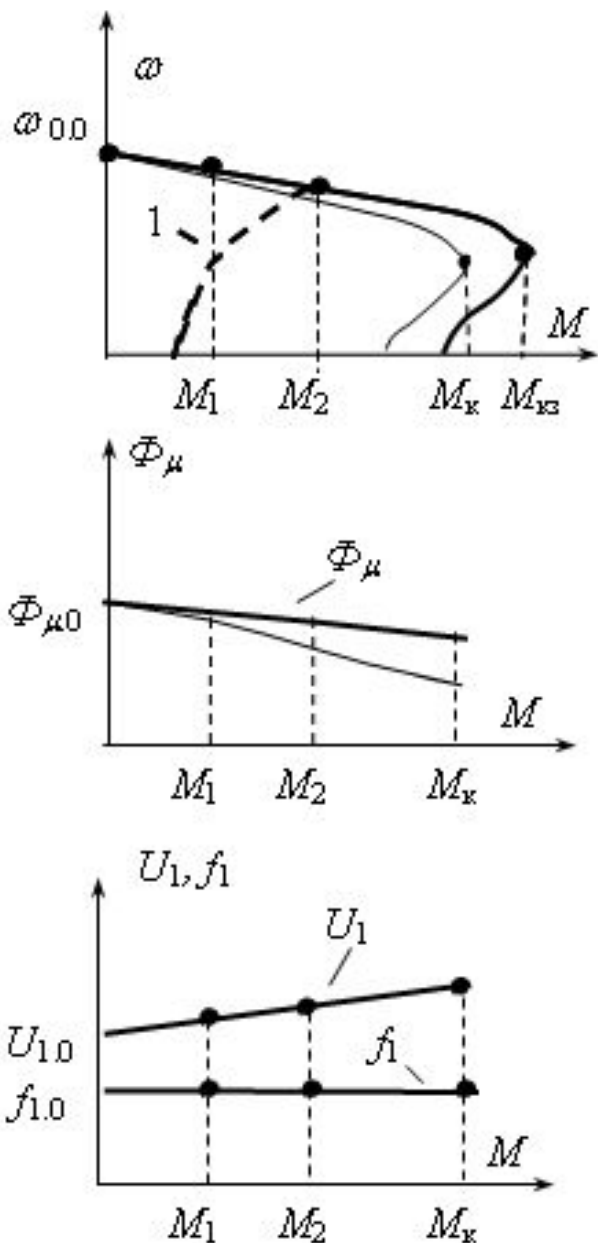
Оценим назначение каждого из контуров обратных связей и их влияние на свойства электропривода

Для защиты преобразователя частоты и двигателя от перегрузок по току используется режим его ограничения с помощью устройства токовой отсечки.



Влияние положительной обратной связи с пропорциональным коэффициентом усиления k_1 устройства А1 по действующему значению тока статора на переменные и механическую характеристику АД поясняет рис

Предел увеличения k_1 ограничен условиями устойчивости замкнутой системы управления и допустимыми значениями потока намагничивания и напряжения питания АД



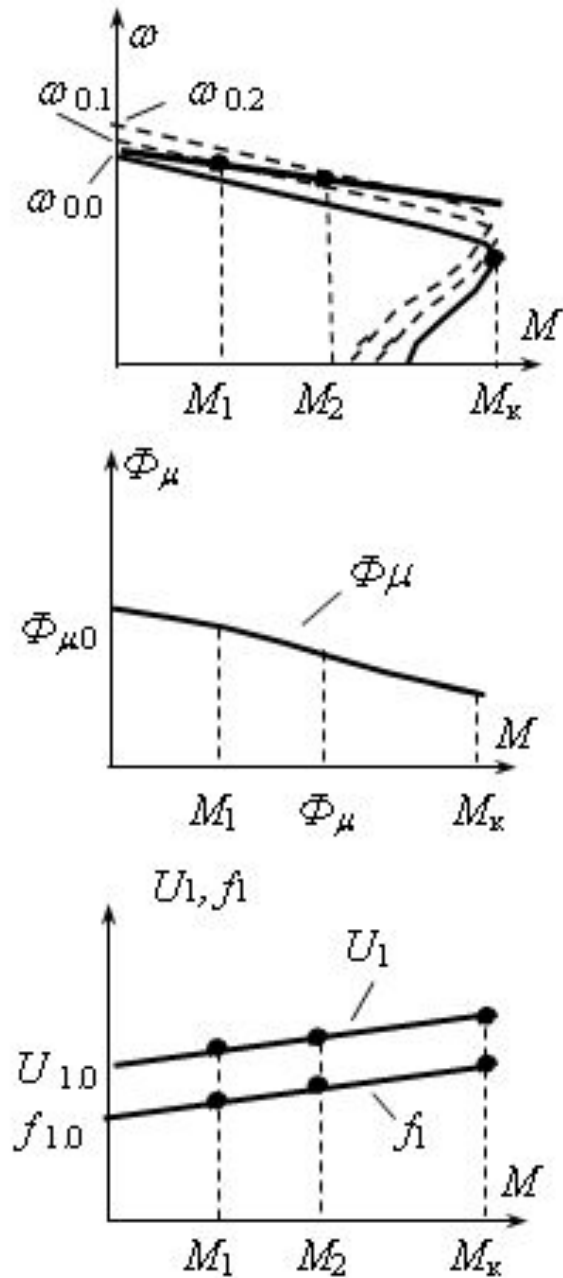
Если в качестве сигнала обратной связи принять активную составляющую тока статора, то регулирование скорости будет выполняться при постоянстве потокосцепления статора

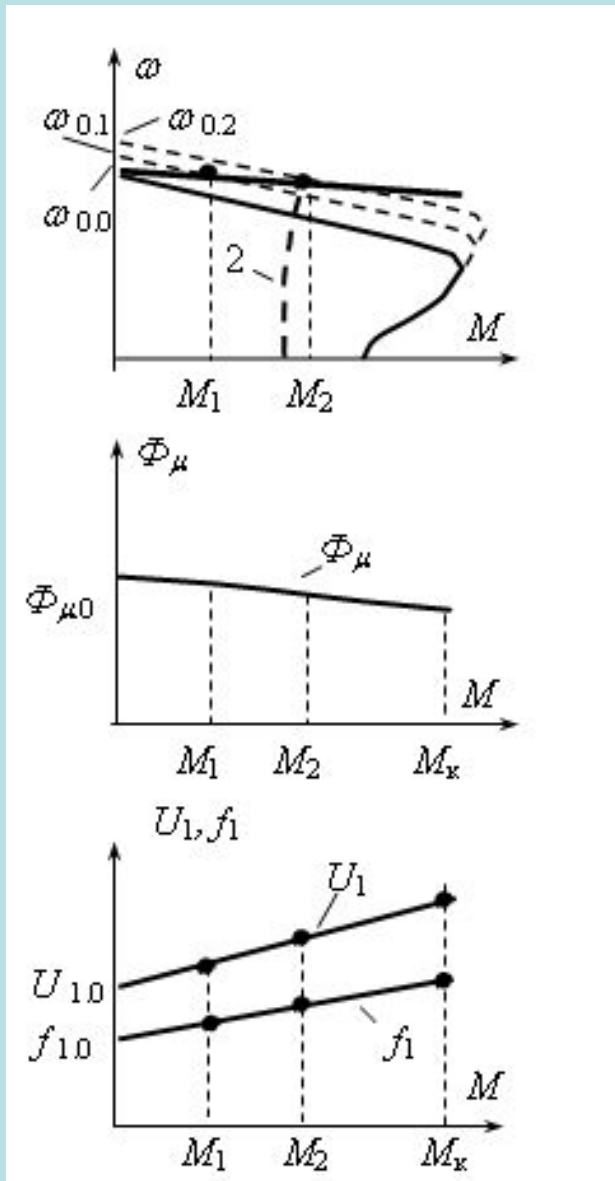
обеспечение той же перегрузочной способности АД по моменту, что и при обратной связи по полному току, потребует меньшей доли компенсации падения напряжения в статорной цепи и, соответственно, меньшего запаса по выходному напряжению преобразователя частоты

В системе с обратными связями по току возможна реализация механических характеристик АД с повышенной перегрузочной способностью по моменту и жесткостью, близкой к естественной в диапазоне регулирования скорости вниз от номинальной при постоянной статической нагрузке до 7 : 1

Влияние положительной обратной связи по току с пропорциональным коэффициентом усиления k_2 устройства А2 связано с одновременным воздействием на выходные частоту и напряжение преобразователя UZF

За счет увеличения частоты питания АД при увеличении нагрузок на валу M_1, M_2 соответственно увеличиваются скорости идеального холостого хода АД (ω_{01}, ω_{02}), обеспечивая тем самым лишь стабилизацию скорости АД. За счет одновременного и пропорционального частоте увеличения напряжения питания АД при $M_c = \text{const}$ сохраняется постоянство и перегрузочной способности АД по моменту ($M_k \approx \text{const}$).

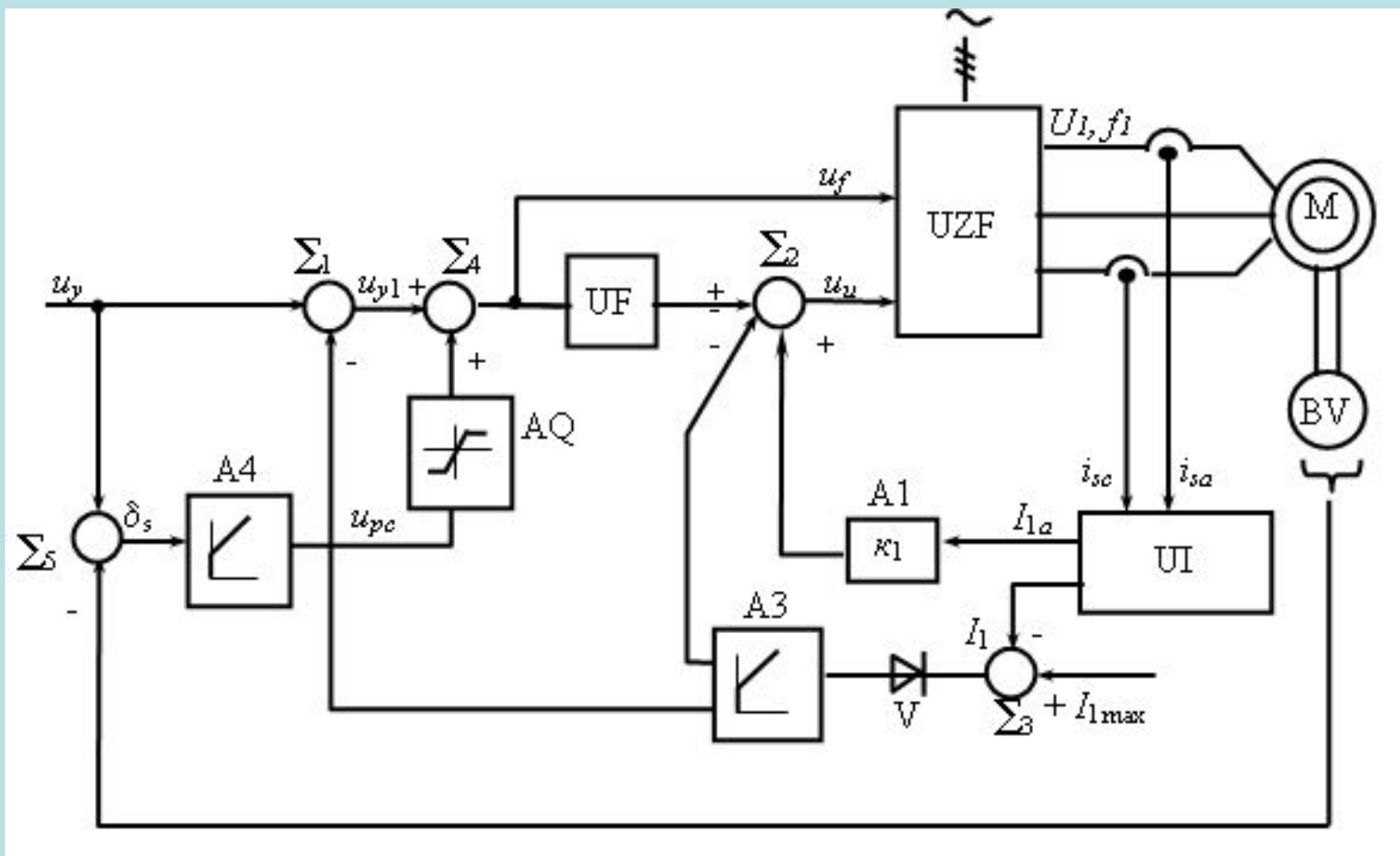




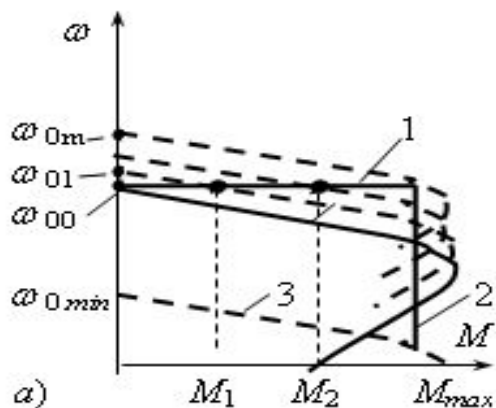
Совокупность положительных обратных связей по току с использованием устройств А1 и А2, за счет стабилизации скорости последним, заметно повышает жесткость механических характеристик АД и при постоянной статической нагрузке увеличивает диапазон регулирования скорости до 10 : 1

За счет поступающего на сумматор $\Sigma 1$ сигнала отрицательной обратной связи по току статора совместно со стабилизацией тока происходит снижение его частоты и, соответственно, скорости идеального холостого хода АД. Тем самым обеспечивается постоянство магнитного потока, абсолютного скольжения и в итоге момента двигателя. (жирным пунктиром условно показана линия 2 механической характеристики АД в зоне работы отсечки при токе статора, соответствующего моменту нагрузки M_2 .)

Системы управления с обратной связью по скорости двигателя

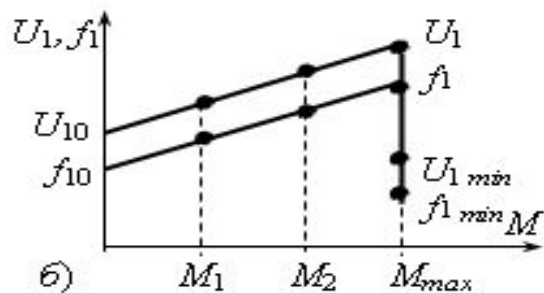


Увеличение диапазона регулирования по скорости АД можно получить дополнением в схему отрицательной обратной связи по скорости

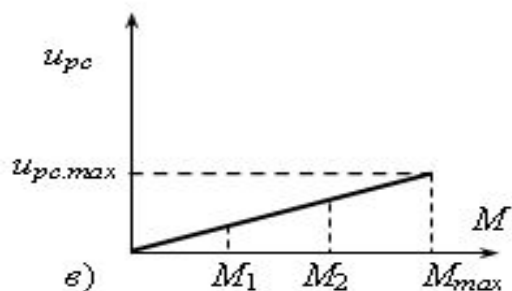


$$\delta_s = \frac{u_y - u_{oc}}{S_a} \equiv \omega_{0.0} - \omega \equiv$$

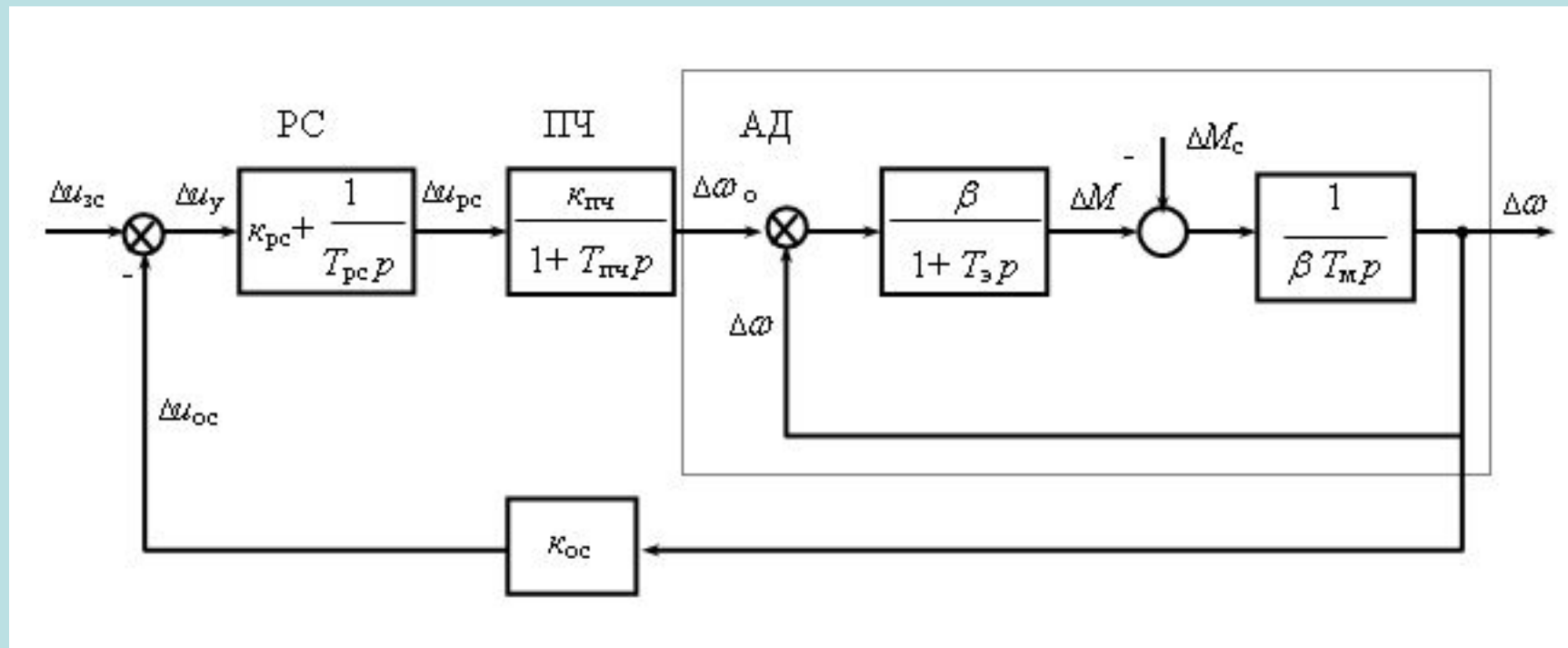
При превышении максимально допустимого тока статора АД (при $I_1 \geq I_{1max}$) регулятор скольжения должен быть исключен из работы, например ограничением его выходного сигнала u_{pc} на уровне $u_{pc.max}$



Выходной сигнал с АЗ, обеспечивает за счет одновременного уменьшения частоты и напряжения статора АД до их минимальных значений $f1_{min}$ и $U1_{min}$ ограничение момента АД при $\omega = 0$ на уровне M_{max} (линия 2 на рис,а).



Структурная схема линеаризованной системы при работе АД на участке механической характеристики в пределах значений абсолютного скольжения $s_a \leq s_k$ представлена ниже



$$\beta = 2M_k / \omega_{0H} s_k$$

$$T_э = 1 / \omega_{0эл.ном} s_k$$

$$\kappa_{\text{пч}} = \Delta\omega_0 / \Delta u_{\text{рс}} = 2\pi \Delta f_1 / p_{\text{п}} \Delta u_{\text{рс}}$$

$$W_{\text{рс}}(p) = \Delta u_{\text{рс}} / \Delta u_{\text{у}} = \kappa_{\text{рс}} + 1/T_{\text{рс}} p$$

$$W_{\text{ос}}(p) = \Delta u_{\text{ос}} / \Delta\omega = \kappa_{\text{ос}} = u_{\text{зс.н}} / \omega_{\text{н}}$$

$$W_{\text{д}}(p) = \Delta\omega / \Delta\omega_0 = 1 / (T_{\text{э}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1).$$

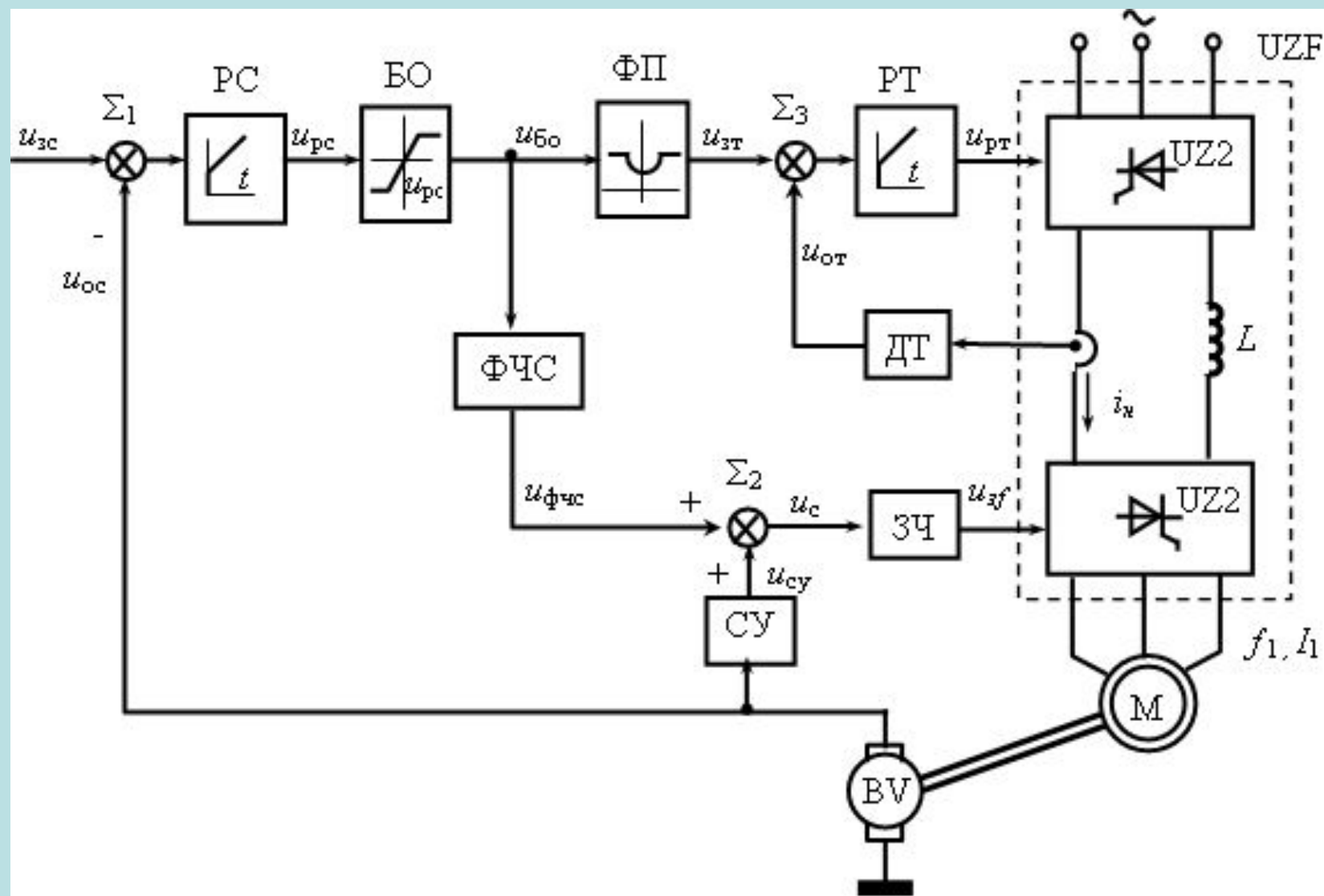
При $T_{\text{м}} \geq 4T_{\text{э}}$

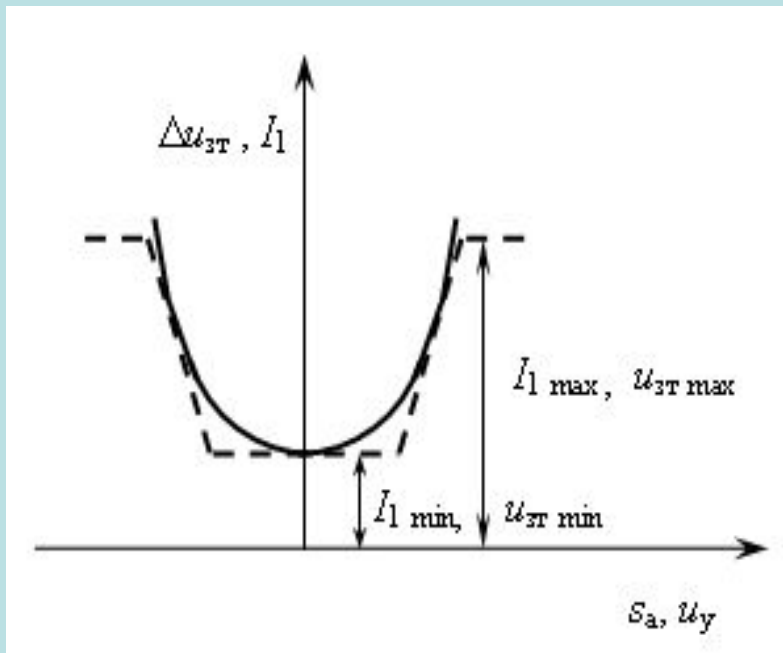
$$W_{\text{д}}(p) = 1 / (T_{01} p + 1)(T_{02} p + 1),$$

Если принять $T_{\mu} = T_{02} + T_{\text{пч}}$, то

$$T_{\text{рс}} = \kappa_{\text{ос}} \kappa_{\text{пч}} a_{\mu} T_{\mu}; \quad \kappa_{\text{рс}} = T_{01} / T_{\text{рс}}.$$

Частотно-токовое управление





При питании АД от источника тока вследствие размагничивающего действия тока ротора магнитный поток АД заметно изменяется при изменении абсолютного скольжения. Поэтому для стабилизации магнитного потока АД при изменении его нагрузки в канал задания тока UZF вводится преобразователь ФП, формирующий задание тока статора I_1 в функции абсолютного скольжения s_a

Известные положительные свойства АД при его питании от источника тока, такие как независимость электромагнитного момента АД от частоты и возможность при заданном токе статора и абсолютном скольжении, равном критическому, обеспечить больший момент, чем при питании от источника напряжения, могут быть реализованы лишь в замкнутой системе, контролирующей абсолютное скольжение и ток двигателя в функции нагрузки.

Сигнал, пропорциональный s_a , формируется на выходе РС, поскольку $u_{3.c}$ пропорционально заданию скорости $\omega_{0.3}$ идеального холостого хода АД, а u_{oc} – текущей скорости ротора ω , т.е. $u_{pc} \equiv (u_{3.c} - u_{oc}) \equiv (\omega_{0.3} - \omega) = s_a \omega_{0.n}$.

Если передаточный коэффициент ФЧС выбрать таким образом, чтобы его выходной сигнал $u_{ф.с}$ был пропорционален $(\omega_{0.3} - \omega)$

$$u_c = u_{фчс} + u_{cy} \equiv (\omega_{0.3} - \omega) + \omega = \omega_{0.3}$$

В результате на выходе ЗЧ появится сигнал $u_{3.f} \equiv u_{3.c} \equiv \omega_{0.3}$,

Поскольку электромагнитный момент двигателя $M \equiv I_1^2$, то с учетом характеристики ФП ($I_{12} \equiv s_a$) выходной сигнал РС пропорционален не только абсолютному скольжению s_a , но и одновременно является сигналом задания электромагнитного момента АД

Перед пуском двигателя ($u_{3.c} = 0, u_{pc} = 0$) сигнал задания частоты преобразователя $u_{3.f} = 0$ и за счет характеристики ФП ($u_{3.T.min} \neq 0$) в АД устанавливается постоянный ток, обеспечивающий поток намагничивания и режим динамического торможения АД. С увеличением $u_{3.c}$ и, соответственно $u_{3.f}$ ток статора становится переменным и двигатель начинает вращение по действием максимального момента, ограниченного сигналом $u_{3.0}$.

Рассмотрим передаточные функции отдельных звеньев системы и определим условия, при которых момент АД будет определяться абсолютным скольжением.

Передаточная функция между заданной скоростью идеального холостого хода АД $\omega_{0.3}$ и сигналом задания частоты на входе UZF $u_{3.f}$ определяется соотношением

$$W_f(p) = \Delta \omega_{0.3} / \Delta u_{3.f} = 2\pi k_f / p_{\Pi}$$

$$\text{где } k_f = \Delta f_3 / \Delta u_{3.f} = f_H / u_{3.f.H}$$

$$\Delta u_{3.f} = \kappa_{3.ч} (\kappa_{фчс} \Delta u_{p.c} + \kappa_{cy} \kappa_{oc} \Delta \omega),$$

где $\kappa_{3.ч} = \Delta u_{3.f} / \Delta u_{3.c}$; $\kappa_{фчс} = \Delta u_{фчс} / \Delta u_{3.c}$; $\kappa_{cy} = \Delta u_{cy} / \Delta u_{oc}$;
 $\kappa_{oc} = \Delta u_{oc} / \Delta \omega$

$$W_M(p) = \Delta M / (\Delta \omega_{0.3} - \Delta \omega) = \beta_T / (T_{эТ} p + 1),$$

где $\beta_T = 2M_{КТ} / \omega_{0H} s_{КТ}$ $T_{эТ} = 1 / \omega_{0ЭЛ..H} s_{КТ}$

$$s_{КТ} = R_2' / (x_{\mu H} + x_{2H}'))$$

Поскольку при питании от источника тока $s_{КТ}$ заметно меньше, чем при питании от источника напряжения ($s_{к} \gg s_{КТ}$), то $\beta \ll \beta_T$ и $T_{э} \ll T_{эТ}$.

С учетом первых двух выражений :

$$\begin{aligned} (\Delta \omega_{0.3} - \Delta \omega) &= (2\pi k_f / p_{\Pi}) \kappa_{3.ч} (\kappa_{фчс} \Delta u_{p.c} + \kappa_{cy} \kappa_{oc} \Delta \omega) - \Delta \omega = \\ &= (2\pi k_f / p_{\Pi}) \kappa_{3.ч} \kappa_{фчс} \Delta u_{p.c} + [(2\pi k_f / p_{\Pi}) \kappa_{cy} \kappa_{oc} \Delta \omega - \Delta \omega]. \end{aligned}$$

Тогда при выборе передаточных коэффициентов функциональных устройств электропривода из условия

$$(2\pi k_f / p_{\Pi}) k_{cy} k_{oc} = 1$$

$$(\Delta\omega_{0.3} - \Delta\omega) = k_M \Delta u_{p.c.},$$

где $k_M = (2\pi k_f / p_{\Pi}) k_{з.ч} k_{фчс}$

$$W_M(p) = \Delta M / \Delta u_{p.c.} = k_M \beta_T / (T_{эТ} p + 1).$$

$$W_O(p) = \Delta\omega / \Delta u_{pc} = k_M / (T_{эТ} p + 1) T_{MT} p$$

Если отнести постоянную $T_{эТ}$ к малой некомпенсируемой постоянной времени $T_{\mu} = T_{эТ}$, то

$$W_{pc}(p) = T_{MT} / a_{\mu} T_{\mu} k_{oc} k_M = k_{pc}$$

Результирующая жесткость механической характеристики привода в замкнутой системе невысока

Более высокая точность реализуется при настройке привода на симметричный оптимум с ПИ –регулятором скорости.

$$T_{pc} = 2a_{\mu} T_{\mu} / \kappa_{pc} ; \quad \kappa_{pc} = T_{MT} / a_{\mu} T_{\mu} \kappa_M \kappa_{oc}.$$

Контрольные вопросы

1. Оцените диапазоны частотного регулирования скорости АД в разомкнутой системе управления при различных зависимостях статического момента на валу АД от его скорости.
2. Какие факторы влияют на выбор минимального и максимального значений частоты и напряжения на выходе преобразователя частоты?
3. Какие обратные связи способствуют увеличению жесткости механической характеристики асинхронного частотно-регулируемого электропривода? Дать сравнительную оценку различным способам стабилизации скорости АД.

4. Определите для электропривода по схеме рис. характер изменения частоты и напряжения на статоре двигателя, а также его скорости в функции момента на валу двигателя. Как они будут отличаться для двигателей с различными значениями номинальных скольжений? Определите граничные зоны механических характеристик электропривода.
5. Какими факторами ограничивается максимальный коэффициент положительной обратной связи по току статора АД?
6. Определите для электропривода по схеме рис. с ПИ-регулятором скорости характер изменения выходного напряжения регулятора скорости, частоты и напряжения на статоре двигателя, а также его скорости в функции момента на валу двигателя. Как они будут отличаться для двигателей с различными значениями номинальных скольжений?
7. Какими факторами ограничено применение разомкнутых систем с частотно-токовым управлением АД?
8. Поясните назначение блоков БО, ФП, ФЧС и СУ в схеме на рис.

9. Чем объясняется меньшее значение электромеханической и большее значение электромагнитной постоянных времени АД при его питании от источника тока по сравнению с питанием АД от источника напряжения?

10. Определите для электропривода по схеме рис. с ПИ-регулятором скорости характер изменения выходного напряжения регулятора скорости, частоты и тока статора двигателя, а также его скорости в функции момента на валу двигателя.