

# **Представление нагрузок в расчетах симметричных установившихся режимов**

# 1. Основные понятия и определения

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

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

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

$U_{\phi}$  – 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  $U = U_n$  и потоками мощности трехфазной сети.

Вводят также понятие **линейного (фиктивного) тока**  $I = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$ .

Тогда в однофазной модели трехфазной сети потери мощности будут такими же, как и в трехфазной сети:

$$S = U \cdot I.$$

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

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

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

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

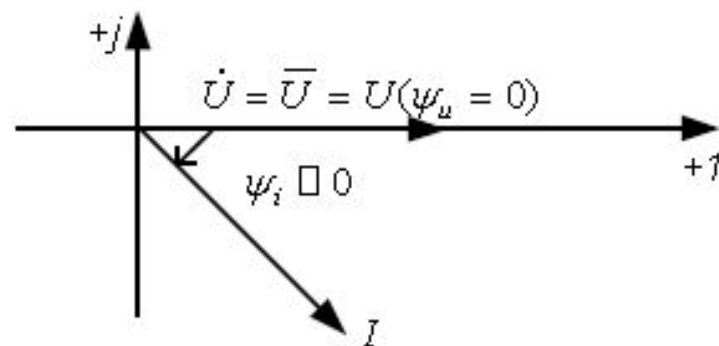
$$\dot{Z} = R + j \cdot X$$

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

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

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

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



$\dot{Z} = R + j \cdot x$ , если  $x_{\text{ухд}} = \omega \cdot L \geq 0$ ,

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

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

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

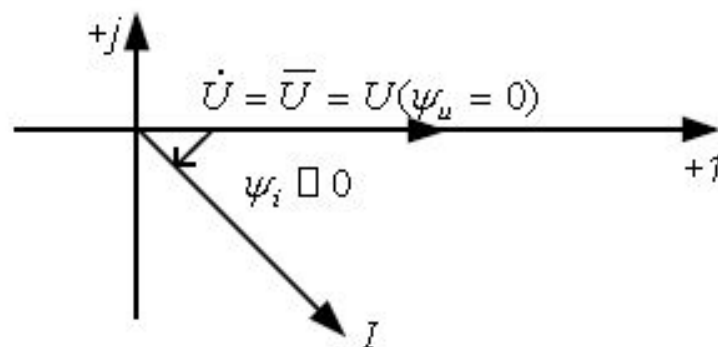
$$\dot{Z} = R + j \cdot X$$

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

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

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

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



$\dot{Z} = R + j \cdot x$ , если  $x_{u\lambda d} = \omega \cdot L \geq 0$ ,

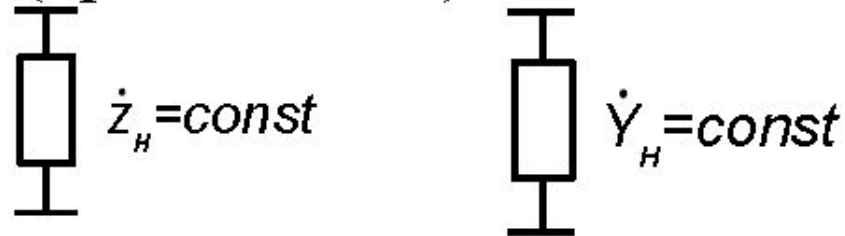
$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = g + j \cdot b$ , где  $b_{u\lambda d} \leq 0$

# Представление нагрузок в расчетах установившихся режимов ЭЭС

## 1. Постоянство мощности в узле



## 2. Постоянство сопротивления (проводимости)



## 3. Представление нагрузок статическими характеристиками.

$$S_H = P_H(U, f) + j \cdot Q_H(U, f)$$

## Постоянство сопротивления

$$R_n - ?, X_n - ?$$

$$\dot{S}_n = P_n + j \cdot Q_n = U \cdot \bar{I}, U = U_n$$

$$P_n = I^2 \cdot R_n, Q_n = I^2 \cdot x_n$$

$$\bar{I} = \frac{\dot{S}_n}{U_n}, \dot{I} = \frac{\bar{S}_n}{U_n}, I^2 = \dot{I} \cdot \bar{I} = \frac{\dot{S}_n \cdot \bar{S}_n}{U_n \cdot U_n} = \frac{S^2}{U^2} = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U^2}$$

$$R_n = \frac{P_n}{I_n^2} = \frac{P_n \cdot U^2}{P_n^2 + Q_n^2}, x_n = \frac{Q_n}{I_n^2} = \frac{Q_n \cdot U^2}{P_n^2 + Q_n^2}$$

### ▪ Постоянство проводимости.

$$g_n - ?, b_n - ?$$

$$\dot{S}_n = U \cdot \bar{I} = P_n + j \cdot Q_n, U = U_n$$

$$P_n = U^2 \cdot g_n, Q_n = -U^2 \cdot b_n$$

$$g_n = \frac{P_n}{U^2}, b_n = \frac{-Q_n}{U^2}$$

$$\dot{Z}_n = R_n + j \cdot Q_n$$

$$Y_n = \frac{1}{\dot{Z}_n} = \frac{1}{R_n + j \cdot x_n} = \frac{R_n - j \cdot x_n}{R_n^2 + x_n^2} = \frac{R_n}{R_n^2 + x_n^2} + j \cdot \frac{-x_n}{R_n^2 + x_n^2} = g_n + j b_n$$

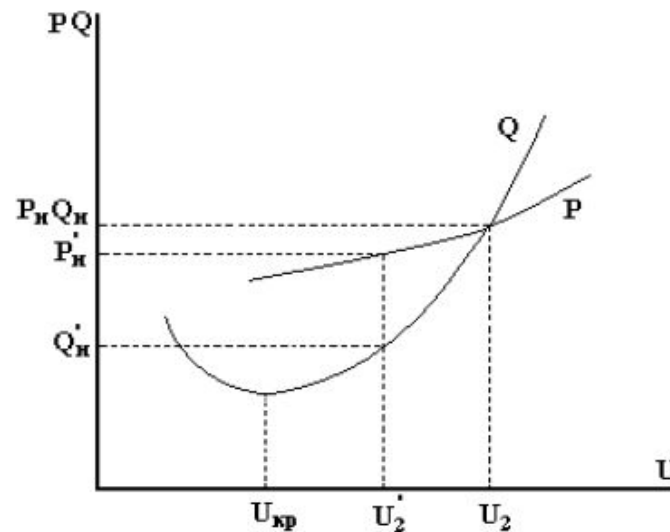
# **Статические характеристики нагрузки по напряжению и частоте.**

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:

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

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

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



# Типовой узел нагрузки

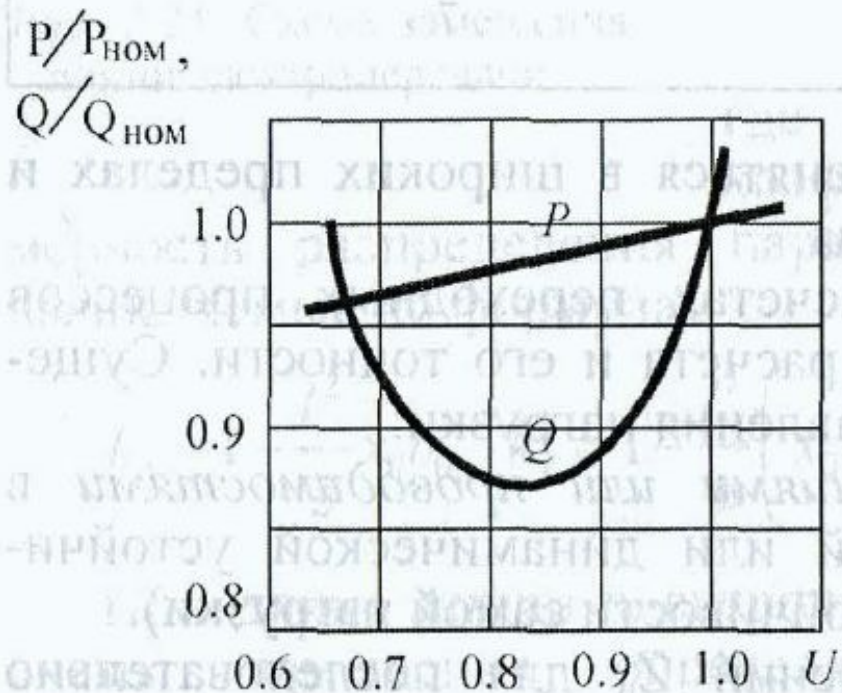


Рис. 2.22. Статистические характеристики промышленной нагрузки

- 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

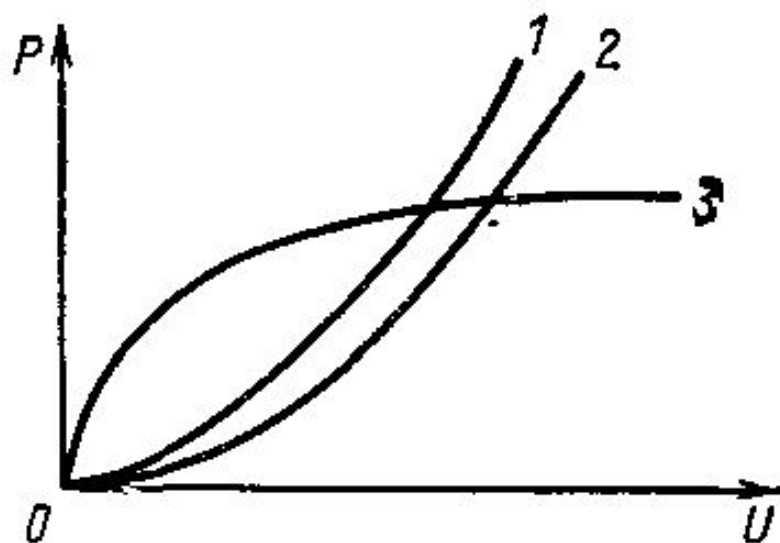
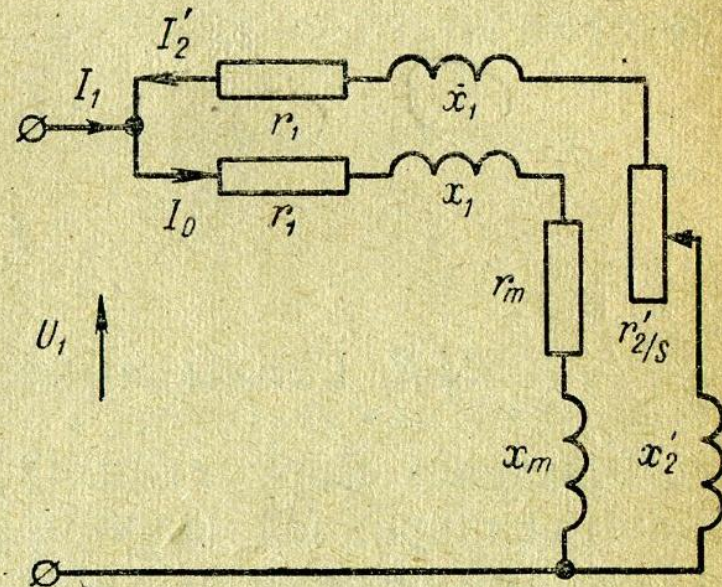
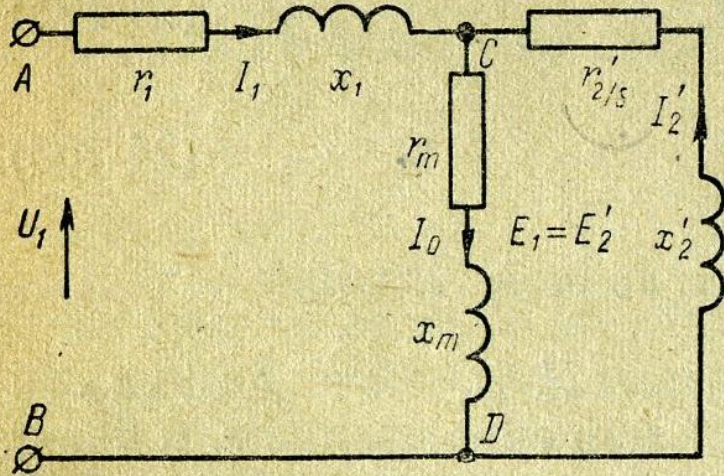


Рис. 2.8. Статические характеристики активной мощности осветительной нагрузки по напряжению:  $P(U)$ :

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

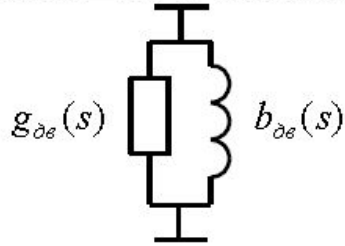


# Т и Г-образная схемы замещения асинхронного двигателя (АД)

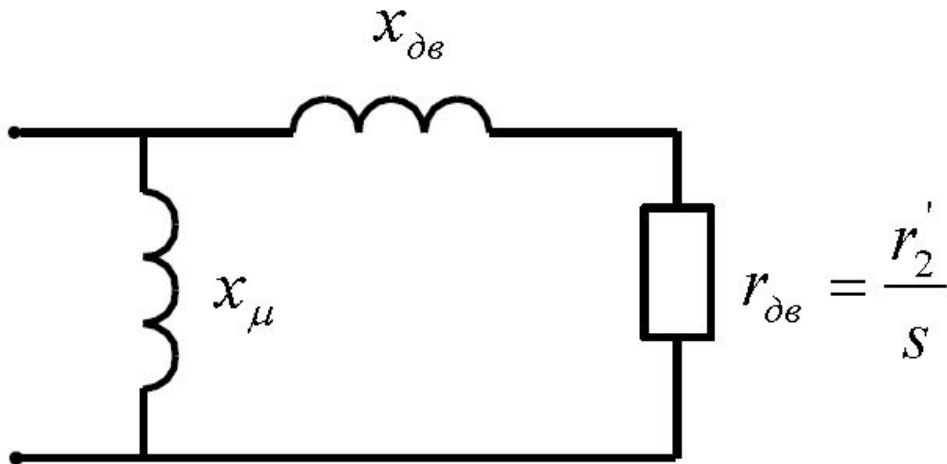


# Упрощенные схемы замещения АД

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



Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя:



$x_{\mu}$  - реактивность шунта намагничивания

$x_{\delta e} = x_{1S} + x_{2S}^*$  - 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:  $P_{\text{АД}} = I^2 \cdot \frac{r_2'}{s}$

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

где  $U$  – напряжение на зажимах АД,

$I$  – ток АД (приведенный к статору).

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

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

можно найти из условия:

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

$$\text{тогда для } s = s_{кр}, \quad \frac{r_2'}{s_{кр}} = x_{\partial\epsilon}, \quad g_{\partial\epsilon}(s_{кр}) = b(s_{кр}).$$

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

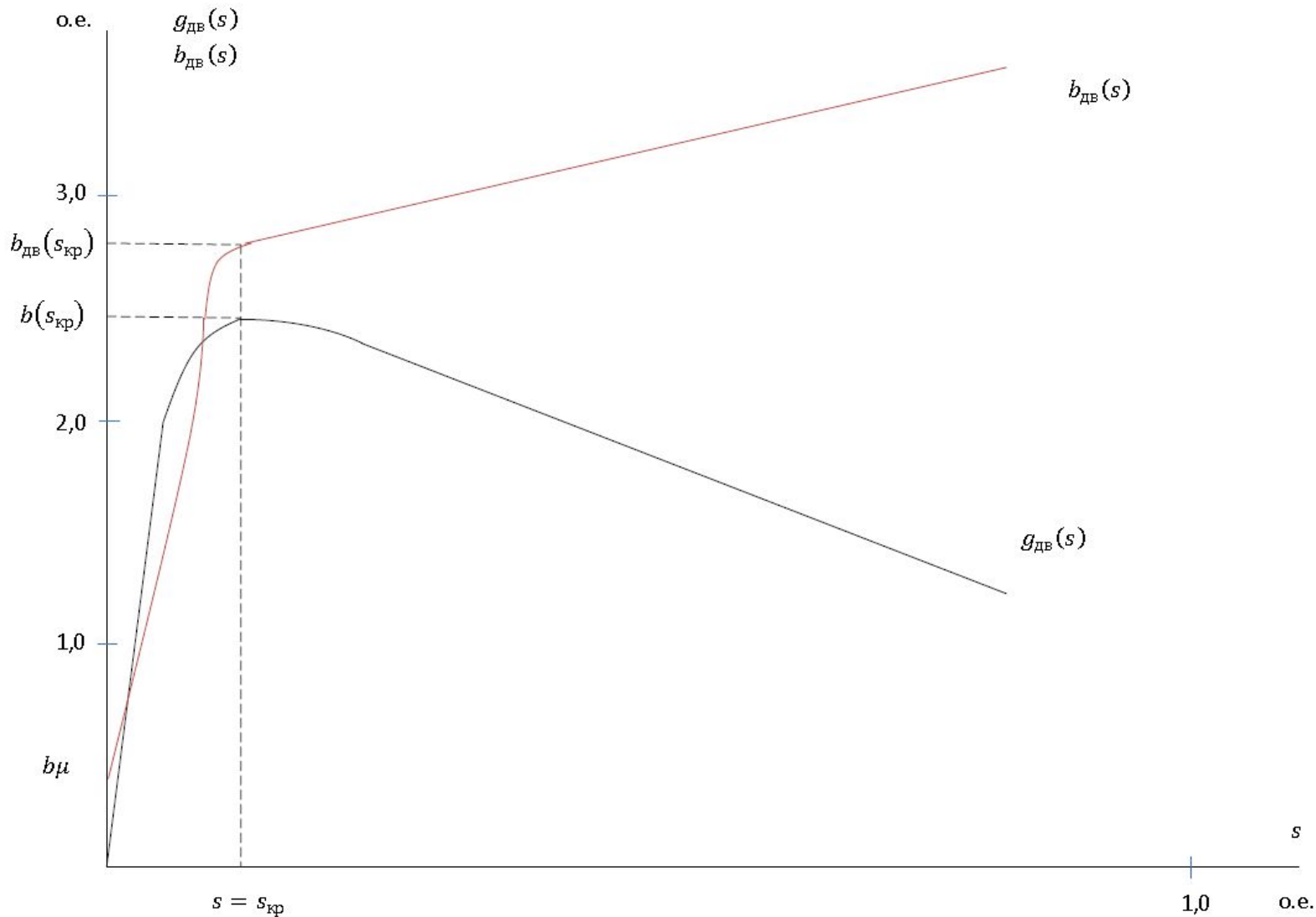
$$b_{\partial\epsilon}(s_{кр}) = \frac{1}{x_{\mu}} + b(s_{кр}) = b_{\mu} + b(s_{кр}), \text{ где } b(s_{кр}) = - \frac{x_{\partial\epsilon}}{\left[ \left( \frac{r_2'}{s_{кр}} \right)^2 + x_{\partial\epsilon}^2 \right]}.$$

Активная и реактивная мощность АД:

$$P_{АД} = U^2 g_{\partial\epsilon}(s), \quad Q_{АД} = U^2 b_{\partial\epsilon}(s)$$

# Эквивалентная проводимость АД

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





# Зависимость реактивной мощности и скольжения АД от напряжения

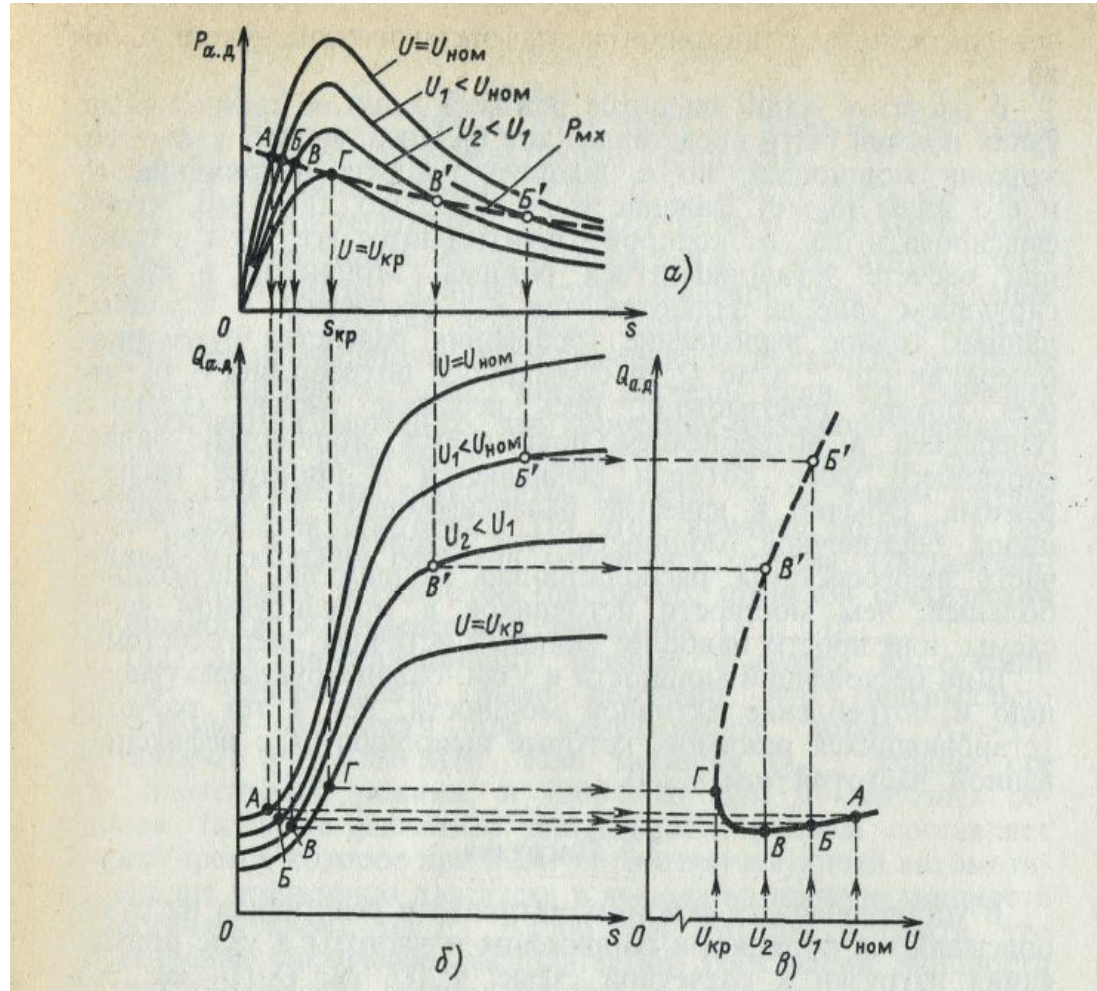


Рис. 2.3. Характеристики асинхронного двигателя:

$a$  — зависимость активной мощности от скольжения;  $б$  — то же для реактивной мощности;  $в$  — статическая характеристика  $Q_{a.д} = f(U)$ ; А, Б, В — устойчивые режимы; Г — критическая точка; Б', Б'' — неустойчивые режимы

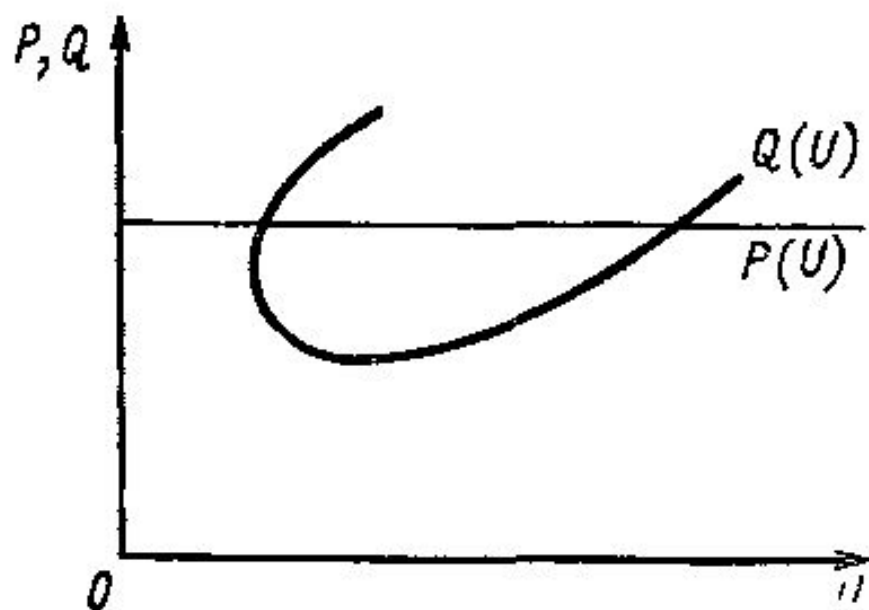
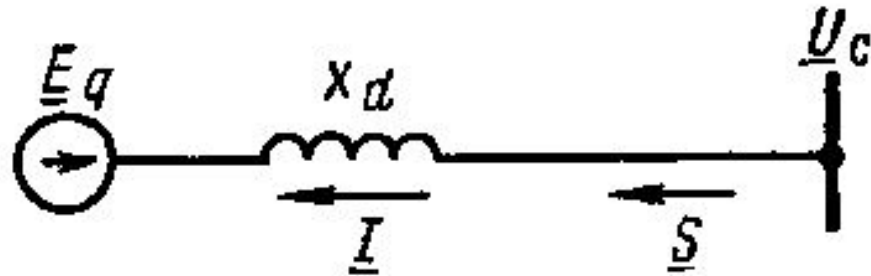


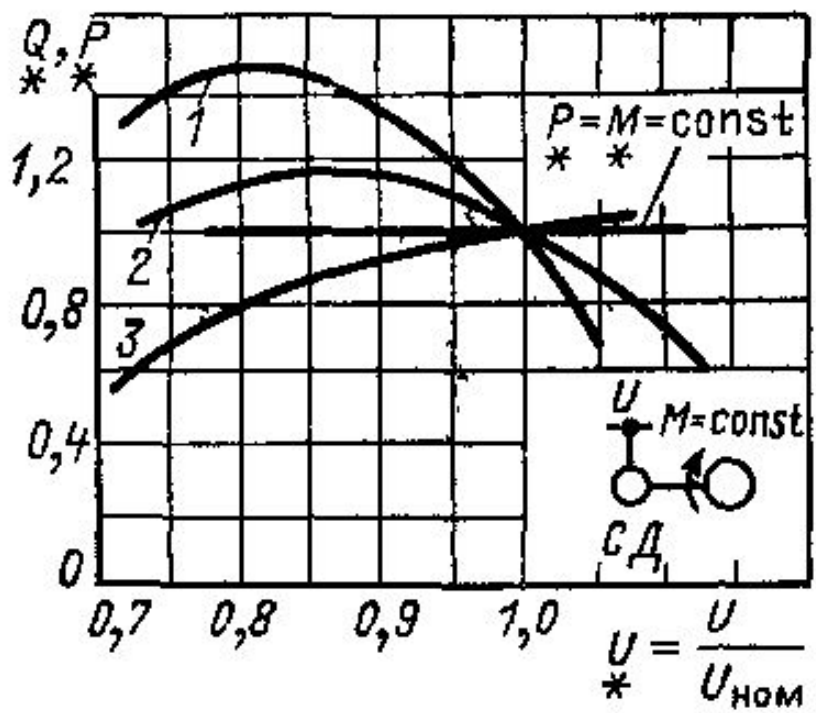
Рис. 2.12. Статические характеристики асинхронного двигателя по напряжению

# Схема замещения синхронного двигателя (СД)



# Статические характеристики по напряжению синхронного двигателя с независимым возбуждением

1-  $X_d=0,5$  (о.е.ном.), 2-  $X_d=1,0$  (о.е.ном.), 3 - $X_d=2,0$  (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  $U_{вн} = \text{var}$ ,  $U_{н} = \text{const}$ ,  $Q_{н} = \text{const}$  )

$$Q_{н}(U) = \begin{cases} Q_{н0} \left[ a_q + b_q \frac{U - \Delta U_+}{U_{н0м}} + c_q \left( \frac{U - \Delta U_+}{U_{н0м}} \right)^2 \right] & \text{при } U > U_{н0м} + \Delta U_+; \\ Q_{н0} & \text{при } U_{н0м} - \Delta U_- \leq U \leq U_{н0м} + \Delta U_+; \\ Q_{н0} \left[ a_q + b_q \frac{U + \Delta U_-}{U_{н0м}} + c_q \left( \frac{U + \Delta U_-}{U_{н0м}} \right)^2 \right] & \text{при } U < U_{н0м} - \Delta U_- . \end{cases} \quad (2-9)$$

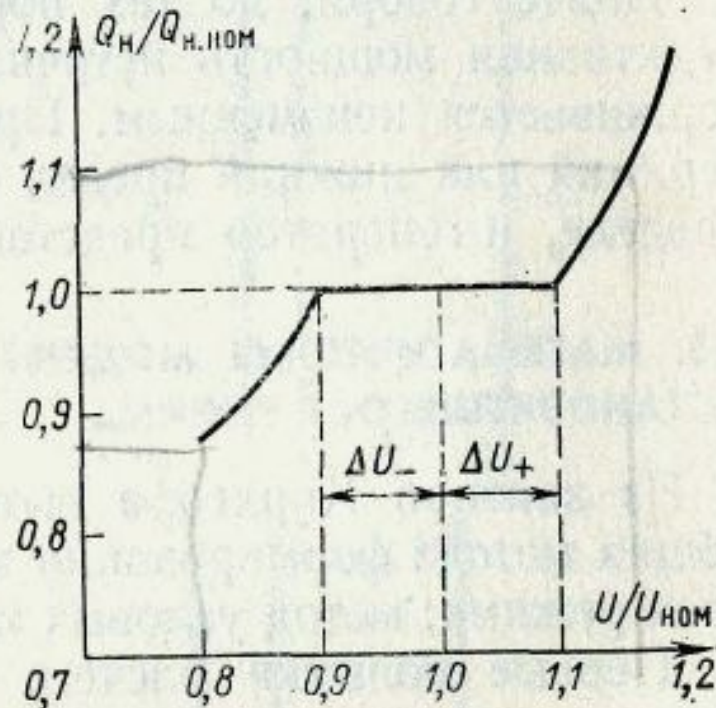
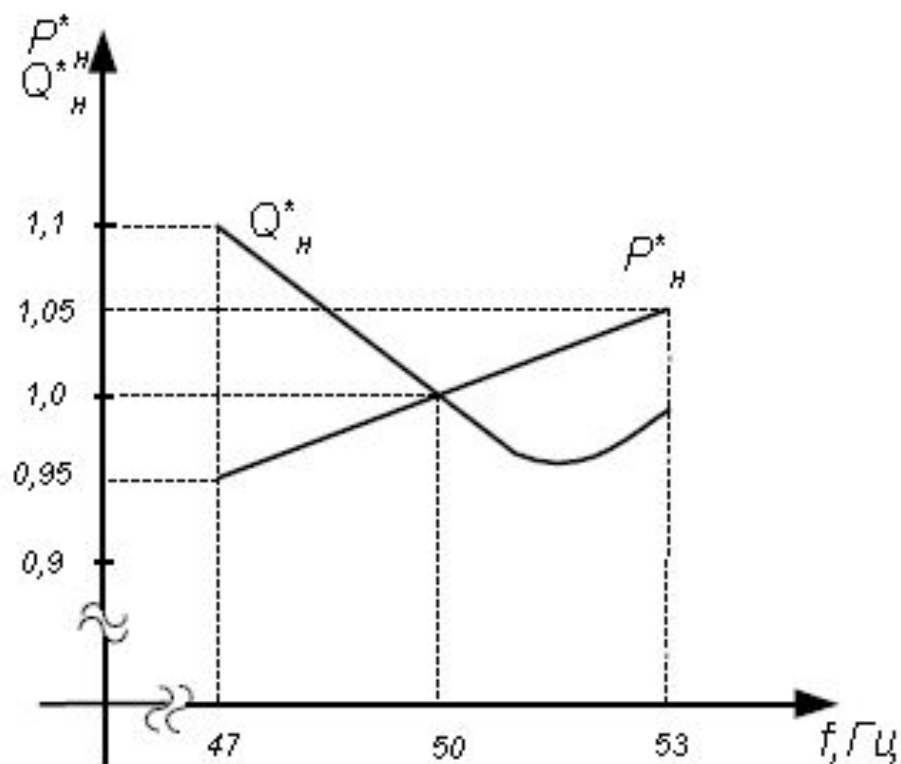


Рис. 2-3. Характеристики нагрузки, учитывающие регулирование напряжения

## Статические характеристики по частоте (СХЧ):

$$S_N = P_N(f) + j \cdot Q_N(f)$$



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

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



## 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.

**Пример:** нагрузка активная и представлена постоянством проводимости (квадратичная зависимость от напряжения)

$$\dot{S}_n = P_n \cdot \dot{Y}_n = g_n = const, P_n = U^2 \cdot g_n$$

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

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

## Регулирующий эффект нагрузки по частоте

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

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