Представление нагрузок в расчетах симметричных установившихся режимов

1.Основные понятия и определения

$$S = 3 \cdot U_{ф} \cdot I_{ф} = \sqrt{3} \cdot U \quad \cdot I_{ф}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{ф} \cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$U_{ф}$ – фазное напряжение,

U – линейной напряжение .

Обычно при рассмотрении установившихся режимов симметричных режимов 3-х фазной сети используют однофазные модели, которые характеризуются рабочими фазными параметрами, линейными напряжениями $U = U_{л}$ и потоками мощности трехфазной сети.

Вводят также понятие **линейного (фиктивного) тока** $I = \sqrt{3} \cdot I_{ф}$. Тогда в однофазной модели трехфазной сети потери мощности будут такими же, как и в трехфазной сети:

$$S = U \cdot I.$$

$$\Delta P = I^2 \cdot R = (\sqrt{3} \cdot I_{ф})^2 \cdot R = 3 \cdot I_{ф}^2 \cdot R$$

$$\Delta Q = I^2 \cdot X = 3 \cdot I_{ф}^2 \cdot X$$

$\dot{S} = \dot{U} \cdot \bar{I}$, где $\bar{I}$ – сопряженный комплекс

$\dot{S} = P + j \cdot Q$

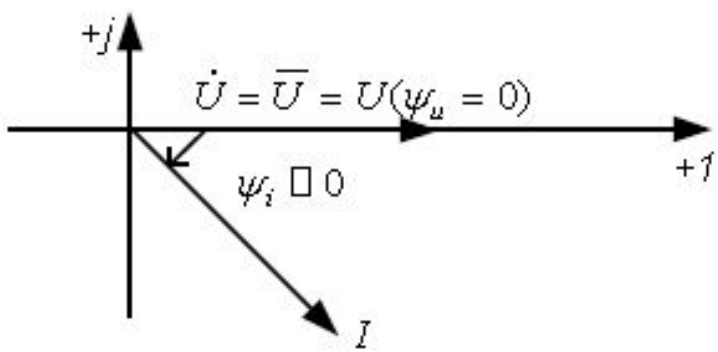
$\dot{Z} = R + j \cdot X$

$\dot{Y} = g + j \cdot b$

$\dot{S} = \dot{U} \cdot \bar{I} = U \cdot e^{j\psi_u} \cdot I \cdot e^{-j\psi_i} = U \cdot I \cdot e^{j\cdot\varphi} = U \cdot I \cdot \cos\varphi + U \cdot I \cdot \sin\varphi = P + j \cdot Q$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0 - \psi_i \geq 0$$



$\dot{Z} = R + j \cdot x$, еслн $x_{инд} = \omega \cdot L \geq 0$,

$\dot{Y} = \dfrac{1}{\dot{Z}} = g + j \cdot b$, где $b_{инд} \leq 0$

$\dot{S} = \dot{U} \cdot \bar{I}$, где $\bar{I}$ – сопряженный комплекс

$\dot{S} = P + j \cdot Q$

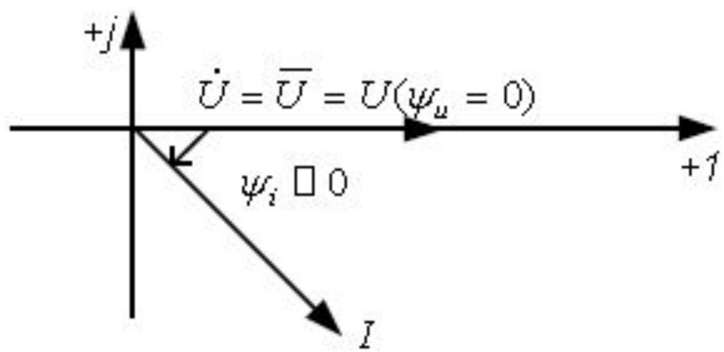
$\dot{Z} = R + j \cdot X$

$\dot{Y} = g + j \cdot b$

$\dot{S} = \dot{U} \cdot \bar{I} = U \cdot e^{j\psi_u} \cdot I \cdot e^{-j\psi_i} = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = U \cdot I \cdot \cos\varphi + U \cdot I \cdot \sin\varphi = P + j \cdot Q$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0 - \psi_i \geq 0$$

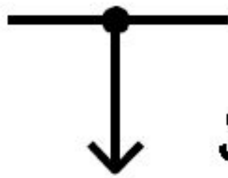


$\dot{Z} = R + j \cdot x$, еслн $x_{инд} = \omega \cdot L \geq 0$,

$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = g + j \cdot b$, где $b_{инд} \leq 0$

Представление нагрузок в расчетах установившихся режимов ЭЭС

1. Постоянство мощности в узле



$S_н = P_н + jQ_н = const$

2. Постоянство сопротивления (проводимости)

$\dot{z}_н = const$

$\dot{Y}_н = const$

3. Представление нагрузок статическими характеристиками.

$$S_н = P_н(U, f) + j \cdot Q_н(U, f)$$

Постоянство сопротивления

$$R_н - ?, X_н - ?$$

$$\dot{S}_н = P_н + j \cdot Q_н = U \cdot \bar{I}, U = U_н$$

$$P_н = I^2 \cdot R_н, Q_н = I^2 \cdot x_н$$

$$\bar{I} = \frac{\dot{S}_н}{U_н}, \dot{I} = \frac{\bar{S}_н}{\bar{U}_н}, I^2 = \dot{I} \cdot \bar{I} = \frac{\dot{S}_н \cdot \bar{S}_н}{\dot{U}_н \cdot \bar{U}_н} = \frac{S^2}{U^2} = \frac{P_н^2 + Q_н^2}{U^2}$$

$$R_н = \frac{P_н}{I_н^2} = \frac{P_н \cdot U^2}{P_н^2 + Q_н^2}, x_н = \frac{Q_н}{I_н^2} = \frac{Q_н \cdot U^2}{P_н^2 + Q_н^2}$$

- **Постоянство проводимости**.

$$g_н - ?, b_н - ?$$

$$\dot{S}_н = U \cdot \bar{I} = P_н + j \cdot Q_н, U = U_н$$

$$P_н = U^2 \cdot g_н, Q_н = -U^2 \cdot b_н$$

$$g_н = \frac{P_н}{U^2}, b_н = \frac{-Q_н}{U^2}$$

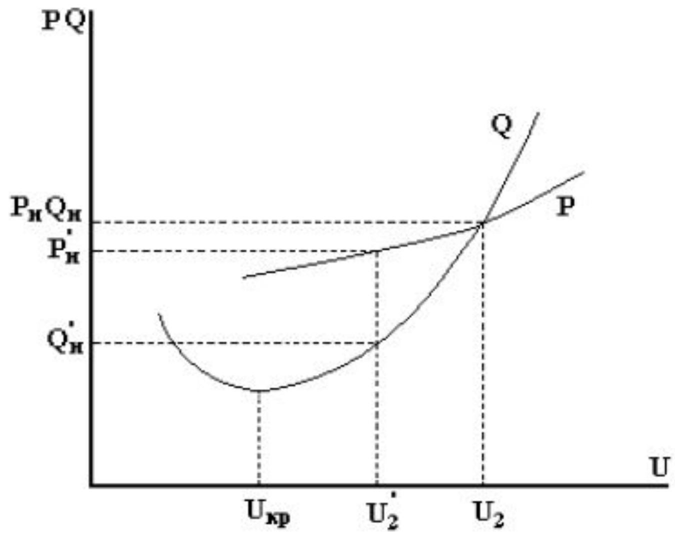
$$\dot{Z}_н = R_н + j \cdot Q_н$$

$$Y_н = \frac{1}{\dot{Z}_н} = \frac{1}{R_н + j \cdot x_н} = \frac{R_н - j \cdot x_н}{R_н^2 + x_н^2} = \frac{R_н}{R_н^2 + x_н^2} + j \cdot \frac{-x_н}{R_н^2 + x_н^2} = g_н + jb_н$$

Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.

Статические характеристики – это зависимости активной и реактивной мощности нагрузки при плавном изменении режимных параметров (напряжения и частоты). Характеристики каждого нагрузочного узла уникальны. Достоверно определить характеристики узла возможно только экспериментально, что представляет собой практическую сложность и применяется только в особых случаях. При представлении нагрузок в расчетах используют понятие обобщенного (типового) узла нагрузки.

Статические характеристики по напряжению



Математические модели нагрузки в расчетах установившихся режимов представляются полиномами вида:

$$P_н = P_{н\,ном} \cdot [a_p + b_p \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + c_p \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2]$$

$$Q_н = Q_{н\,ном} \cdot [a_q + b_q \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + c_q \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2]$$

$$a_p + b_p + c_p = 1, a_q + b_q + c_q = 1$$

Типовой узел нагрузки

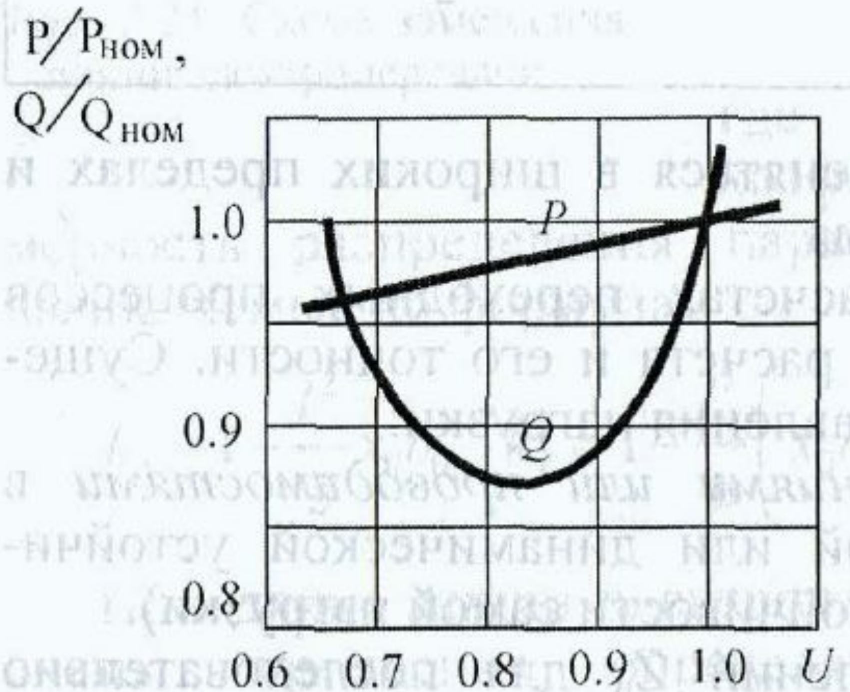


Рис. 2.22. Статистические характеристики промышленной нагрузки

- Асинхронные двигатели- 48%.
- Синхронные двигатели - 10%.
- Осветительная нагрузка -25%.
- Нагревательные приборы, выпрямительная нагрузка -10%.
- Потери - 7%.

Типовые значения коэффициентов полиномов

Вид характеристики	a	b	c
Постоянная проводимость	0	0	1
Постоянный задающий ток	0	1	0
Постоянная мощность	1	0	0
Типовая характеристика активной мощности	0,83	—0,3	0,47
Типовая характеристика реактивной мощности на стороне 6—10 кВ	4,9	—10,1	6,2
Типовая характеристика реактивной мощности на стороне 110—220 кВ	3,7	—7,0	4,3

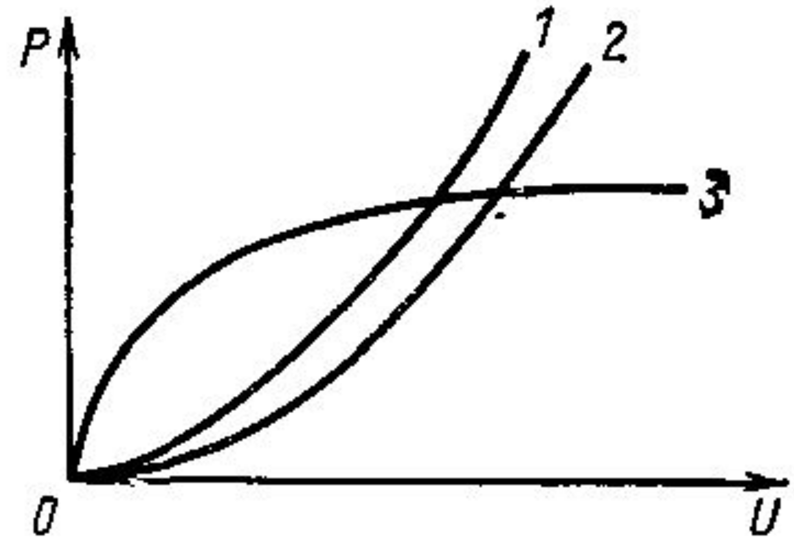
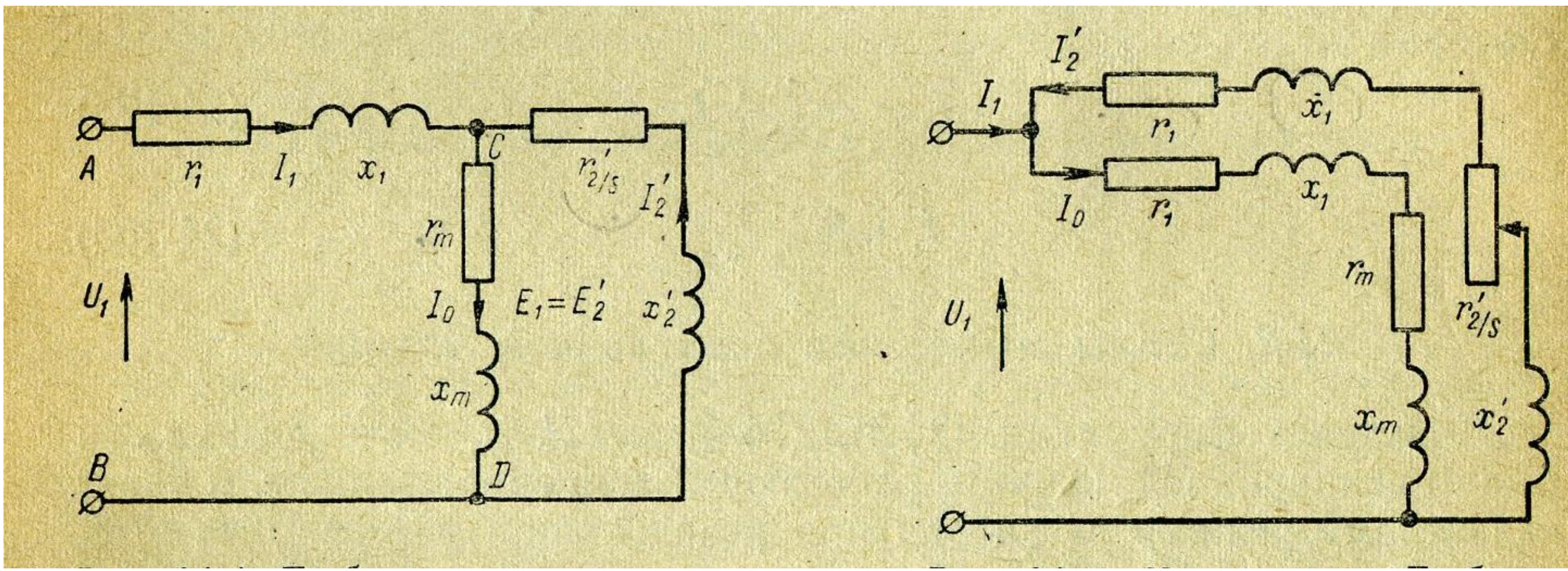


Рис. 2.8. Статические характеристики активной мощности осветительной нагрузки по напряжению: $P(U)$:

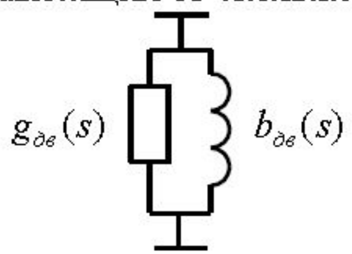
1 — при $r_н = \text{const}$; 2 — при $r_н$, зависящем от U в соответствии с кривой 3; 3 — зависимость сопротивления ламп накаливания от напряжения

Т и Г-образная схемы замещения асинхронного двигателя (АД)

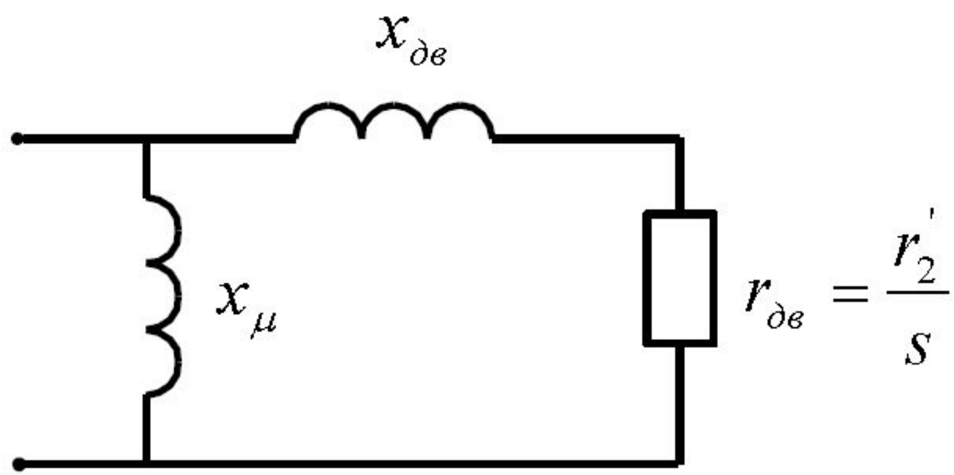


Упрощенные схемы замещения АД

Можно представить двигатель в виде активной и реактивной проводимостей, зависящих от скольжения:



Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя:



x_{μ} -реактивность шунта намагничивания

$x_{дв} = x_{1S} + x_{2S}^{*}$ - реактивности рассеяния обмотки статора и ротора, приведенные к обмотке статора.

$r_2^{'}$ - активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора.

Активная и реактивная мощность АД

Активная мощность АД: $\boldsymbol{P}_{\text{АД}} = \boldsymbol{I}^2 \cdot \frac{\boldsymbol{r}_2'}{\boldsymbol{s}}$

Реактивная мощность АД: $\boldsymbol{Q}_{\text{АД}} = \frac{\boldsymbol{U}^2}{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{\mu}}} + \boldsymbol{I}^2 \boldsymbol{x}_{\text{дв}} = \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{\mu}} + \boldsymbol{Q}$,

где U – напряжение на зажимах АД,

I – ток АД (приведенный к статору).

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_{\partial в}^2}}, \quad P_{АД} = I^2 \cdot \frac{r_2'}{s} = \frac{U^2 \cdot r_2' \cdot s}{\left(r_2'\right)^2 + x_{\partial в}^2 s^2}$$

Критическое скольжение $s_{кр}$ (отвечающее $P_{АД\,max}$),

можно найти из условия:

$$\frac{\partial P_{АД}}{\partial s} = 0, \text{ или } \frac{U^2 r_2'\left[\left(r_2'\right)^2 + x_{дв}^2 s^2\right] - 2\cdot s\cdot x_{дв}^2\cdot U^2\cdot s\cdot r_2'}{\left[\left(r_2'\right)^2 + x_{дв}^2 s^2\right]^2} = 0,$$

тогда для $\boldsymbol{s = s_{кр}}$, $\boldsymbol{\frac{r_2'}{s_{кр}} = x_{дв}}$, $\boldsymbol{g_{дв}(s_{кр}) = b(s_{кр})}$.

Реактивная проводимость АД (при $s = s_{кр}$):

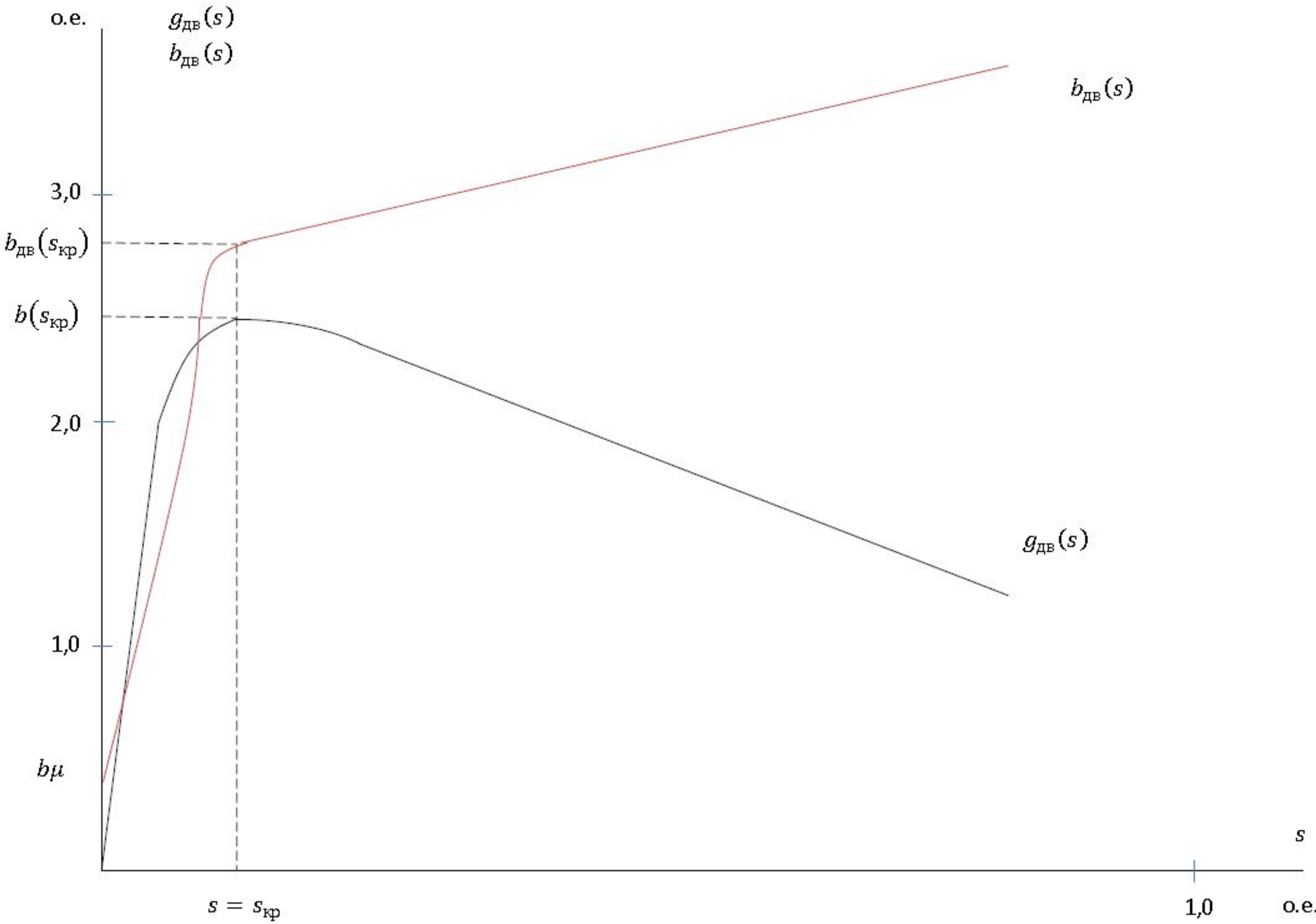
$$b_{дв}(s_{кр}) = \frac{1}{x_\mu} + b(s_{кр}) = b_\mu + b(s_{кр}), \text{ где } b(s_{кр}) = -\frac{x_{дв}}{\left[\left(\frac{r_2'}{s_{кр}}\right)^2 + x_{дв}^2\right]}.$$

Активная и реактивная мощность АД:

$$P_{АД} = U^2 g_{дв}(s), Q_{АД} = U^2 b_{дв}(s)$$

Эквивалентная проводимость АД

(активная и реактивная мощность АД в о.е.)



Зависимость реактивной мощности и скольжения АД от напряжения

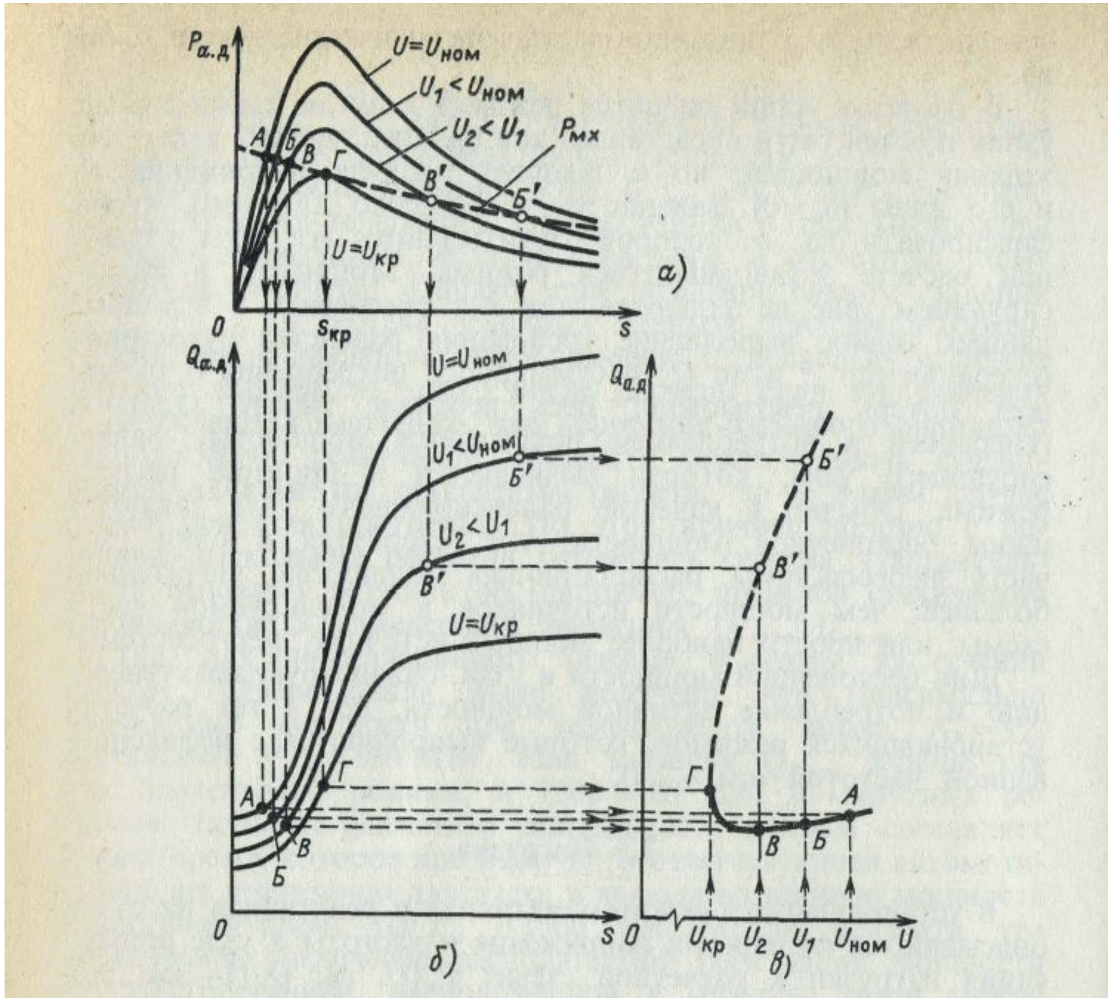


Рис. 2.3. Характеристики асинхронного двигателя:
а — зависимость активной мощности от скольжения; *б* — то же для реактивной мощности; *в* — статическая характеристика $Q_{а.д}=(U)$; *А*, *Б*, *В* — устойчивые режимы; *Г* — критическая точка; *В′*, *Б′* — неустойчивые режимы

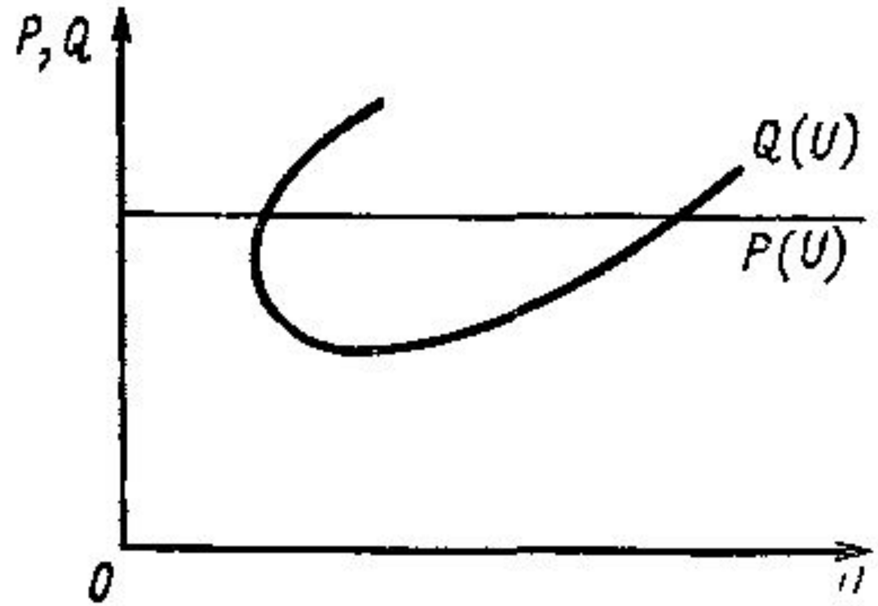
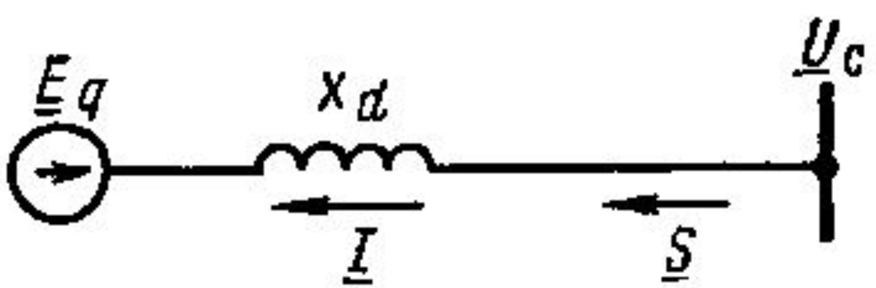


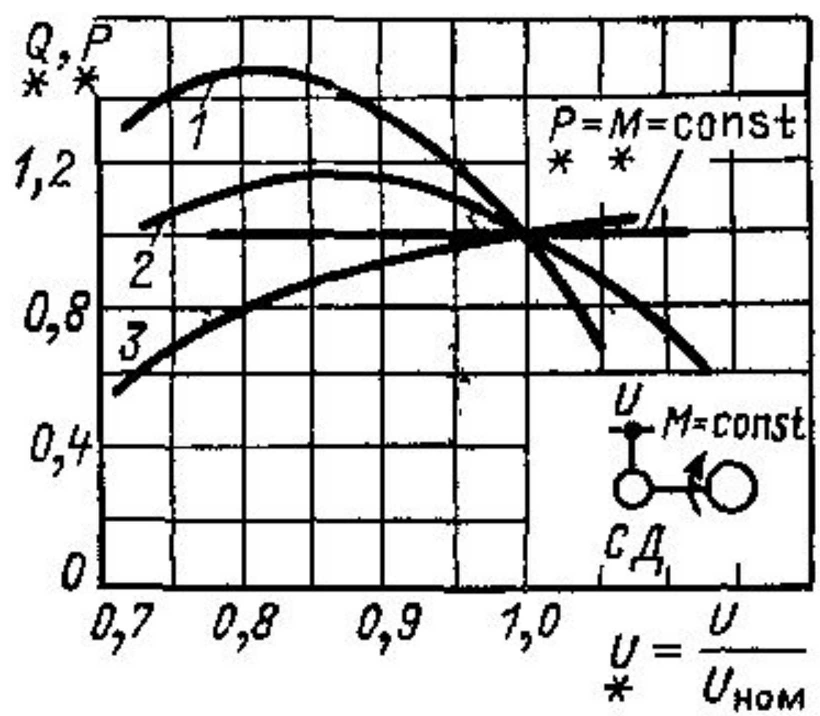
Рис. 2.12. Статические характеристики асинхронного двигателя по напряжению

Схема замещения синхронного двигателя (СД)



Статические характеристики по напряжению синхронного двигателя с независимым возбуждением

1- Xd=0,5 (о.е.ном.), 2- Xd=1,0 (о.е.ном.), 3 -Xd=2,0 (о.е.ном.),



Учет действия РПН трансформаторов

- Эквивалентная нагрузка может быть представлена на стороне высокого или низкого напряжения. Коэффициенты полиномов по реактивной мощности при этом различны.
- Понижающие трансформаторы класса напряжения 35кВ и выше, как правило, оснащаются устройствами регулирования коэффициента трансформации под нагрузкой (РПН) , что существенно влияет на статические характеристики нагрузки.
- В этом случае, в определенном диапазоне изменения напряжения на ступени ВН трансформатора, напряжение на ступени НН (и мощность нагрузки) остаются неизменными.

Статические характеристики реактивной мощности узла нагрузки по напряжению при наличии РПН

(при $U_{вн}$=var, $U_н$= const, $Q_н$= const)

имеет вид:

$$Q_н(U)=\begin{cases} Q_{н0}\left[a_Q+b_Q\dfrac{U-\Delta U_+}{U_{ном}}+c_Q\left(\dfrac{U-\Delta U_+}{U_{ном}}\right)^2\right] & \text{при } U>U_{ном}+\Delta U_+; \\ Q_{но} & \text{при } U_{ном}-\Delta U_-\leqslant U\leqslant U_{ном}+\Delta U_+; \\ Q_{но}\left[a_Q+b_Q\dfrac{U+\Delta U_-}{U_{ном}}+c_Q\left(\dfrac{U+\Delta U_-}{U_{ном}}\right)^2\right] & \text{при } U<U_{ном}-\Delta U_-. \end{cases} \quad (2\text{-}9)$$

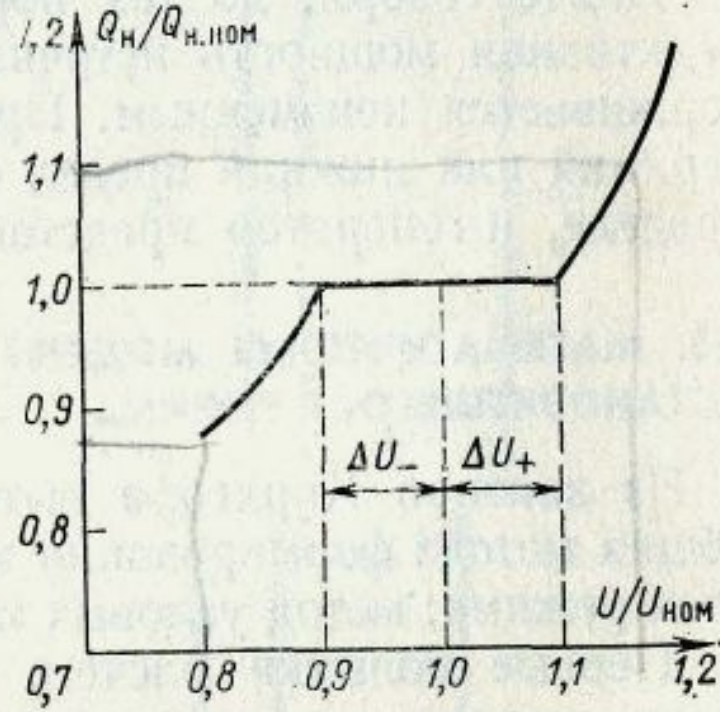
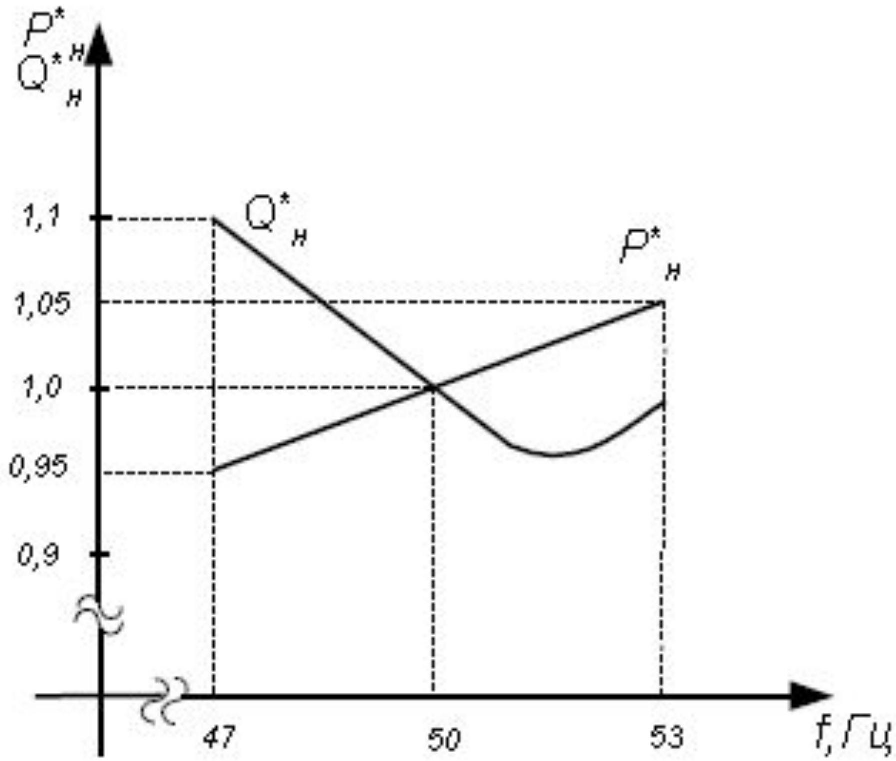


Рис. 2-3. Характеристики нагрузки, учитывающие регулирование напряжения

Статические характеристики по частоте (СХЧ):

$$S_н = P_н(f) + j \cdot Q_н(f)$$



$$P_н(f) = P_{ном} \cdot \left[\alpha_p + \beta_p \cdot \left(\frac{f}{f_{ном}}\right)\right]$$

$$Q_н(f) = Q_{ном} \cdot \left[\alpha_q + \beta_q \cdot \left(\frac{f}{f_{ном}}\right)\right]$$

Регулирующий эффект нагрузки по напряжению

$$\Psi(P) = \frac{U_0}{P_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial U}\Big|_{\substack{U=U_0 \\ P=P_0}}$$

$$\Psi(Q) = \frac{U_0}{Q_0} \cdot \frac{\partial Q}{\partial U}\Big|_{\substack{U=U_0 \\ Q=Q_0}}$$

U_0, P_0, Q_0 -напряжение, активная и реактивная мощности нагрузки, отвечающие исходному установившемуся режиму.

<u>Пример</u>: **нагрузка активная и представлена постоянством проводимости (квадратичная зависимость от напряжения)**

$$\dot{S}_н = P_н \cdot \dot{Y}_н = g_н = const, P_н = U^2 \cdot g_н$$

$$\Psi(P) = \frac{U_0}{P_0} \cdot 2 \cdot U_0 \cdot g_н = \frac{U_0 \cdot 2 \cdot U_0 \cdot g_н}{U_0^2 \cdot g_н} = 2,$$

(т.е. регулирующий эффект численно равен показателю степени).

Регулирующий эффект нагрузки по частоте

$$\Phi(P) = \frac{f_0}{P_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial f}\Big|_{\substack{f=f_0 \\ P=P_0}}$$

$$\Phi(Q) = \frac{f_0}{Q_0} \cdot \frac{\partial Q}{\partial f}\Big|_{\substack{f=f_0 \\ Q=Q_0}}$$