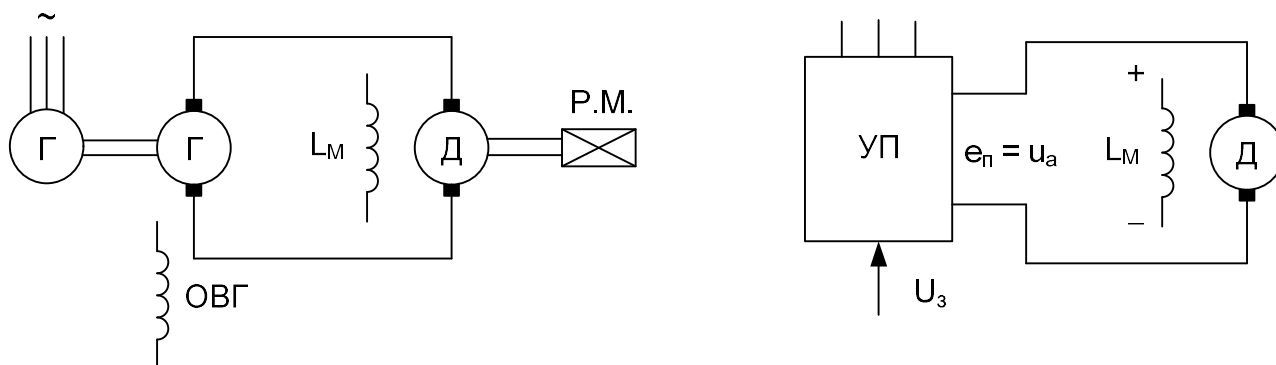


## Характеристики (электромеханическая и механическая) при изменении подводимого напряжения – управляемый преобразователь



По второму закону Кирхгофа:

$$e_{\Pi} = C\omega + I(r_{\text{я}} + r_{\text{п}}) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{e_{\Pi}}{k\Phi_{\text{H}}} - \frac{I(r_{\text{я}} + r_{\text{п}})}{k\Phi_{\text{H}}} \quad (2)$$

$$I = \frac{M}{k\Phi_{\text{H}}} \rightarrow (2): \quad \omega = \frac{e_{\Pi}}{k\Phi_{\text{H}}} - \frac{M(r_{\text{я}} + r_{\text{п}})}{(k\Phi_{\text{H}})^2} \quad (3)$$

т.е. при  $I = 0$   $\omega_0 = e_{\Pi} / k\Phi_{\text{H}}$  (4)

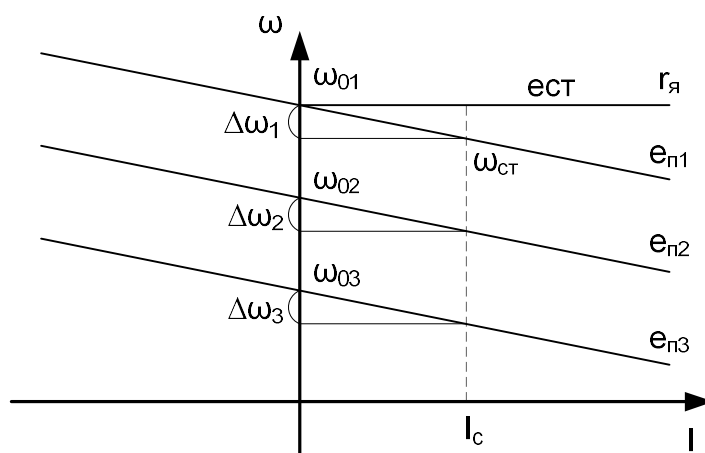
Если  $e_{\Pi} = var$ , то  $\omega_0 = var$ . При фиксированных значениях сопротивления и потока:

$$\Delta\omega = \frac{I_{\text{с}}(r_{\text{я}} + r_{\text{п}})}{k\Phi_{\text{H}}} = const,$$

т.е. все характеристики будут параллельны друг другу:

$$\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \Delta\omega_3 = const$$

$$\Delta\omega_1 = \omega_0 - \omega_{\text{с}}$$

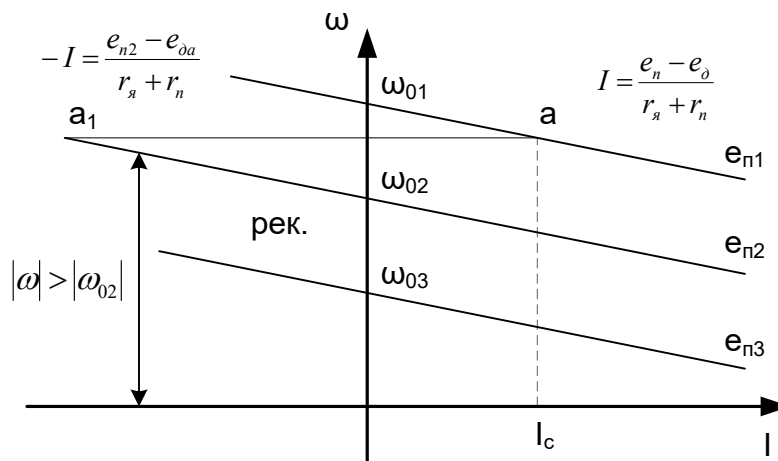


Из-за того, что имеет место падение напряжения на внутреннем сопротивлении преобразователя, характеристика естественная будет жёстче, чем в системе УП-Д.

$$\Delta\omega_c = \frac{I_c r_{я}}{k\Phi_H} < \Delta\omega_{уп-д} = \frac{I_c(r_{я} + r_n)}{k\Phi_H}$$

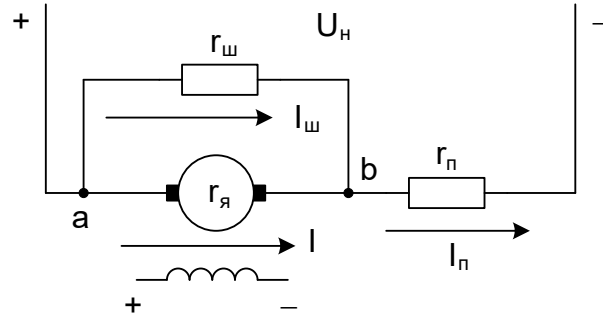
Если дискретно изменить  $U_{задания}$ , то получим сопротивление 2.

$$a_1) |e_{п2}| < |e_{да}|$$



## Электромеханическая и механическая характеристики

### при шунтировании цепи якоря



$$I_{п} = I + I_{ш} \quad (1)$$

$$U_H = I_{ш}r_{ш} + I_{п}r_{п} \quad (2)$$

$$U_H = C\omega + Ir_{я} + I_{п}r_{п} \quad (3)$$

$$I_{ш} = I_{п} - I \quad (1) \rightarrow (2)$$

$$U_H = I_{п}r_{ш} - Ir_{ш} + I_{п}r_{п} \quad (5)$$

$$I_{п} = \frac{U_H + Ir_{ш}}{r_{ш} + r_{п}} \quad (6) \rightarrow (3)$$

$$U_H = C\omega + Ir_{я} + \frac{U_H r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} + \frac{I r_{ш} r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} \quad (7)$$

$$U_H - \frac{U_H r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} = C\omega + I \left( r_{я} + \frac{r_{ш} r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} \right) \quad (8)$$

$$\frac{U_H r_{ш}}{r_{ш} + r_{п}} + \frac{U_H r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} - \frac{U_H r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} = C\omega + I \left( r_{я} + \frac{r_{ш} r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} \right) \quad (9)$$

$$\omega = \frac{U_H}{C} \cdot \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{п}} - \frac{I}{C} \left( r_{я} + \frac{r_{ш} r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} \right) \quad (10) \quad - \quad \omega = f(I)$$

$$\omega = \frac{U_H}{C} \cdot \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{п}} - \frac{M}{C^2} \left( r_{я} + \frac{r_{ш} r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} \right) \quad (11) \quad - \quad \omega = f(M)$$

При  $I = 0$ :

$$\omega = \omega_{0ш} = \frac{U_H}{C} \cdot \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{п}} \quad (12), \quad \omega_{0ш} = \omega_0 \cdot \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{п}} \quad (13)$$

Уравнение (13) позволяет заключить, что изменением параметров резисторов  $r_{ш}$  и  $r_{п}$  можно в схеме шунтирования получать скорости идеального холостого хода меньше, чем на естественной характеристике.

$$r_{я} < r_{я} + \frac{r_{ш} r_{п}}{r_{ш} + r_{п}} < r_{я} + r_{п}$$

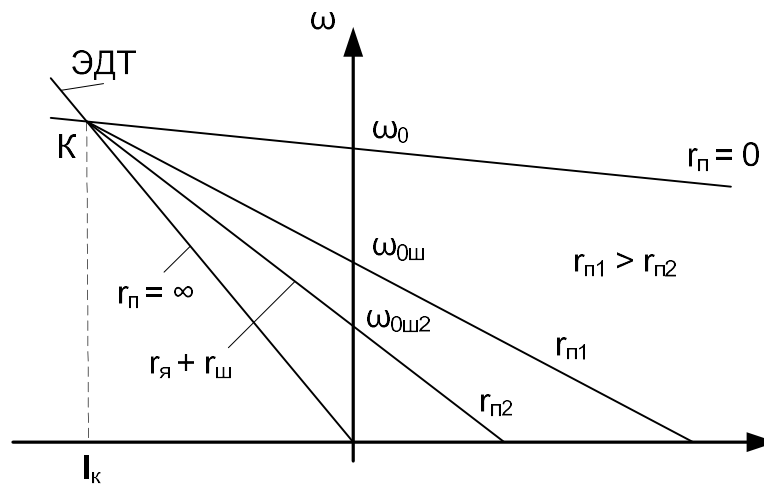
Из этого следует, что естественная характеристика жёстче, чем характеристика шунтирования цепи якоря, а характеристика шунтирования жёстче, чем реостатная характеристика (при одинаковых сопротивлениях).

Проанализируем характеристики:

1.  $r_{ш} = const, r_{п} = 0 \dots \infty$

$$1) r_{п} = 0; \quad \omega = \frac{U_H}{C} - \frac{I}{C} r_{я} \quad (14) - \text{ест.}$$

$$2) r_{п} = \infty; \quad \omega = -\frac{I}{C} (r_{я} + r_{ш}) \quad (15)$$

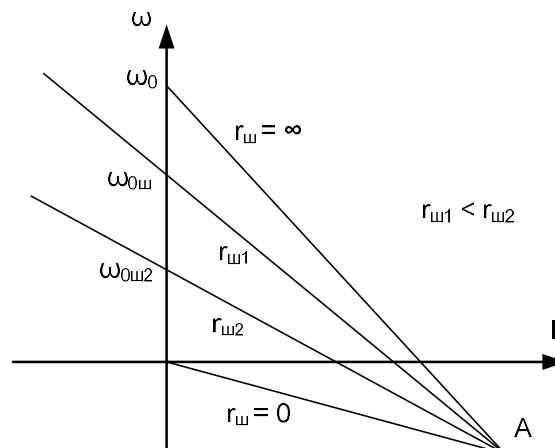


В точке К ток не зависит от  $r_{п}$ , следовательно, она будет общей для всех характеристик, т.е. характеристики с этой точки будут исходить пучком. А согласно уравнению (13), чем больше  $r_{п}$ , тем меньше  $\omega_{0ш}$ .

2.  $r_{ш} = 0 \dots \infty, r_{п} = const$

$$1) r_{ш} = 0; \quad \omega = \frac{U_H}{C} - \frac{I}{C} (r_{я} + r_{п}) \quad (16) - \text{реостатная}$$

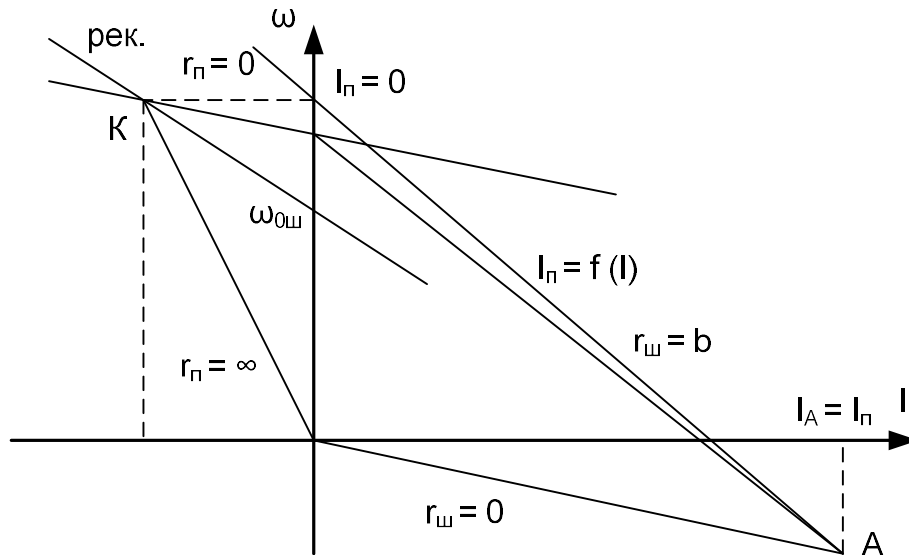
$$2) r_{ш} = \infty; \quad \omega = -\frac{I}{C} r_{я} \quad (17) - \text{ЭДТ}$$



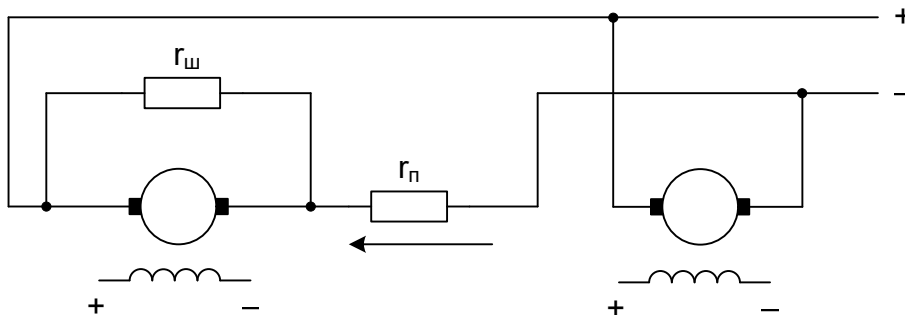
$$U_{a6} = 0 = C\omega_A + I_A r_A; \quad C\omega_A = I_A r_A$$

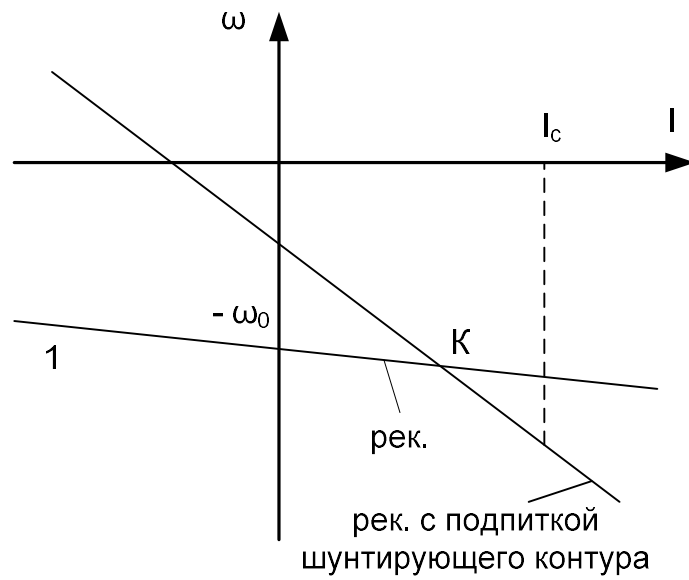
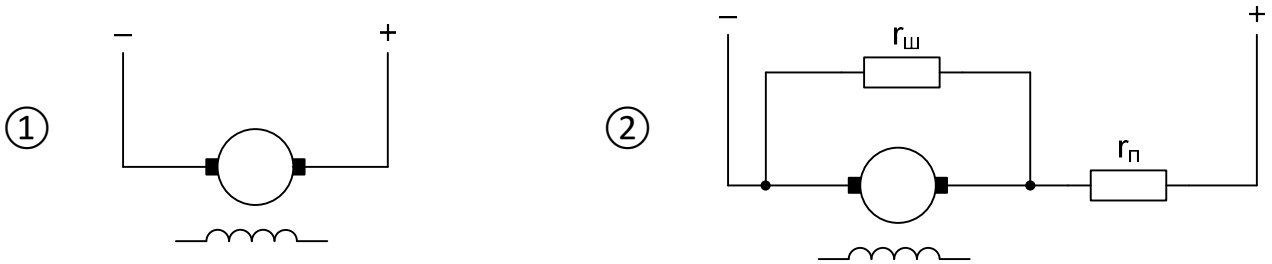
В точке А ток якоря не зависит от сопротивления  $r_{ш}$ . Это может быть тогда, когда напряжение на зажимах якоря равно 0, т.е.  $U_{a6} = 0$ , а это может быть лишь тогда, когда противоЭДС будет уравновешиваться падением напряжения на якоре.

Для определения режима работы нужно построить  $I_{п} = f(I)$ .

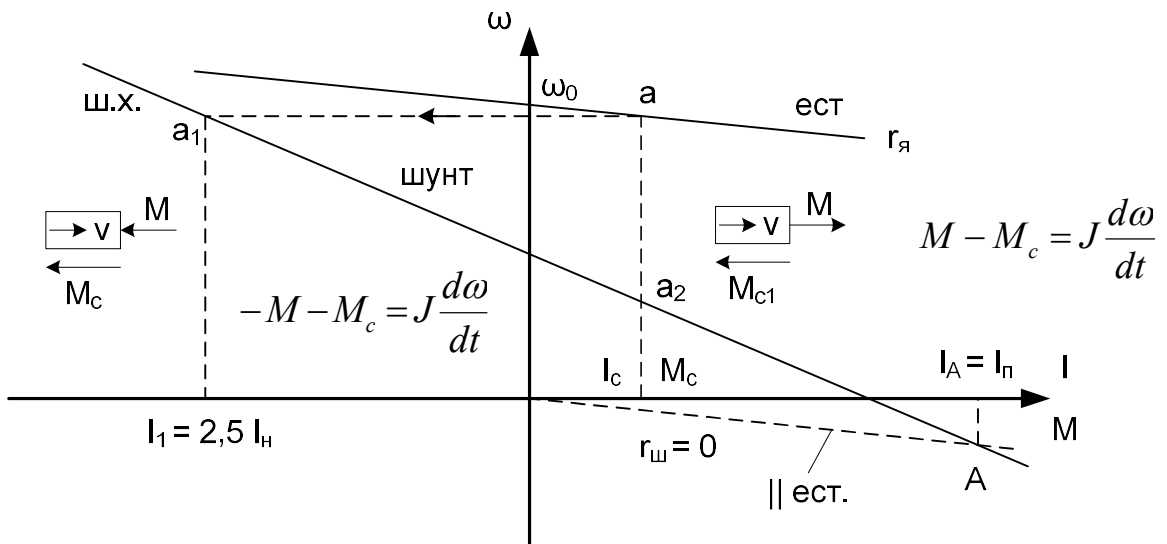
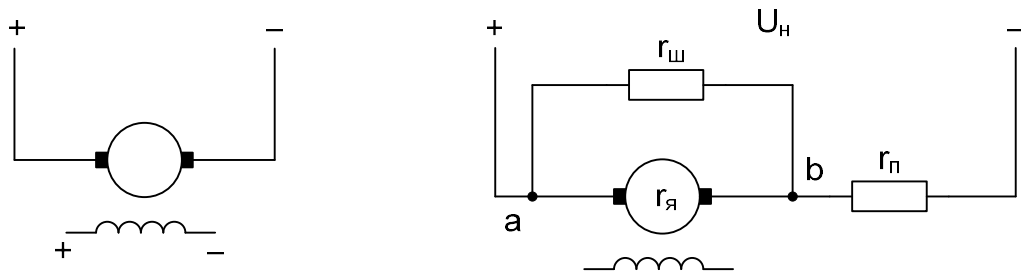


Режим отдачи энергии в сеть может происходить лишь в том случае, если ток через сопротивление  $I_p$  по сравнению с двигательным режимом поменяет знак на противоположный. А это может быть лишь в том случае, если потенциал от ЭДС станет больше потенциала от сети. Т.е. в точке К ток через сопротивление  $r_{п}$  равен 0, и вся энергия тратится на подпитку шунтирующего контура. При дальнейшем увеличении оборотов, энергия пойдёт к другим потребителям, и замкнётся контур по сопротивлению  $r_{п}$ , через которое ток потечёт в обратном, по сравнению с двигателем, направлении.





Построение желаемой механической или электромеханической характеристики и определение сопротивлений  $r_{ш}$  и  $r_{п}$



$$I_c = \frac{M_c}{k\Phi_H}; \quad I_{c2} = \frac{M_{c2}}{k\Phi_H}; \quad I_A = I_{\Pi} = \frac{U_H}{r_{\Pi}}$$

Установлено экспериментальным путём, что приемлемый диапазон регулирования:

$$D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} \approx 6 : 1, \quad \text{т.е.} \quad \omega_{min} = \frac{\omega_{max}}{6}.$$

Поскольку электромеханическая характеристика при шунтировании есть прямая линия, её можно построить по двум точкам (по координатам точек  $a_2$  и  $a_1$ ).

$$A) U_{a6} = 0; \quad C\omega_H = I_A r_{я}; \quad U_H = U_{a6} + I_{\Pi} r_{\Pi}; \quad U_{a6} = 0;$$

$$r_{\Pi} = \frac{U_H}{I_{\Pi}}; \quad I_{\Pi} = I_A; \quad \omega_{0ш} = \frac{U_H}{k\Phi_H} \cdot \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{\Pi}}; \quad r_{\Pi} = ?$$

*Недостатки схемы шунтирования:*

– очень большие потери мощности на  $r_{ш}$  и  $r_{\Pi}$  (даже больше, чем при чистом реостатном регулировании).

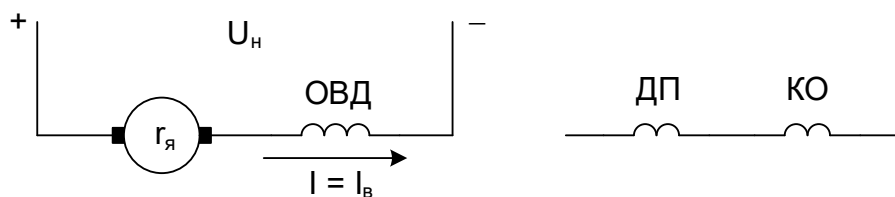
*Достоинства:*

– для значительного снижения потерь энергии на практике используют только кратковременный режим работы для обеспечения точного позиционирования привода;

– характеристика получается достаточно жёсткой, обеспечивая диапазон регулирования до 6:1;

– схема позволяет регулировать скорость идеального холостого хода двигателя вниз от основной. За основную принято считать скорость на естественной характеристике. Такого же эффекта можно добиться питанием двигателя от добавочного преобразователя, но капитальные затраты при этом утраиваются.

## Электромеханическая и механическая характеристики двигателя последовательного возбуждения

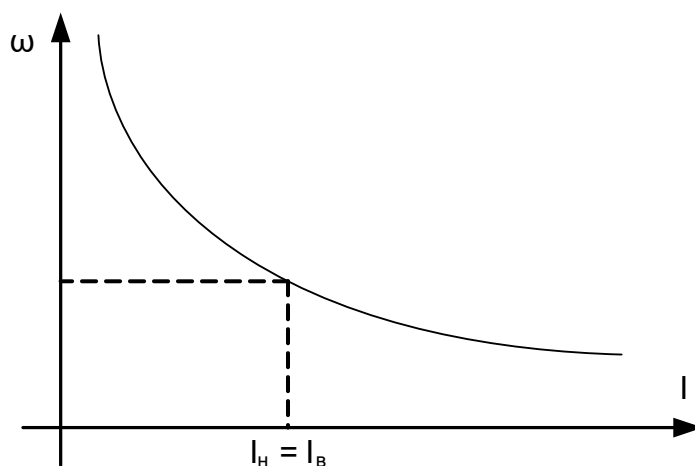


$$r_{\text{я}} + r_{\text{ДП}} + r_{\text{КО}} = r_{\text{ДВ}}$$

$$U_{\text{H}} = k\Phi_{\text{H}}\omega + Ir_{\text{ДВ}} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi_{\text{H}}} - \frac{Ir_{\text{ДВ}}}{k\Phi_{\text{H}}} \quad (2)$$

При  $I \rightarrow 0$   $\omega_0 \rightarrow \infty$ .

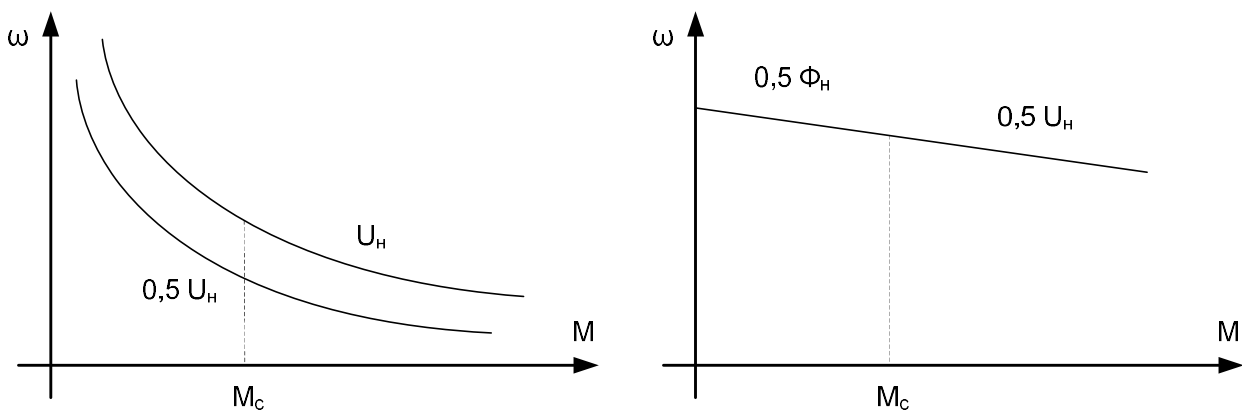


При токе якоря, близком к номинальному, машина насыщается, т.е. при дальнейшем изменении тока  $\Phi = const$ . При малых токах скорость устремляется в  $\infty$ , а при токах, больших тока  $I_{\text{я}}$ , поскольку ток якоря равен току возбуждения, машина насыщается, поток практически не изменяется и электромеханическая характеристика приобретает линейный характер, т.е. становится такой же, как у двигателя НВ.

Теоретически, при  $I = 0$  скорость идеального холостого хода будет равна  $\infty$ . Практически, за счёт остаточного потока  $\omega_0 = (8 \dots 10)\omega_{\text{H}}$ . В связи с тем, что при моментах и токах статических меньше  $0,2I_{\text{H}}$  обороты значительно растут, то данный двигатель в естественных схемах включения не рекомендуют нагружать меньше указанных моментов статических. При использовании этих



двигателей запрещается применять ремённые, клиноремённые и цепные передачи для того, чтобы в случае их обрыва не произошло разобщение двигателя с механизмом. На практике они используются в качестве тяговых, т.е. для приводов троллейбусов, трамваев, электровозов. Трамвайные и троллейбусные сети являются весьма протяжёнными. В связи с тем, что на этих сетях одновременно работает несколько трамваев или троллейбусов, то по мере удаления от тяговой подстанции будут иметь место потери напряжения, и в конце линии напряжение допускается до 50...60% от  $U_H$ .



Если сравнить с двигателем независимого и параллельного возбуждения, то в конце линии из-за падения напряжения на 50% скорость должна бы уменьшиться на 50%. Но так как с уменьшением напряжения уменьшается и напряжение возбуждения, то поток тоже уменьшается на 50%, и скорость остаётся той же.

Если двигатель последовательного возбуждения при езде в гору в конце линии будет иметь половинную скорость, то двигатель независимого возбуждения будет двигаться с той же скоростью, т.к. поток и напряжение изменятся в половину. А если двигатель работал при тех же нагрузках в 2 номинала, то при ослаблении поля в 2 раза ток статический автоматически возрастет в 2 раза и станет 4 номинала, т.е. недопустимым.

Построение естественных характеристик по универсальным характеристикам

Если характеристики сняты в лабораторных условиях или приведены в учебниках в действительных единицах, то они называются рабочими и описывают признаки только этой машины.

Если характеристики приведены или сняты в относительных единицах, то они пригодны для использования при расчётах для цепей серии машин. Для каждого двигателя задаются  $I = I_H$ ,  $P_H$ ,  $n_H$ ,  $\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}$ ,  $M_H = \frac{P_H}{\omega}$  и строится таблица:

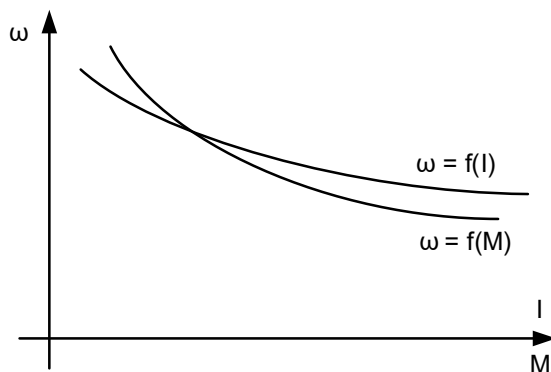
$i$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	} $\omega = f(I)$
$I$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	
$\nu$	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$\nu_4$	$\nu_5$	
$\omega$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	
$\mu$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	
$M$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	

$$i_1 = \frac{I_1}{I_H}; \quad I_1 = i_1 \cdot I_H$$

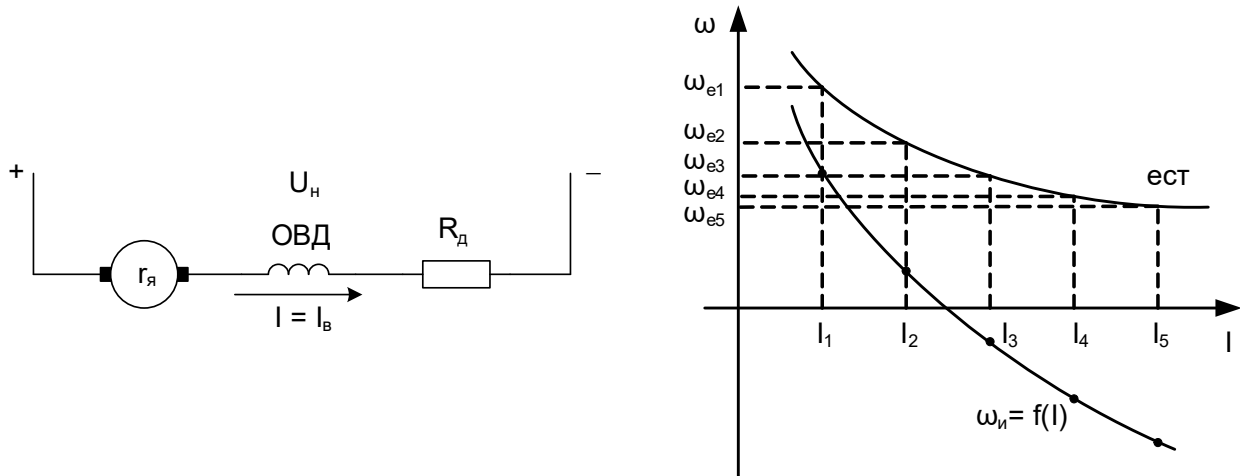
$$\nu_1 = \frac{\omega_1}{\omega_H}; \quad \omega_1 = \nu_1 \cdot \omega_H$$

Для этих же токов по кривой  $\mu = f(i)$  находим  $\mu_1, \mu_2$ :

$$\mu_1 = \frac{M_1}{M_H}; \quad M_1 = \mu_1 \cdot M_H$$



Построение реостатной характеристики для двигателя последовательного возбуждения



По универсальным характеристикам строим естественную:

$$\omega_e = \frac{U_H - I r_{дв}}{k \Phi_H} \quad (1)$$

$$\omega_{и} = \frac{U_H - I(r_{дв} + R_д)}{k \Phi_H} \quad (2)$$

Будем рассматривать характеристики при одних и тех токах, тогда:

$$\frac{\omega_e}{\omega_{и}} = \frac{U_H - I r_{дв}}{U_H - I(r_{дв} + R_д)} \cdot \frac{k \Phi_H}{k \Phi_H} \quad (3)$$

$$\omega_{и1} = \omega_{e1} \cdot \frac{U_H - I_1(r_{дв} + R_д)}{U_H - I_1 r_{дв}}$$

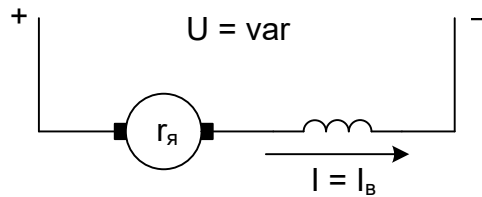
Графический метод:

$$\nu_c = \frac{\omega_c}{\omega_H}; \quad \mu_c = \frac{M_c}{M_H}$$

$$R = r_{дв} + R_д; \quad \rho = \frac{R}{R_H};$$

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}$$

Построение искусственных характеристик при изменении подводимого напряжения

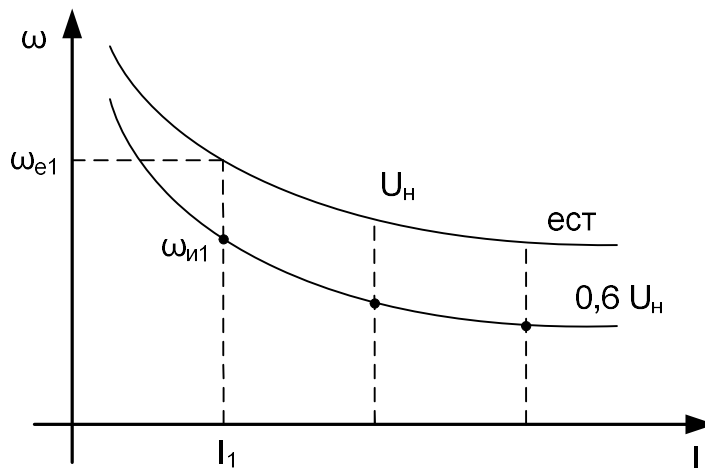


Строится методом естественных характеристик.

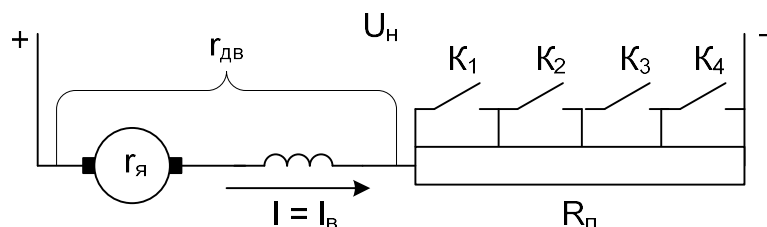
$$\omega_e = \frac{U_H - Ir_{дв}}{k\Phi_H} \quad (1); \quad \omega_n = \frac{U - Ir_{дв}}{k\Phi_H} \quad (2)$$

$$\omega_n = \omega_e \frac{U - Ir_{дв}}{U_H - Ir_{дв}} \quad (3)$$

Механическая характеристика перестраивается на основании универсальной.



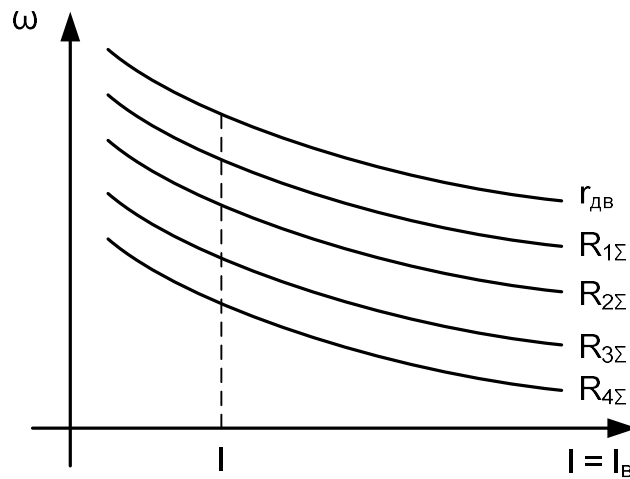
Построение сопротивлений пускового реостата и определение пусковых резисторов двигателя последовательного возбуждения



$$U_H = k\Phi_H\omega + IR \quad (1)$$

$$R = r_{дв} + R_{пуск} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{I}{k\Phi_H} R \quad (3)$$

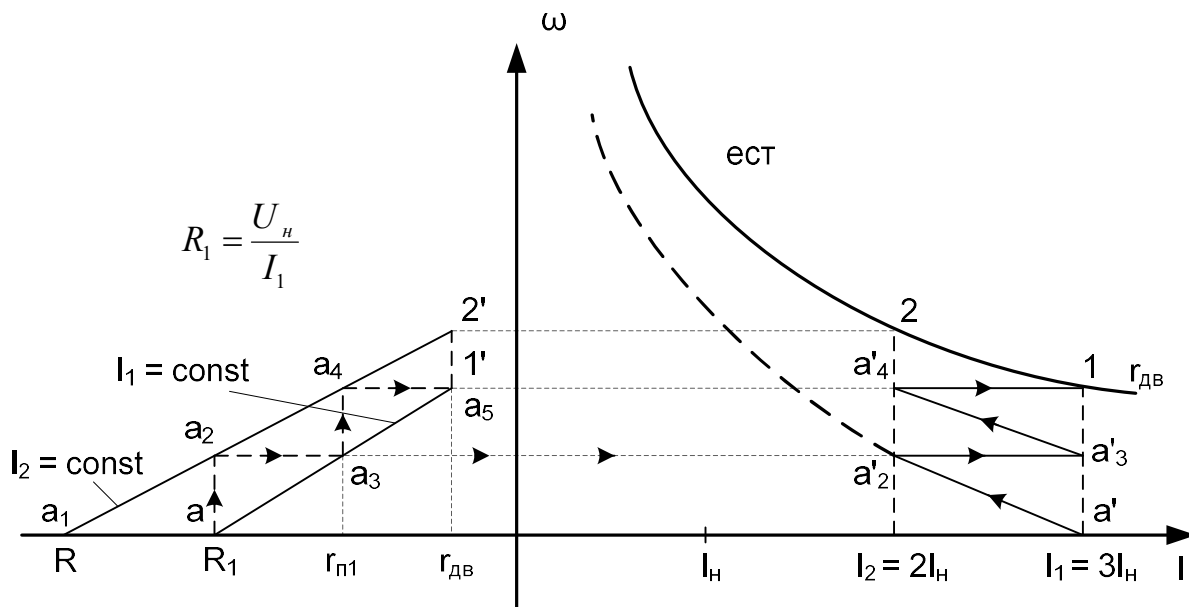


Если регулировать скорость при постоянном токе, то  $K$  на всех характеристиках будет одинакова;

$$\omega = A - BR \quad (4)$$

$$A = \frac{U_H}{k\Phi_H}; \quad B = \frac{I}{k\Phi_H}; \quad \Rightarrow \quad \omega = f(R)$$

Это положено в основу расчёта сопротивлений графическим методом следующим образом:



Если скорость  $a_5$  и  $a_7$  не совпали, то следует изменить ток  $I_1$  или  $I_2$  и перестроить.