

# ЛЕКЦИЯ №1

# ВВЕДЕНИЕ

# Энергоэффективность

Эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов, т.е. достижение экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при существующем уровне развития техники и технологии и соблюдении требований к охране окружающей среды

Потери  
электроэнергии

```
graph TD; A[Потери электроэнергии] --> B[При преобразовании]; A --> C[При транспортировке];
```

При  
преобразовании

При  
транспортировке

# Критерии энергоэффективности

Затраты (потери) электроэнергии на выполнение технологического процесса преобразования и транспортировки электроэнергии, с выполнением всех требований к качеству и охране окружающей среды.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

# Потери электроэнергии собственно в системе электроснабжения предприятия:

- потери в линиях электропередачи,
- потери в реакторах, измерительных трансформаторах и др.,
- нагрузочные потери в трансформаторах,
- потери холостого хода в трансформаторах,
- потери в компенсирующих устройствах.

# Потери мощности и энергии в линиях электропередачи

$$\Delta P_{\text{л}} = 3I_{\text{м}}^2 R \cdot 10^{-3} = \frac{P_{\text{м}}^2 + Q_{\text{м}}^2}{U_{\text{н}}^2} \cdot R \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta Q_{\text{л}} = 3I_{\text{м}}^2 X \cdot 10^{-3} = \frac{P_{\text{м}}^2 + Q_{\text{м}}^2}{U_{\text{н}}^2} \cdot X \cdot 10^{-3}$$

# Активное сопротивление линии

$$R=r_0l \quad (3)$$

где  $l$  - длина линии [км];  $r_0$  - удельное сопротивление [Ом/км]

# удельное сопротивление

$$r_0 = 1000/\gamma F (4)$$

где  $\gamma$  - удельная проводимость, принимаемая для медных проводников 54,4 м/Ом·мм<sup>2</sup>, для алюминиевых 32,2 м/Ом·мм<sup>2</sup>; F- сечение проводника [мм<sup>2</sup>].

# Индуктивное сопротивление линии

$$X = x_0 l \quad (5)$$

где  $x_0$  - удельное индуктивное  
сопротивление [Ом/км],

# Удельное индуктивное сопротивление транспонированной трехфазной воздушной линии

$$x_0 = 0,145 \lg \frac{D_{cs}}{r} + 0,016 \mu = x_0 + x_0'' \quad (6)$$

где  $D_{cs}$  - среднее геометрическое расстояние между осями проводов,  $r$  - радиус проводов,  $\mu$  - коэффициент магнитной проницаемости (для провода из цветного металла  $\mu = 1$ ).

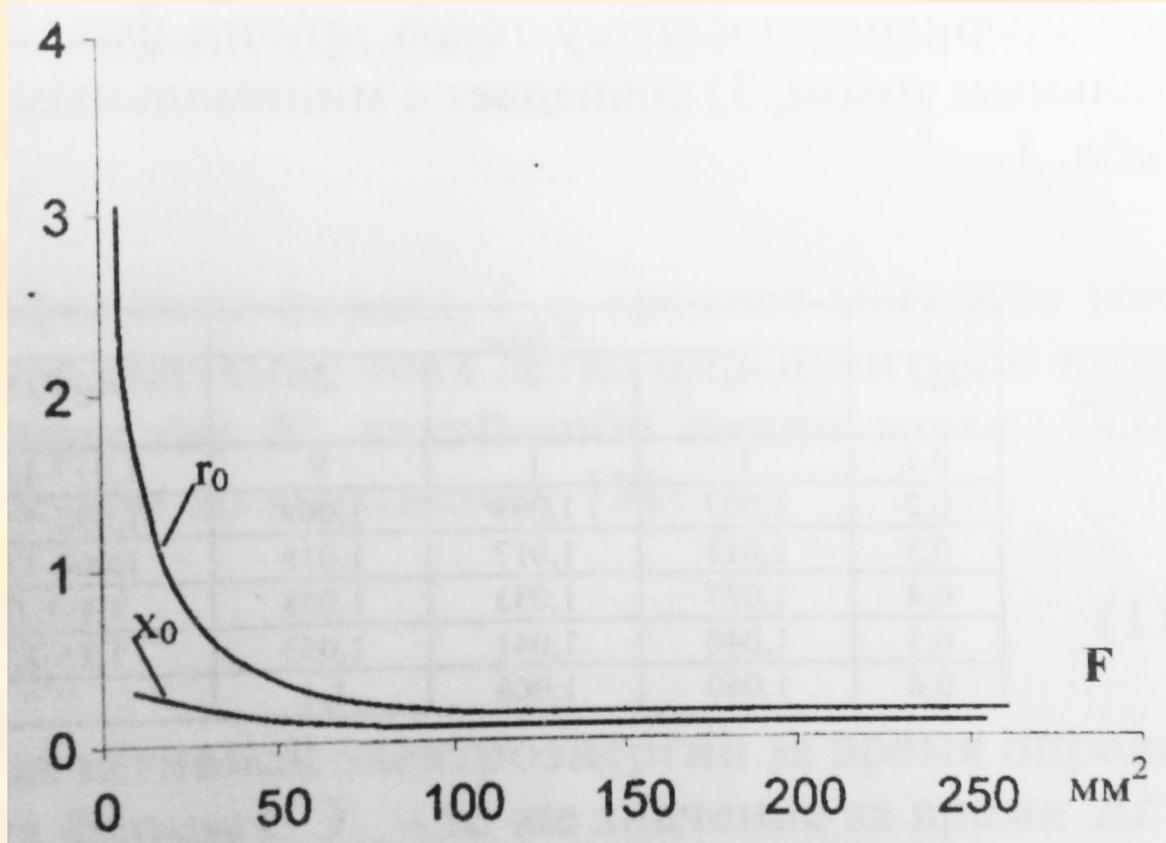


Рис. 1. Зависимость активного  $r_0$  и индуктивного  $x_0$  сопротивлений кабелей от их сечения  $F$

Коэффициент увеличения потерь мощности в трехфазной сети с неравномерной токовой загрузкой фаз трехпроводной линии

$$K_{нс р.мз} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{ср}^2}$$

где  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  - токи в проводах соответствующих фаз,  $I_{ср}$  - среднее значение токов.

# Коэффициент увеличения потерь мощности для системы с нулевым проводом

$$K_{нср} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3I_{ср}^2} \left( 1 + 1,5 \frac{R_N}{R_\phi} \right) - 1,5 \frac{R_N}{R_\phi}$$

где  $R_\phi$ ,  $R_N$  - сопротивления фазного и нулевого провода

# относительные значения небаланса токов

$$\Delta I_{неб} = (I_{max} - I_{min}) / I_{cp}$$

где  $I_{max}$  и  $I_{min}$  максимальное и минимальное значения из трех замеренных значений  $I_A, I_B, I_C$ .

# Потери энергии в линии

*активной:*

$$\Delta \mathcal{E}_{a.l.} = \Delta P_l \tau \text{ [кВт}\cdot\text{ч]},$$

*реактивной:*

$$\Delta \mathcal{E}_{p.l.} = \Delta Q_l \tau \text{ [кВАр}\cdot\text{ч]},$$

где  $\tau$  - время потерь, соответствующее времени работы системы с максимальной нагрузкой, и при равенстве потерь электроэнергии потерям при работе по действительному годовому графику нагрузки.

# Среднеквадратичное значение тока

$$I_{ск} = K_{\phi} \cdot I_{ср},$$

где  $K_{\phi}$  - коэффициент формы,

$I_{ср}$  - среднее значение тока участка сети.

$$K_{\phi} \cong \sqrt{m} \frac{\sqrt{\sum (\mathcal{E}'_{am})^2}}{\mathcal{E}_a}$$

где :

$\mathcal{E}_a$  - расход активной электроэнергии за время определения коэффициента формы  $t$ ,

$\mathcal{E}_{am}$  - то же значение за время  $\Delta t = t/m$ .

$m$  - число отметок показаний счетчика в течение времени  $t$ .

# Характерные в отношении электропотребления сутки

- 1) по записям в вахтенном журнале определяется расход электроэнергии за учетный период времени,
- 2) по найденному расходу электроэнергии за учетный период находится среднесуточный расход электроэнергии,
- 3) по вахтенному журналу находятся сутки, имеющие такой же или близкий расход электроэнергии, как и полученный среднесуточный расход,
- 4) найденные таким образом сутки и их действительный график нагрузки принимаются за характерные.

# Потери электроэнергии в какой-либо линии за учетный период

$$\Delta \mathcal{E}_a = 3 K_{\phi}^2 I_{cp}^2 R_{\varepsilon} T_p \quad (12)$$

$$\Delta \mathcal{E}_p = 3 K_{\phi}^2 I_{cp}^2 X_{\varepsilon} T_p \quad (15)$$

где

$T_p$  - число рабочих часов за учетный период,

$R_{\varepsilon}$  - эквивалентное сопротивление линии.

$I_{cp}$  - среднее за характерные сутки значение  
тока линии

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{\mathcal{E}_a^2 + \mathcal{E}_p^2}}{\sqrt{3}UT_p}$$

(13)

$$I_{cp} = \frac{\mathcal{E}_a}{\sqrt{3}UT_p \cos\varphi_{св}}$$

(14)

где

$\mathcal{E}_a, \mathcal{E}_p$  - расход активной и реактивной энергии за характерные сутки (кВт·ч, кВАр·ч),

$\cos\varphi_{св}$  - средневзвешенный коэффициент мощности линии,

$U$  – линейное напряжение (кВ),

$T_p$  - число рабочих часов за учетные сутки.

## *Эквивалентным сопротивлением*

какой-либо сети называется сопротивление некоторой условной неразветвленной линии, ток которой равен току головного участка сети и потери электроэнергии равны потерям в сети

$$R_{\Sigma} = \frac{\Delta \mathcal{E}_a \text{ сети}}{3I_{ск}^2 T_p}$$

$$X_{\Sigma} = \frac{\Delta \mathcal{E}_p \text{ сети}}{3I_{ск}^2 T_p}$$

(16)

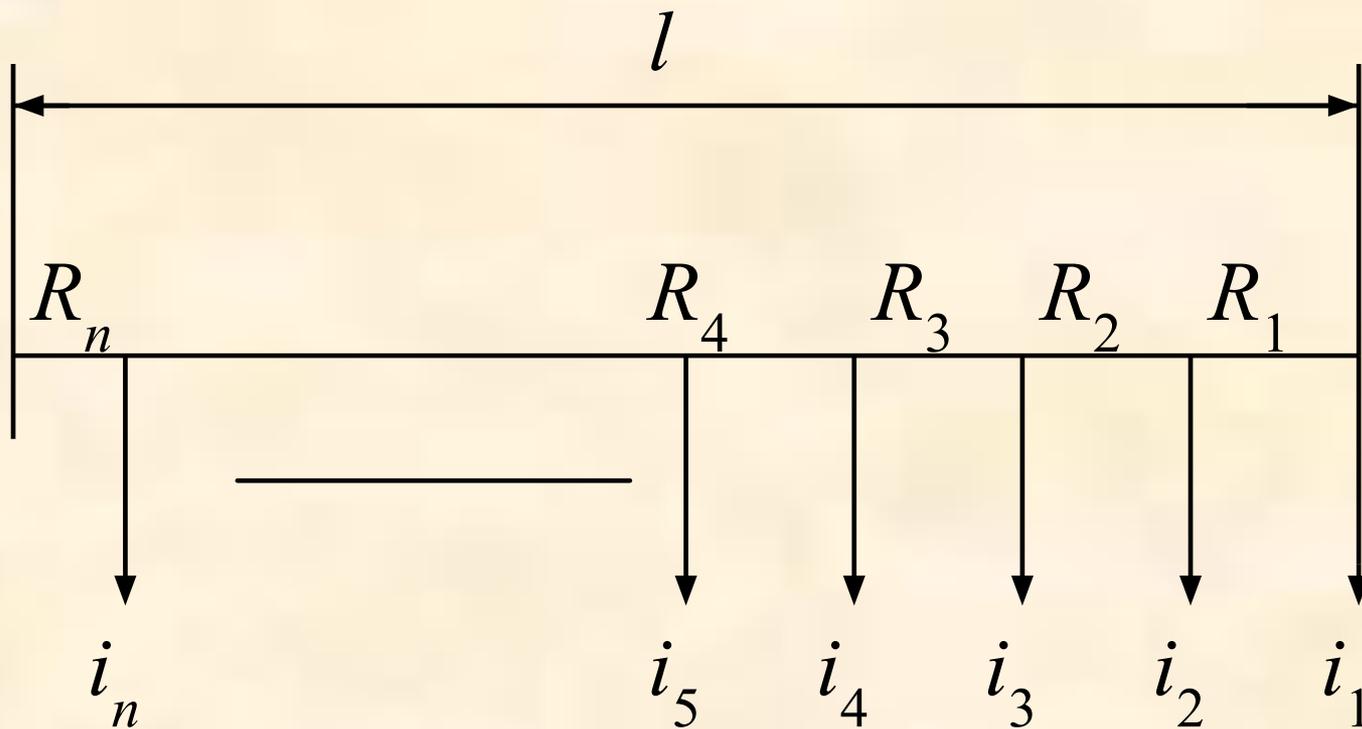


Рисунок 2 – Линия с распределенной нагрузкой

# Эквивалентные сопротивления для линии с распределенной электрической нагрузкой

$$R_3 \approx r_0 l \frac{1}{6} \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \left( 2 + \frac{1}{n} \right) \quad (17)$$

$$X_3 \approx x_0 l \frac{1}{6} \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \left( 2 + \frac{1}{n} \right) \quad (18)$$

где  $n$  - число электроприемников,  
подключенных к данной магистрали.

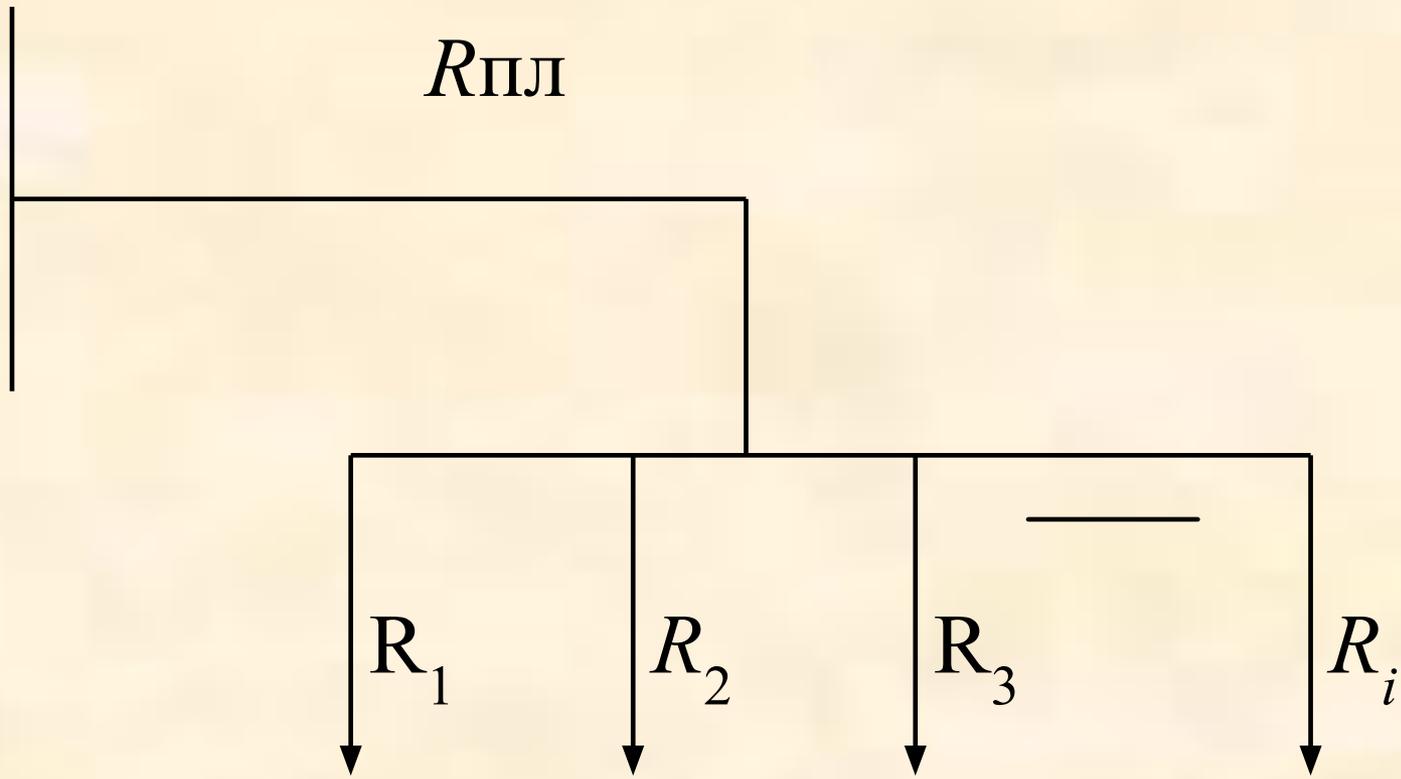


Рисунок 3 – Комбинированная схема питания нагрузок

## Эквивалентные сопротивления комбинированной схемы

$$R_{\Sigma} = R_{\text{пл}} \left[ 1 + \frac{\sum R_i K_{zi}^2}{\sum K_{zi}^2 R_{\text{пл}}} \right]$$

(19)

$$X_{\Sigma} = X_{\text{пл}} \left[ 1 + \frac{\sum X_i K_{zi}^2}{\sum K_{zi}^2 X_{\text{пл}}} \right]$$

(20)

где

$R_{\text{пл}}$ ,  $X_{\text{пл}}$  – активное и реактивное сопротивление питающей линии;

$R_i$ ,  $X_i$  - активное и реактивное сопротивление  $i$ -ой распределительной линии;

$K_{zi} = P_i/P_1$  - коэффициент загрузки  $i$ -го участка относительно наиболее загруженного, принимаемого за первый.

# Способы сокращения потерь электроэнергии

1. Использовать все имеющиеся линии электропередач в системе электроснабжения. Нецелесообразно иметь отключенные резервные линии. При включении резервной линии потери снижаются в 2 раза при одинаковых параметрах линий.

# Способы сокращения потерь электроэнергии

2. Максимально снижать реактивную мощность нагрузки путем рационального использования установленной мощности двигателей и трансформаторов и применением компенсирующих устройств.

# Способы сокращения потерь электроэнергии

3. В максимальной степени использовать повышенное напряжение путем установки понижающих трансформаторов вблизи электроприемников и внедрения повышенного напряжения 1140 и 660 В для питания двигателей, механизмов, установок.

## Экономия электроэнергии в сети при переводе ее на более высокое напряжение

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 \frac{l}{\gamma} \left[ \frac{I_{\text{НН}}^2}{F_{\text{НН}}} - \frac{I_{\text{ВН}}^2}{F_{\text{ВН}}} \right] T_p \quad [\text{кВт} \cdot \text{ч}] \quad (21)$$

где

$l$  - длина участка сети, на котором производится повышение напряжения [м];

$I_{\text{НН}}, I_{\text{ВН}}$  - ток в сети при низком и выс. напряжении [А];

$F_{\text{НН}}, F_{\text{ВН}}$  - сечение жил проводов в сети низкого и высокого напряжения [мм<sup>2</sup>];

$\gamma$  - удельная проводимость участка сети;

$\gamma T_p$  - число рабочих часов

# Способы сокращения потерь электроэнергии

4. Эффективным средством снижения потерь электроэнергии является выравнивание графиков нагрузки объекта электроснабжения.

Наиболее важными показателями, характеризующими разномерность графиков, являются: коэффициент заполнения графика нагрузки  $K_{zn}$  и время использования максимальной нагрузки  $T_{max}$

$$K_{3п} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{маx}}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot t_i}{T \cdot P_{\text{маx}}}, (\text{оо.е})$$

$$T_{\text{маx}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot t_i}{P_{\text{маx}}}, (\text{чч})$$

$$K_{3п} = \frac{T_{\text{маx}}}{T},$$

где

$P_i, t_i$  – мощность и продолжительность нагрузки в течение  $i$ -го отрезка времени на графике нагрузки;  
 $N$  – общее число отрезкой времени на графике нагрузки;  
 $T$  – суммарная продолжительность нагрузки, ч.

# Снижение потери электроэнергии в сети

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_H \cdot \left( 1 - \frac{K_{\phi 2}^2}{K_{\phi 1}^2} \right),$$

где

$K_{\phi 1}$ ,  $K_{\phi 2}$  – коэффициенты формы графика активной нагрузки соответственно до его выравнивания и после;

$\Delta \mathcal{E}_H$  – нагрузочные потери в сети при коэффициенте формы  $K_{\phi 1}$ .

## Коэффициент формы

$$\frac{K_{\phi 2}^2}{K_{\phi 1}^2} = \left( \frac{1090/T_{\max 2} + 0,876}{1090/T_{\max 1} + 0,876} \right)^2$$

# Уменьшение сопротивления линий, связанное с их реконструкцией

достигается:

1. Сокращением протяженности и увеличением сечения кабельных и воздушных линий.
2. Заменой проводов с высоким удельным сопротивлением на проводники с меньшим сопротивлением, например, замена стальных проводов на алюминиевые.

# Уменьшение сопротивления линий, связанное с их реконструкцией

Величину сэкономленной электроэнергии при этом можно определить по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 I_{\text{СК}}^2 \left( \frac{l_1}{\gamma_1 F_1} - \frac{l_2}{\gamma_2 F_2} \right) T_p, \quad [\text{кВт} \cdot \text{ч}] \quad (22)$$

где:  $I_{\text{СК}}$  - среднеквадратичное значение тока нагрузки одной фазы [А];

$l_1, F_1, \gamma_1$  - длина [м], сечение [мм<sup>2</sup>] и удельная электрическая проводимость участка сети до реконструкции;

$l_2, F_2, \gamma_2$  - то же после реконструкции

# **ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ**

# Составляющие потерь мощности в трансформаторах

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2}{m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1}, \quad (23)$$

где

$m_2$ ,  $U_2$ ,  $I_2$ ,  $\cos \varphi_2$  и  $m_1$ ,  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $\cos \varphi_1$  - количество фаз, фазные напряжения, токи и коэффициенты мощности вторичной и первичной сети трансформатора.

# Составляющие потерь мощности в трансформаторах

Активная мощность, потребляемая трансформатором из первичной сети

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{\text{Э}1} + P_{\text{Э}2},$$

где

$P_m$  - магнитные потери;

$P_{\text{Э}1}, P_{\text{Э}2}$  - электрические потери в первичной и вторичной обмотках.

# Составляющие потерь мощности в трансформаторах

$$P_{\text{Э1}} + P_{\text{Э2}} = P_{\text{кз}} \beta^2, \quad (24)$$

где

$\beta = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{\text{нт}}}$  коэффициент нагрузки трансформатора;

$P_{\text{нагр}}$ ,  $P_{\text{нт}}$  - фактическая и номинальная нагрузка трансформатора;

$I_1$ ,  $I_{1н}$  - фактический и номинальный ток.

# Составляющие потерь мощности в трансформаторах

$$\eta = \frac{P_1 - (P_M + P_{\text{Э}1} + P_{\text{Э}2})}{P_1} = 1 - \frac{P_X + \beta^2 P_K}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_X + \beta^2 P_K} \quad (25)$$

Коэффициент нагрузки трансформатора, обеспечивающий его работу с максимальным КПД

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_{XX}}{P_{K3}}}, \quad (26)$$

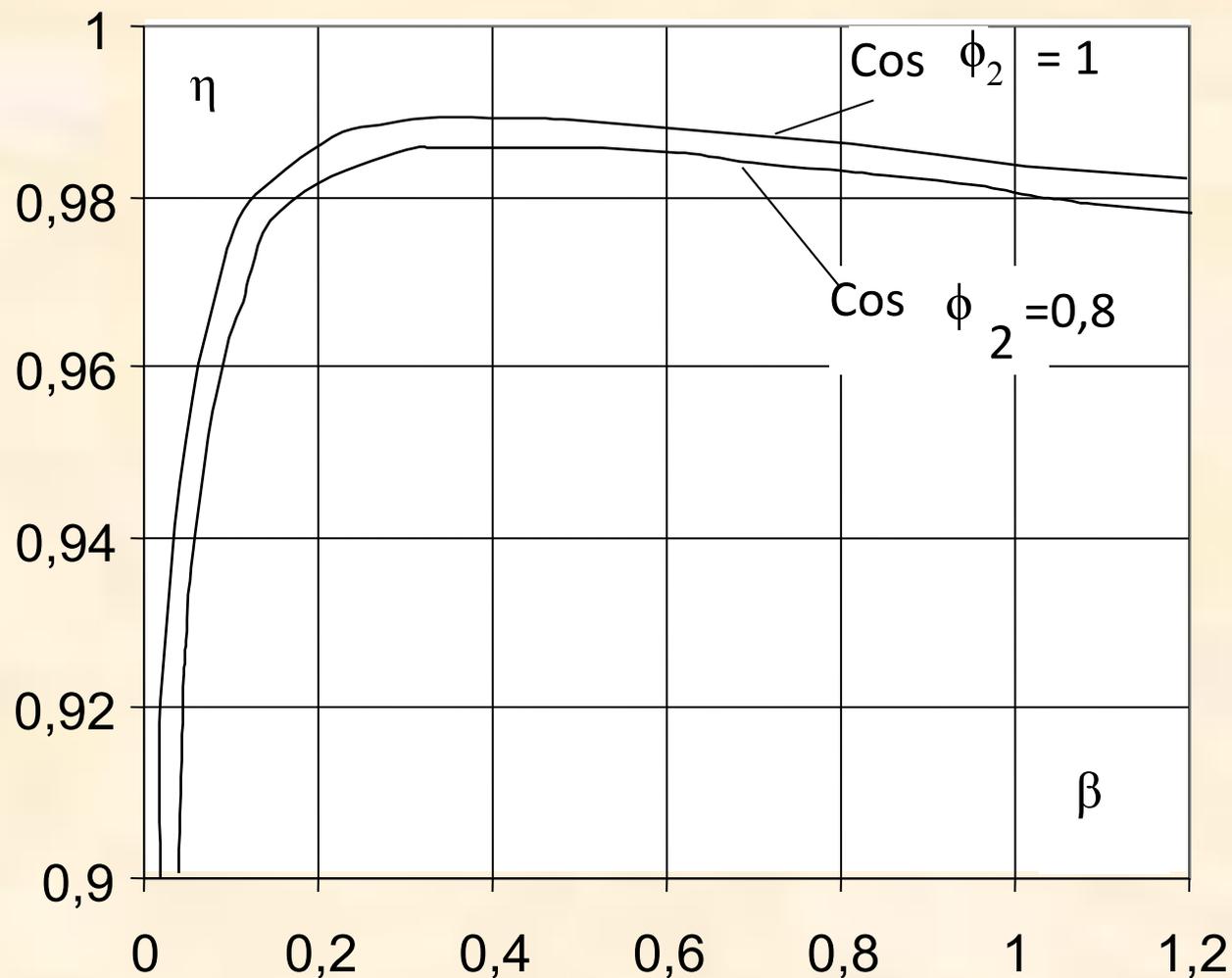


Рис. 4. Зависимость КПД трансформатора от  $\beta$

# Определение и минимизация потерь мощности и энергии в трансформаторе

Для подсчета потерь электрической энергии в двухобмоточном трансформаторе необходимы следующие данные:

- а) каталожные или паспортные
- б) расчетные

# Определение и минимизация потерь мощности и энергии в 2х обмоточном трансформаторе

## каталожные или паспортные:

- номинальная мощность трансформатора  $S_H$ , кВ · А;
- потери активной мощности в стали трансформатора,  $\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx}$ , кВт;
- потери активной мощности в меди обмоток трансформатора при номинальной нагрузке,  $\Delta P_{м} = \Delta P_{кз}$ , кВт;
- ток холостого хода трансформатора,  $I_{xx}$ , %;
- напряжение короткого замыкания,  $U_{кз}$ , %;

# Определение и минимизация потерь мощности и энергии в 2х обмоточном трансформаторе

расчетные:

- потери реактивной мощности трансформатора, кВАр:

— при холостом ходе

$$\Delta Q_{\text{xx}} = S_{\text{H}} \cdot \frac{I_{\text{xx}}}{100};$$

— при коротком замыкании

$$\Delta Q_{\text{кз}} = S_{\text{H}} \cdot \frac{I_{\text{кз}}}{100}.$$

Целесообразность замены незагруженного трансформатора другим, менее мощным определяется:

$$\Delta \mathcal{E} = (P_{m1} - P_{m2}) T_p \text{ [кВт}\cdot\text{ч]} \quad (29)$$

где  $T_p$  – число часов (например за год -8760) за исключением времени на ревизию, ремонт, набор проб трансформаторного масла, праздничные, выходные дни, нерабочие или ремонтные схемы.

# **ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОМПЕНСИРУЮЩИХ И ПРЕОБРАЗУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ**

## Потери в устройствах компенсации реактивной мощности

- Наиболее тяжелым в тепловом отношении режимом работы компенсатора является режим перевозбуждения.

В этом режиме при номинальном (допустимом по условию нагрева обмотки возбуждения) токе возбуждения ток якоря достигает наибольшего значения

$$I_1 = I_c = \frac{E_0 - U_c}{X_d}$$

- По мере уменьшения тока возбуждения ток якоря сначала снижается почти до нуля при  $I_f = I_{f0}$
- затем вновь возрастает, принимая при  $I_f = 0$  значение

$$I_1 = I_L = \frac{U_c}{X_d}$$

## Потери электроэнергии в компенсирующих и преобразующих устройствах

Отношение токов

$$\frac{I_c}{I_L} = \frac{E_0 - U_c}{U_c} = \frac{E_0}{U_c} - 1 \approx \frac{I_{f_H}}{I_{f_0}} - 1 = 1,5 - 2.$$

Следовательно, синхронные компенсаторы могут потреблять реактивную мощность  $Q_L$  в 1,5-2 раза меньшую, чем выдаваемую в сеть мощность  $Q_c$  в режиме перевозбуждения.

Для увеличения мощности  $Q_L$  необходимо выполнять компенсаторы с малым  $x_d$ , что связано с увеличением стоимости машины. Другой путь увеличения мощности  $Q_L$  - это использование режимов отрицательного возбуждения. Однако при реализации этого режима возникают трудности обеспечения устойчивой работы синхронного компенсатора.

## Потери электроэнергии в компенсирующих и преобразующих устройствах

Достоинства синхронных компенсаторов как источников реактивной мощности:

- возможность плавного регулирования генерируемой реактивной мощности;
- положительный регулирующий эффект, заключающийся в увеличении генерируемой реактивной мощности при уменьшении напряжения сети;
- достаточная надежность обмоток при коротких замыканиях.

## Потери электроэнергии в компенсирующих и преобразующих устройствах

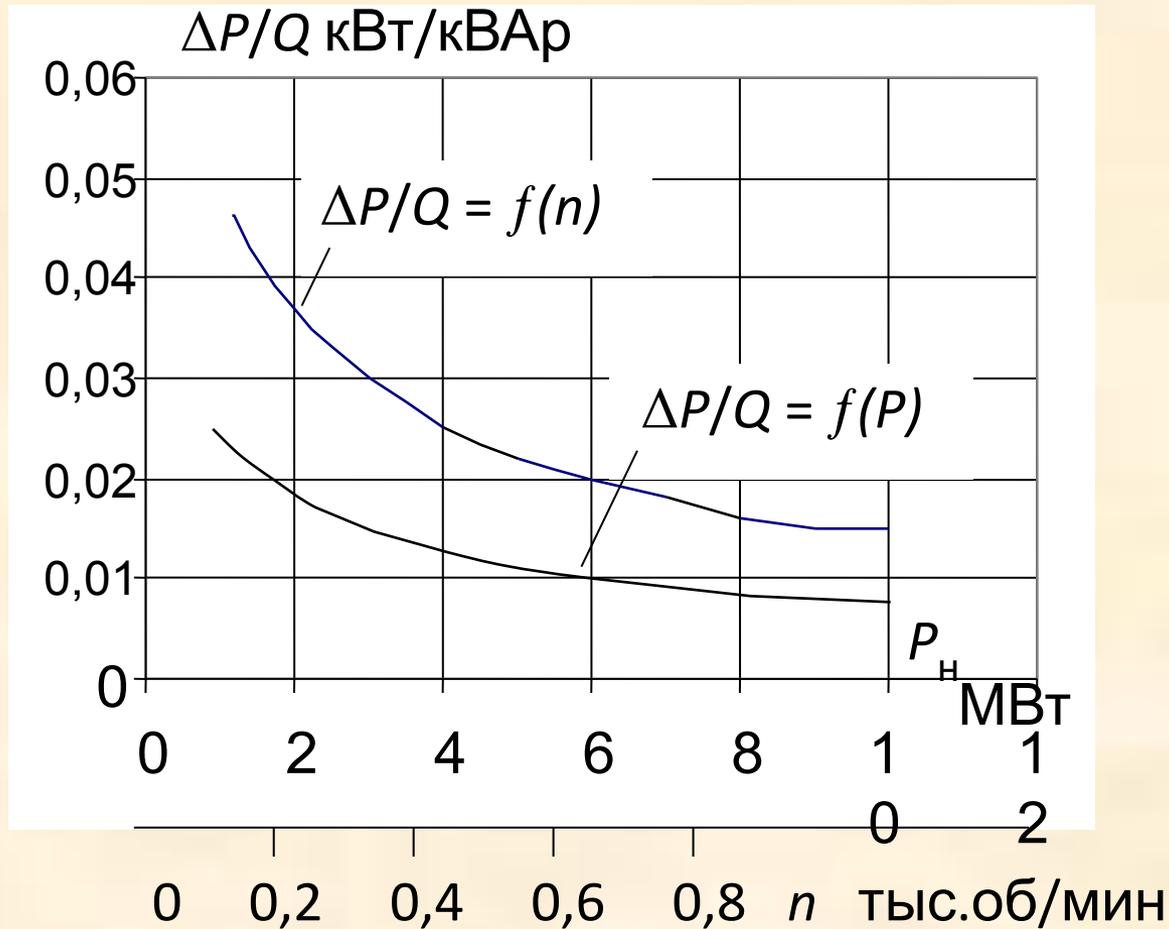
### Недостатки синхронных компенсаторов:

- Относительная дороговизна
- Сложность эксплуатации
- Шум

Потери активной мощности в данном источнике реактивной мощности довольно значительны и достигают 0,011-0,03 кВт/кВАр

Затраты, связанные с установкой и эксплуатацией синхронных компенсаторов в узлах электропотребления, целесообразны, если их мощность составляет 0,2-0,3 полной мощности линии передачи

# Потери электроэнергии в компенсирующих и преобразующих устройствах



Зависимость потерь в синхронных двигателях на выработку реактивной мощности от мощности  $P_n$  и частоты вращения  $n$

# Конденсаторы в качестве источника реактивной мощности

Конденсаторы в качестве источника реактивной мощности характеризуются:

- Малыми потерями активной мощности;
- Простотой эксплуатации;
- Простотой монтажа
- Удобством установки.

## Конденсаторы в качестве источника реактивной мощности

Основными достоинствами статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности являются:

- 1) незначительные потери активной мощности, лежащие в пределах 0,3-0,45 кВт на 100 кВАр;
- 2) отсутствие вращающихся частей и сравнительно малая масса установки с конденсаторами, а в связи с этим отсутствие необходимости в фундаменте;
- 3) более простая и дешевая эксплуатация, чем других компенсирующих устройств;
- 4) возможность увеличения или уменьшения установленной мощности в зависимости от потребности;
- 5) возможность установки статических конденсаторов в любой точке сети: у отдельных электроприемников, группами в цехах или крупными батареями.

## Конденсаторы в качестве источника реактивной мощности

- Мощность однофазного конденсатора определяют по формуле

$$Q_{\text{к}} = \omega \cdot U^2 \cdot C \cdot 10^{-3}$$

$\omega = 2\pi f$   
 $\omega$  – угловая частота, Гц;

$f$  – частота тока, Гц;

$U$  – линейное напряжение, кВ;

$C$  – емкость, мкФ

- Реактивная мощность батареи конденсаторов:
- при соединении звездой

Реактивная мощность батареи конденсаторов:

- при соединении звездой

$$Q_{\text{к}} = w \cdot U^2 \cdot C_{\text{ф}} \cdot 10^{-3}$$

где  $C_{\text{ф}}$  – емкость одной фазы, мкФ;

- при соединении треугольником

$$Q_{\text{к}} = 3 \cdot w \cdot U^2 \cdot C_{\text{ф}} \cdot 10^{-3}$$

Экономия электрической энергии при повышении коэффициента реактивной мощности от значения  $\cos\phi_1$  до  $\cos\phi_2$  оценивается по выражению:

$$\Delta \mathcal{E} = K \cdot A (\operatorname{tg}\phi_1 - \operatorname{tg}\phi_2),$$

где

$A$  – потребление активной энергии за расчетный период (кВт · ч);

$K$  - экономический эквивалент реактивной мощности, который ориентировочно может быть принят:

- при питании с шин генераторного напряжения – 0,02;
- при питании через одну ступень трансформатора – 0,05;
- при питании через две ступени трансформатора – 0,08
- при питании через три ступени трансформатора – 0,12.

Если известно количество реактивной энергии  $Q_1$  и  $Q_2$  (кВАр·ч) за расчетный период до повышения и после повышения  $\cos\phi$ , то экономия электроэнергии определяется выражением:

$$\mathcal{E} = K (Q_1 - Q_2), \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Недостатки конденсаторов:

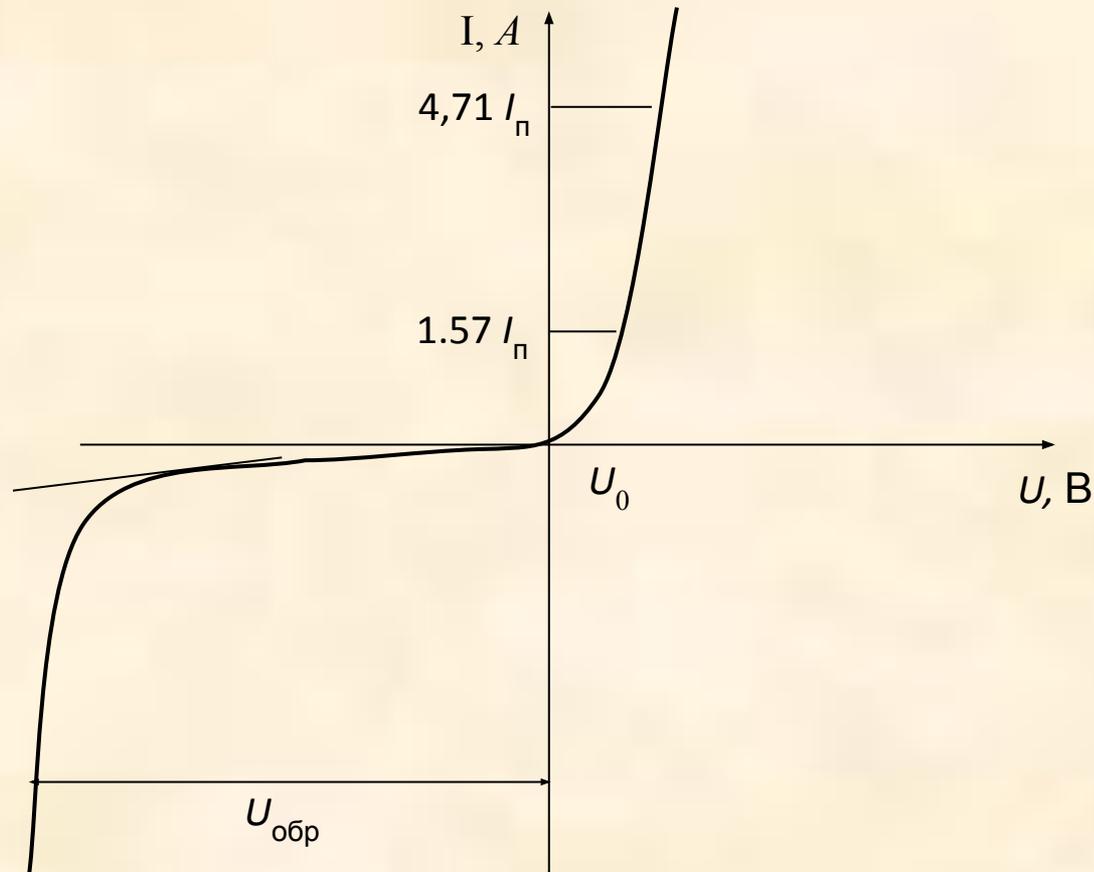
- зависимость генерируемой реактивной мощности от напряжения,
- чувствительность к искажениям напряжения
- недостаточная прочность при коротких замыканиях и перенапряжениях

# **Потери в статических преобразователях параметров электроэнергии**

Энергоэффективность преобразования электроэнергии полупроводниковыми преобразователями определяется:

- потери мощности и энергии собственно в элементах устройства – вентилях, конденсаторах, реакторах.
- потери от высших гармонических составляющих тока и напряжения, сопровождающих процесс энергопреобразования.

Потери мощности на основных элементах преобразователя - полупроводниковых вентилях определяются их вольт-амперными характеристиками (ВАХ).



Обычно для упрощения расчетов используют кусочно-линейную аппроксимацию реальной ВАХ. Для этого прямой участок характеристики, соответствующий проводящему состоянию вентиля, представляется отрезком прямой, выходящим из точки  $U_0$  с наклоном, определяемым динамическим сопротивлением  $R_d$ .

Графически построение линейной аппроксимации прямой ветви ВАХ осуществляется по точкам на реальной характеристике, соответствующим  $1,57I_n$  и  $4,71I_n$ , где  $I_n$  – предельный ток вентиля. Обратная ветвь характеристики аппроксимируется отрезком, выходящим из начала координат с наклоном

$$R_{\text{обр}} = \frac{dU_{\text{обр}}}{dI_{\text{обр}}}$$

Мощность потерь, выделяющаяся в полупроводниковой структуре прибора, при прохождении по нему тока можно представить в виде суммы основных  $\Delta P$  и дополнительных потерь  $\Delta P_{\text{доп}}$ :

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P + \Delta P_{\text{доп}}$$

При работе приборов на частоте, меньшей 400 Гц, мощность основных потерь является определяющей и дополнительными потерями пренебрегают. При больших частотах необходимо учитывать дополнительные потери, возникающие от обратного тока и от токов при включении и выключении прибора.

Мощность основных потерь определяется интегральными значениями прямого тока, протекающего через вентиль:

$$\Delta P = U_0 I_{\text{ср}} + I_{\text{д}}^2 R_{\text{д}'}$$

где  $I_{\text{ср}}$ ,  $I_{\text{д}}$  – среднее и действующее значение токов вентиля.

Для упрощения расчетов используется коэффициент формы  $k_{\text{ф}} = I_{\text{д}} / I_{\text{ср}}$ , который для известной формы тока вентиля позволяет легко определить действующее значение тока по известному среднему.

Величина суммарных потерь электроэнергии в вентилях преобразовательного устройства равна

$$\Delta P_{\text{пр}} = \Delta P \cdot N,$$

где  $N$  - количество вентиляей.

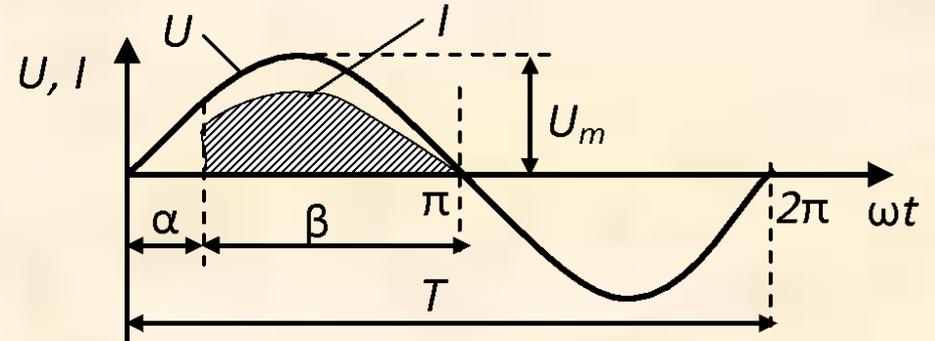
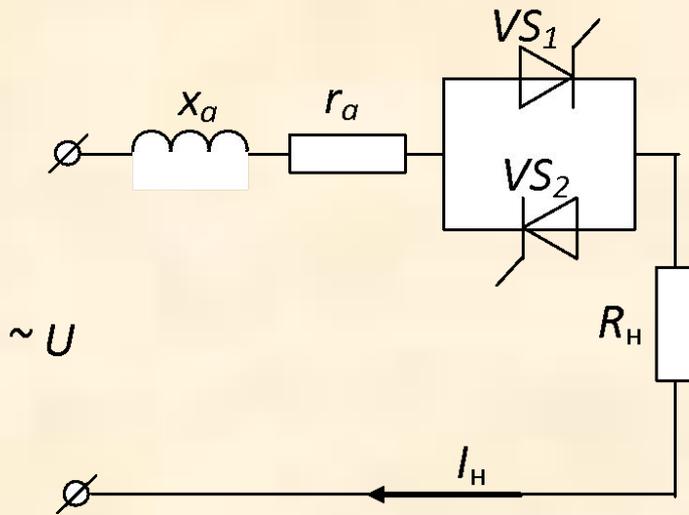
## Потери в статических преобразователях параметров электроэнергии

Вторая составляющая потерь, связанная собственно с процессом преобразования, зависит от схемы вентильного преобразователя, режимы ее работы, типа электрических нагрузок и других факторов.

Рассмотрим наиболее распространенную схему вентильного регулятора в сети переменного тока: симметричную биполярную тиристорную ячейку.

В сети переменного тока преобразователи обычно выполняются либо однофазными, либо трехфазными трех- или четырехпроводными. Типичным характером нагрузок является активная или активно-индуктивная нагрузка с заданным коэффициентом мощности.

## Однофазный регулятор переменного тока



При фазовом управлении на тиристор подается управляющий импульс, сдвинутый относительно проводящего полупериода напряжения сети на угол  $\alpha$ . Запирание тиристора при принятых условиях происходит естественным образом в конце полупериода. В первом приближении можно пренебречь параметрами трансформатора  $x_a, r_a$ , что дает возможность учитывать только вынужденные составляющие в кривой тока.

Для идеальных тиристорных временная диаграмма работы схемы показана на рисунке (предыдущий слайд).

Среднее значение напряжения на нагрузке  $R_H$  за половину периода в зависимости от  $\alpha$  равно:

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha}^{\pi} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

где  $\omega = 2\pi f$  круговая частота переменного тока питающей сети.

На нагрузке активного характера форма тока повторяет форму напряжения, поэтому:

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_m}{\pi R_H} (1 + \cos \alpha)$$

Потери в статических преобразователях параметров электроэнергии

Действующее значение напряжения на нагрузке равно:

$$U_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} (U_m \sin \omega t)^2 dt + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (U_m \sin \omega t)^2 dt \right]} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

Действующее значение тока нагрузки определяется выражением:

$$I_{\text{д}} = \frac{U_m}{R_{\text{н}} \sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

Таким образом, при фазовом управлении, интегральные значения тока и напряжения нагрузки тиристорного регулятора являются функциями угла управления  $\alpha$ . Ток и напряжение нагрузки существенно несинусоидальны.

Это обстоятельство оказывает влияние на процессы преобразования регулируемой электроэнергии. Использование тиристорных регуляторов для питания устройств электронагрева позволяет преобразовывать в тепло электрический ток любой формы.

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется как

$$P_{\text{н}} = I_{\text{д}}^2 R_{\text{н}}.$$

Двигательная нагрузка критична к искажениям формы питающего напряжения, поскольку процесс электромеханического преобразования осуществляется на основной гармонике. Высшие гармоники являются источником дополнительных потерь в двигателе.

Таким образом, эффективность электромеханического преобразования, при несинусоидальности тока, ниже термоэлектрического.

Потери в статических преобразователях параметров электроэнергии

Распространенным способом уменьшения влияния выпрямительной нагрузки на качество напряжения питающей сети являются фильтро-компенсирующие устройства.

Энергоэффективность преобразователей частоты в большей степени определяется всем процессом энергообразования, включая управляемый двигатель или другую технологическую установку. Потери электроэнергии собственно на элементах вентильного преобразователя частоты сопоставимы с потерями при выпрямлении переменного тока. В наиболее распространенных преобразователях выпрямительно-инверторного типа выпрямитель является первой ступенью энергопреобразования, инвертор (силовая схема которого часто аналогична выпрямителю) представляет вторую ступень преобразования.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССАХ**

эффективность преобразования электроэнергии в технологических процессах

Процессы преобразования электроэнергии в другие виды энергии, а также преобразование напряжений и токов по частоте, количеству фаз сопровождаются неизбежными потерями.

Можно выделить основные группы технологических процессов преобразования электроэнергии:

- преобразовательные установки, преобразующие переменный ток в постоянный, а также изменяющие частоту переменного тока и количество фаз;

- электромеханические преобразователи или двигатели;

- электроосветительные установки;

- электротехнологические установки для сварки, электротермии, электролиза и др.

# **Электромеханическое преобразование энергии**

Электродвигатели на промышленных предприятиях являются наиболее массовыми электроприемниками. По некоторым данным на нужды электропривода расходуется до 60% всей электроэнергии. При этом основная масса электромеханических преобразователей энергии строится на базе асинхронных двигателей.

Двигатель с определенными номинальными данными в процессе эксплуатации может нагружаться различным образом. Соответственно энергетические характеристики двигателя изменяются. Эффективность преобразования энергии в двигателе полностью характеризуется его коэффициентом полезного действия и коэффициентом мощности.

Коэффициент полезного действия определяется по активной мощности как

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_n},$$

где

$P_2$  - отдаваемая мощность,

$\sum P_n$  - сумма всех потерь.

Потери в электрических машинах состоят из

- потерь на трение вращающихся частей - **механические потери**
- потерь энергии при протекании токов по проводникам обмоток - **электрические потери**
- потерь при периодическом изменении потоков в магнитопроводах - **магнитные потери.**

Коэффициент мощности показывает, какая часть подведенной энергии идет на процесс преобразования.

Реактивная мощность, расходуемая на намагничивание двигателя, должна рассматриваться как источник добавочных потерь, увеличивающих нагрузку сети и соответственно потери в ней.

Для всех электродвигателей, вращающихся с постоянной скоростью и при неизменном напряжении, потери могут быть разделены на две группы:

- потери холостого хода  $P_x = \text{const}$
- нагрузочные потери  $P_n$ , которые приблизительно пропорциональны квадрату нагрузки

$$\beta^2 = \left( \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{\text{ном}}} \right)^2$$

где  $P_{\text{ном}}$  - номинальная мощность машины,  
 $P_{\text{нагр}}$  - фактическая мощность нагрузки.

коэффициент полезного действия при частичной нагрузке

$$\eta = \frac{\beta}{\beta + q \frac{1 + \epsilon^2 \beta^2}{1 + \epsilon}}$$

Обычно величина  $q$  известна из паспортных данных двигателя. Величина  $\epsilon$  зависит от мощности и конструктивного исполнения машины.

Для многополюсных асинхронных электродвигателей мощностью 100-500 кВт величина  $\epsilon = 1,1-1,4$ , для двухполюсных - от 0,8 до 1,1. Двигатели закрытого исполнения с внешним охлаждением мощностью 50-200 кВт имеют значение  $\epsilon = 0,6-0,8$ .

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  также изменяется с нагрузкой двигателя.

Общее выражение для определения коэффициента мощности

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}},$$

где  $P_1$  - активная мощность, потребляемая из сети,  $Q_1$  - реактивная мощность.

# Электромеханическое преобразование энергии

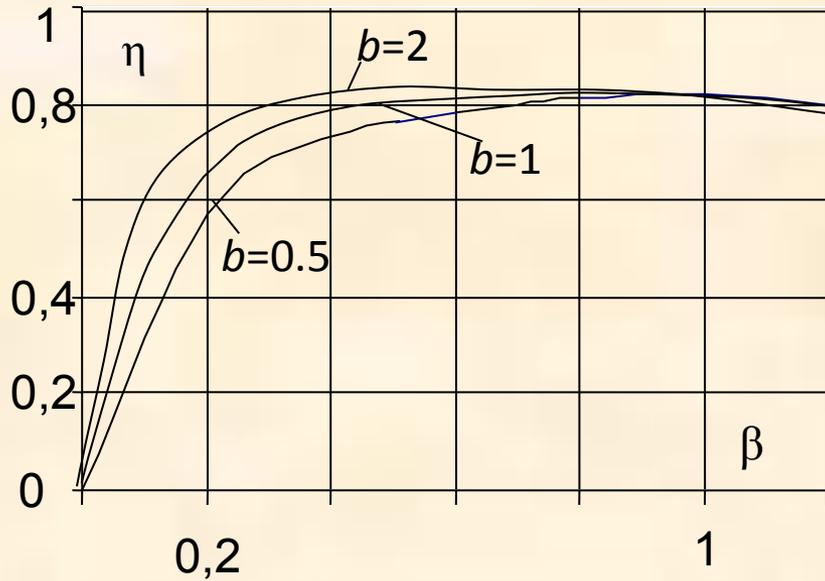


Рис.13. Зависимость коэффициента полезного действия от относительной нагрузки для различных значений  $\beta$

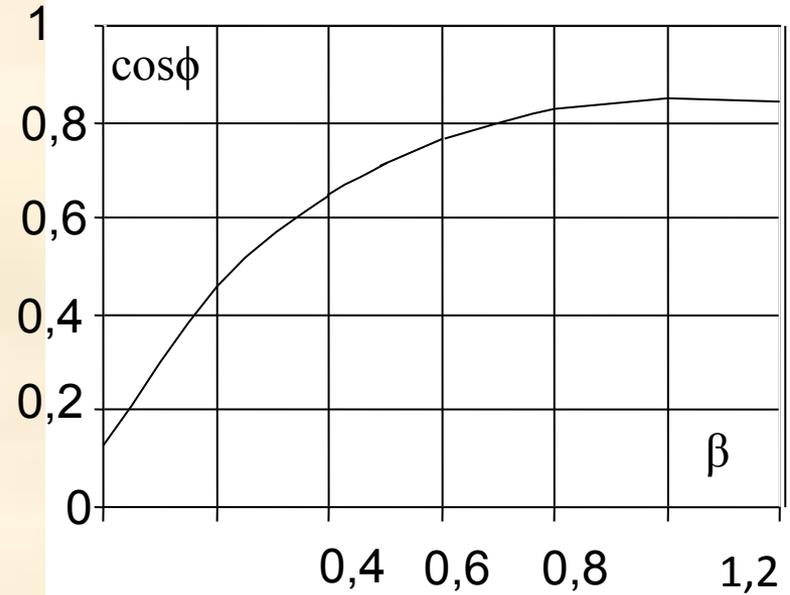


Рис.14. Зависимость  $\cos\phi$  асинхронного двигателя от  $\beta$

Обычно регулирование величины тока возбуждения синхронных двигателей осуществляется автоматически, обеспечивая заданные рабочие характеристики машины.

Таким образом, можно рекомендовать замену асинхронного двигателя на менее мощный, если его загрузка меньше 45% номинальной.

При загрузке двигателя более чем на 70% замена двигателя не целесообразна.

В диапазоне загрузок от 45% до 70% решение о замене может быть принято на основании технико-экономических расчетов, учитывающих затраты по замене двигателя.

Значительным потенциалом энергосбережения обладают электроприводы, регулируемые в соответствии с обеспечиваемым технологическим процессом. Наиболее эффективным способом регулирования частоты вращения асинхронного двигателя является изменение частоты питающего напряжения, т.е. частотное регулирование.

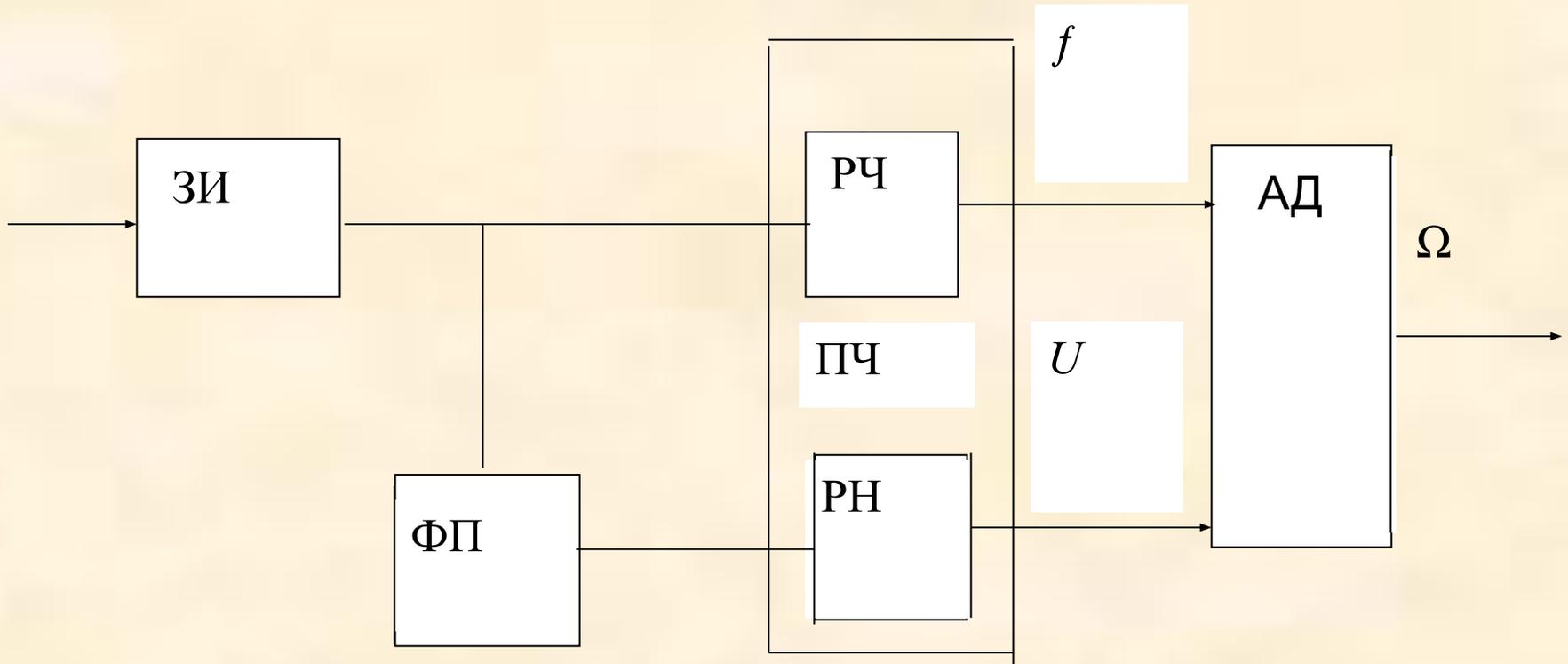
Частотно-регулируемые электроприводы могут строиться как разомкнутые или как замкнутые системы автоматического управления двигателем.

Разомкнутые системы частотного управления строятся в соответствии со структурной схемой.

Характерной особенностью этих схем является жесткая зависимость между регуляторами частоты  $PЧ$  и напряжения  $PH$ , обеспечиваемая с помощью функционального преобразователя  $ФП$ .

Зависимость между величиной  $U$  и частотой  $f$  напряжения двигателя должна соответствовать реализуемому закону частотного регулирования асинхронного двигателя АД.

# Электромеханическое преобразование энергии



Структурная схема разомкнутой системы  
частотного управления

Основополагающим законом регулирования напряжения в зависимости от частоты является закон М.П. Костенко:

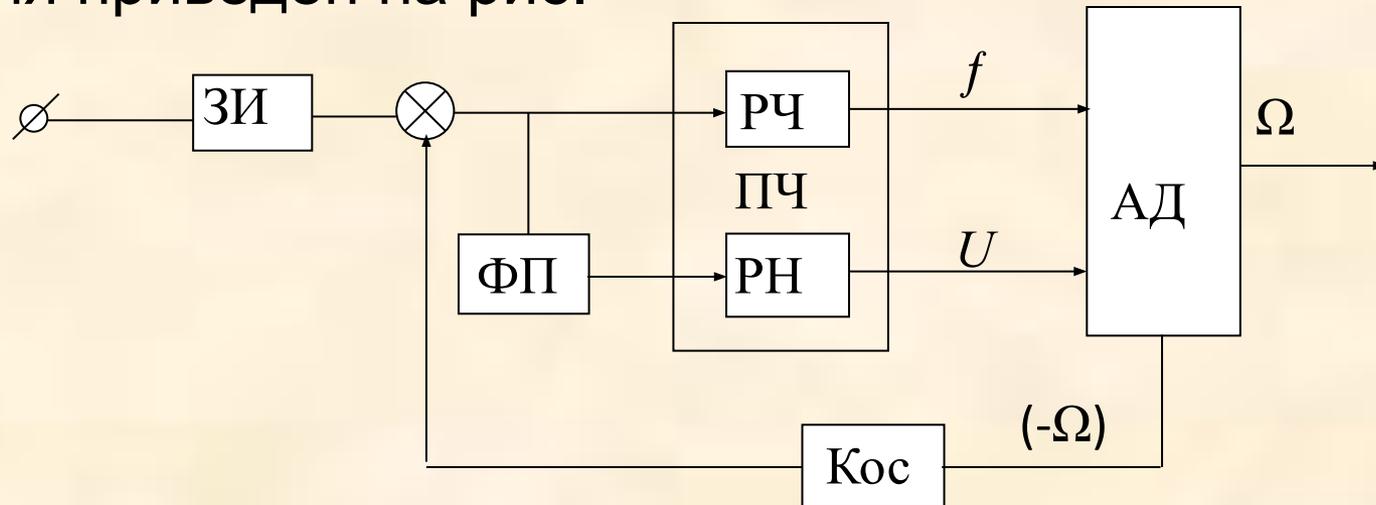
$$\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{M}{M_{\text{НОМ}}}}.$$

Практическое применение основного закона ограничивает сложность измерения момента на валу двигателя. Для известных характеристик момента нагрузок от частоты вращения реализация закона частотного регулирования упрощается. В частности, для постоянного значения момента  $M = M_c = \text{const}$

$$\frac{f}{f_{\text{НОМ}}} = \frac{U}{U_{\text{НОМ}}}.$$

Разомкнутые системы с управляющими факторами – напряжение и частота – удовлетворяют требованиям приводов в ограниченном диапазоне изменения частот до (3-5) : 1

Более распространены системы частотного управления замкнутого типа с обратными связями по скорости, току, моменту нагрузки и т.д. Пример структурной схемы частотного управления со стабилизацией скорости двигателя приведен на рис.



Основной и наиболее сложной частью электропривода является вентильный преобразователь частоты ПЧ.

Преобразователь одновременно должен выполнять две функции:

- энергетическая функция питания двигателя напряжением требуемой величины частоты
- информационная – управление рабочей машиной или ее элементами.

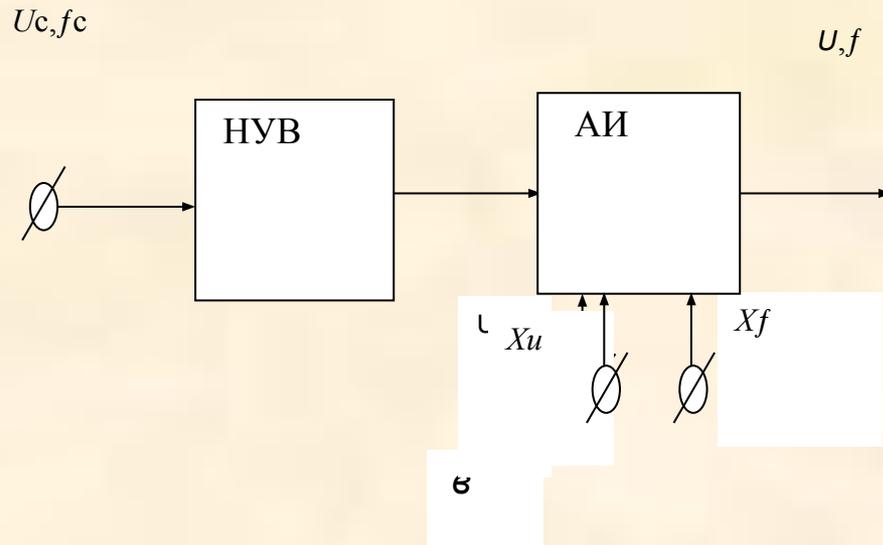
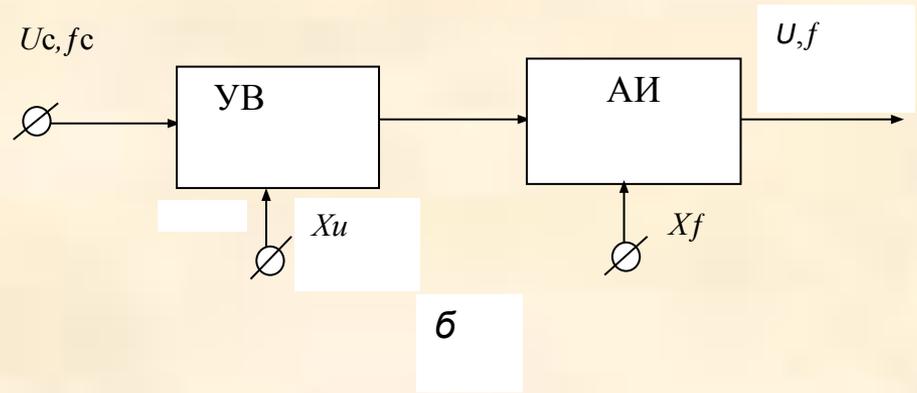
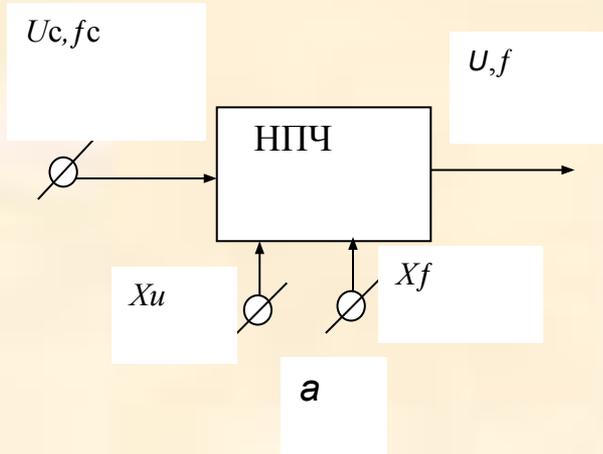
Преобразователи частоты в электроприводах обычно строятся по двум принципам: непосредственного преобразования периодического напряжения  $U_c$  частоты сети  $f_c$  в выходное напряжение  $U$  управляемой частоты  $f$  (НПЧ на рис.а) и преобразователи со звеном постоянного тока, в которых сетевое напряжение сначала выпрямляется, а затем инвертируется (рис.б,в).

Большее распространение имеют преобразователи выпрямительно-инверторного типа.

Регулирование частоты выходного напряжения таких преобразователей осуществляется с помощью автономного инвертора АИ. Величина выходного напряжения  $U$  может регулироваться двумя способами:

- с помощью управляемого выпрямителя УВ,
- с помощью автономного инвертора.

# Электромеханическое преобразование энергии



Функциональные схемы преобразователей частоты:

*а* – НПЧ; *б* – УВ-АИ; *в* – НУВ-АИ

Выпрямитель в последнем случае выполняется неуправляемым – НУВ. С позиций энергетических характеристик процесса выпрямления переменного тока неуправляемый выпрямитель обеспечивает более высокий коэффициент мощности преобразователя, меньшие пульсации выпрямленного напряжения и лучшее использование мощности питающего трансформатора. Поэтому распространенным вариантом преобразователя для частотного управления электроприводом является схема с управлением величиной и частотой выходного напряжения с помощью инвертора. Основным способом регулирования напряжения является широтно-импульсная модуляция ШИМ, которая, кроме того, позволяет улучшить гармонический состав выходного напряжения преобразователя.

Автономные инверторы принципиально строятся как инверторы тока или как инверторы напряжения.

Автономные инверторы напряжения более универсальны в широком диапазоне изменения частоты выходного напряжения и пригодны для регулирования как индивидуальных, так и многодвигательных приводов.

Форма выходного напряжения преобразователя частоты влияет на энергетические характеристики двигателя. Меньшее влияние несинусоидальности питающего напряжения соответствует кривой напряжения, содержащей только нечетные гармоники, кроме третьей и кратных ей. В частности, при питании асинхронного двигателя от инвертора напряжения (простейшей схемы на полностью управляемых элементах-транзисторах), максимальный момент двигателя уменьшается на 1-2%

Ток статора, при номинальной нагрузке двигателя, возрастает приблизительно на 1-2% для инвертора напряжения и на 2-4% для инвертора тока, чему соответствует увеличение потерь в меди соответственно на 2-4 и 4-8%.

За счет эффекта вытеснения тока и увеличения активного сопротивления величина потерь в меди может увеличиться по сравнению с указанными цифрами еще в 1,5-3 раза. Потери в стали двигателя увеличиваются не более чем на 2-3%.

В результате КПД двигателя снижается на 1-2% для инвертора напряжения и на 2-3% для инвертора тока.

Современные преобразователи частоты с хорошей формой кривой выходного напряжения позволяют пренебрегать дополнительными потерями в регулируемый двигатель.

Современные преобразователи частоты обеспечивают качество регулирования скорости асинхронных двигателей, не уступающее приводам постоянного тока.

Хорошо известные преимущества асинхронного короткозамкнутого двигателя, такие как высокая надежность, меньшая стоимость, простота изготовления и эксплуатации в сочетании с обеспечиваемыми в настоящее время высокими регулировочными и динамическими показателями превращают асинхронный частотно-регулируемый электропривод в доминирующий тип регулируемого электропривода, массовое применение которого позволяет решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения.

Как правило, во многих отраслях народного хозяйства, в т.ч. ЖКХ установлены электродвигатели с большим запасом по мощности в расчете на максимальную производительность оборудования, несмотря на то, что часы пиковой нагрузки составляют всего 15%-20% общего времени его работы. В результате электродвигатели с постоянной скоростью вращения потребляют среднесуточно значительно, иногда до 60%, больше электроэнергии, чем это необходимо.

Отсюда следует, что основные резервы сбережения электрической энергии заключены в широкомасштабном применении энергосберегающих электроприводов.

Наиболее радикальным, дающим большую экономию электроэнергии способом (до 30%-50%) является оснащение электродвигателей частотными преобразователями, позволяющими регулировать частоту их вращения в зависимости от реальной нагрузки.

Области применения регулируемого электропривода весьма обширны.

В жилищно-коммунальном хозяйстве и коммерческом секторе это:

- насосы холодной и горячей воды в центральных тепловых пунктах;
- насосные установки водоканальных и тепловых сетей;
- насосные установки очистных станций;
- компрессоры, вентиляторы, кондиционеры, установленные в зданиях.

В топливно-энергетическом комплексе:

- буровые установки, насосы нефтеперекачки и компрессоры газоперекачки;
- экскаваторы, электротрансмиссии мощных карьерных самосвалов, карьерные дизель-троллейвозы, транспортеры и конвейеры, дробилки и мельницы, шахтные подъемные машины и шахтный электротранспорт.
- насосные и вентиляторные установки ТЭС, ТЭЦ, РТС и котельных, насосные установки тепловых сетей и др.

В промышленности и сельском хозяйстве это:

- перемешивающие устройства, центрифуги, насосы, компрессоры, вентиляторы;
- электроприводы обрабатывающих станков, электротранспортеры и конвейеры, печи, мельницы и др.

## Электромеханическое преобразование энергии

В целом электродвигатели мощностью от 1,0 до 100 кВт составляют ~90% и потребляют 90% электроэнергии, преобразуемой в механическую.

Наиболее массовый асинхронный электропривод по количеству потребляемой электроэнергии находится в диапазоне мощностей 1-20 кВт, а среди исполнительных механизмов самыми распространенными являются вентиляторы, транспортеры и насосы, составляющие более половины общего количества механизмов.

Учитывая, что эти типы механизмов составляют более 50% от общего количества используемых электроприводов, данное направление является приоритетным для внедрения.

## Электромеханическое преобразование энергии

Другое важное достоинство регулируемого электропривода – это снижение эксплуатационных затрат, которое имеет несколько составляющих:

- снижения величины пусковых токов электродвигателей до уровня номинальных и, соответственно, исключения вредного воздействия этих токов на питающую сеть;
- практического исключения из работы дросселей, заслонок, различного рода клапанов;
- исключения гидроударов в гидравлической сети, плавное изменение подачи воздуха в вентиляторах и др., т. е. исключение или существенное снижение динамических воздействий на технологическое оборудование и сети;
- продления срока службы подшипников и др. вращающихся частей, поскольку механизмы, снабженные преобразователями частоты в течение длительного времени работают с частотами вращения меньшими номинальных. В результате значительно снижаются эксплуатационные расходы и уменьшаются возможности аварийности всего оборудования в целом.

Третьим важным достоинством применения регулируемого электропривода является экономия воды и тепла при использовании его в насосных установках.

Так в жилищно-коммунальном хозяйстве применение преобразователей частоты в повысительных насосах горячей и холодной воды позволяет экономить до 10%-15% воды и до 8%-10% тепла.

# **Потери электроэнергии в осветительных установках**

## Потери электроэнергии в осветительных установках

Мощность осветительных установок на предприятиях характеризуется плотностью нагрузки порядка 10-100 Вт/м<sup>2</sup> и выше, в зависимости от требований производства.

Распространенными источниками света, используемыми в осветительных установках, в настоящее время являются лампы накаливания (ЛН) и люминесцентные лампы. Весьма перспективными и быстро распространяющимися являются светодиодные лампы.

Характерными особенностями ламп накаливания являются простота схемы включения, нечувствительность к изменениям условий внешней среды, коэффициент мощности, практически равный единице. Световая отдача ЛН основной серии лежит в пределах 7-19 лм/Вт. Срок службы данного типа ламп не превышает 1000 часов. Невысокая световая отдача и сравнительно небольшой срок службы ограничивают применение ламп накаливания в производственных помещениях.

**Люминесцентная лампа** — газоразрядный источник света, в котором видимый свет излучается в основном люминофором, который в свою очередь светится под воздействием ультрафиолетового излучения разряда; сам разряд тоже излучает видимый свет, но в значительно меньшей степени.

Световая отдача люминесцентной лампы в несколько раз больше, чем у ламп накаливания аналогичной мощности. Срок службы люминесцентных ламп может в 20 раз превышать срок службы ламп накаливания при условии обеспечения достаточного качества электропитания, балласта и соблюдения ограничений по числу включений и выключений

Наиболее распространены газоразрядные лампы:

- люминесцентные ртутные низкого давления (ЛЛ),
- ртутные лампы высокого давления (ДРЛ, ДРИ),
- натриевые лампы высокого давления (ДНаТ, дуговые ксеноновые трубчатые лампы (ДКсТ),
- комплексные люминисцентные лампы (КЛЛ).

Люминесцентные лампы наиболее целесообразно применять для общего освещения, прежде всего помещений большой площади, позволяющими улучшить условия освещения, снизить потребление энергии на 50-83% и увеличить срок службы ламп. Люминесцентные лампы широко применяются также и в местном освещении рабочих мест, в световой рекламе, подсветке фасадов. Они нашли применение в подсветке жидкокристаллических экранов. Плазменные дисплеи также являются разновидностью люминесцентной лампы.

## **Достоинствами современных КЛЛ являются:**

- Высокая светоотдача (световой КПД): при равной потребляемой из сети мощности световой поток КЛЛ в 4-6 раз выше, чем у лампы накаливания, что даёт экономию электроэнергии 75-85 %;
- В отличие от лампы накаливания, КЛЛ не является точечным источником, а излучает свет всей поверхностью колбы;
- Длительный срок службы в непрерывном цикле эксплуатации (без частого включения/выключения);
- Возможность создания ламп с различными значениями цветовой температуры, а также ламп различных цветов и мягкого ультрафиолета с высоким КПД;
- Нагрев корпуса и колбы значительно ниже, чем у лампы накаливания.
- В отличие от традиционных «ламп дневного света» с электромагнитным трансформатором, трубка которых питается переменным напряжением с частотой питающей сети, КЛЛ не производит стробоскопический эффект на вращающихся деталях оборудования и в иных тому подобных ситуациях.

## **Недостатками газоразрядных ламп являются:**

- необходимость в пуско-регулирующей аппаратуре, в состав которой должны входить компенсирующие конденсаторы для повышения коэффициента мощности до 0,9-0,95; существенные пульсации светового потока; длительный, до 5-7 минут, процесс разгорания лампы. Кроме того, лампы КЛЛ не полностью совместимы с существующей системой освещения. КЛЛ не рассчитаны на частые включения. Интервал между включениями, устанавливаемый гарантийными условиями для достижения положенной наработки, может быть больше двух минут (это связано с работой простых схем предпускового разогрева). При этом правильно сконструированная лампа зажигается не мгновенно, а спустя примерно 0,5-1с после подачи напряжения, что создаёт дополнительный дискомфорт. Лампа же, включающаяся мгновенно, без предварительного прогрева катодов, теряет при каждом включении значительную часть срока службы. Всё это препятствует применению КЛЛ в различных автоматических схемах с датчиками движения, гирляндах, световой сигнализации, в санузлах и т. п.

## **Недостатками газоразрядных ламп являются:**

- Использование широко распространённых выключателей с подсветкой приводит к периодическому, раз в несколько секунд, кратковременному зажиганию ламп, что, хоть и не приводит к выходу из строя лампы, может создавать некоторый дискомфорт ночью. Об этом недостатке, за редким исключением, производители обычно не сообщают в инструкциях по эксплуатации. Исключение составляют лампы оснащённые устройством «мягкого пуска» в них данный неприятный эффект отсутствует.
- Компактные люминесцентные лампы несовместимы с диммерами обычных типов (включаемых последовательно с лампой). Диммеры для таких ламп существуют, но требуют особого подключения с прокладкой дополнительных проводов.

## **Недостатками газоразрядных ламп являются:**

- Зажигание бытовых КЛЛ не гарантировано при отрицательных температурах и понижении напряжения питания более чем на 10 %. Повышенная влажность и выпадение конденсата приводят к пробоям в схеме электронного трансформатора, где в момент зажигания действуют напряжения порядка 1000 вольт. При работе в закрытой арматуре или при повышенной температуре окружающей среды перегрев колбы приводит к «покраснению» спектра лампы и значительному уменьшению светоотдачи, а при дальнейшем увеличении температуры выходит из строя электронный трансформатор. Всё это делает применение КЛЛ во влажных и неотапливаемых помещениях и на открытом воздухе (в том числе в герметичных светильниках), а также в ряде ответственных применений нецелесообразным.

## **Недостатками газоразрядных ламп являются:**

- Коэффициент мощности большинства КЛЛ 0,6–0,85, хотя у ламп с хорошим ЭАПР может достигать 0,96. Во многих лампах бросок пускового тока ничем не ограничен и может привести к импульсным помехам по сети. Также большинство продаваемых КЛЛ не имеют электромагнитных фильтров и экранов, защищающих от наводок окружающую радиоаппаратуру.
- Совместное воздействие повышенной температуры внутри компактной конструкции и перенапряжений в сети (импульсных или продолжительных) снижает надёжность работы электронных компонентов трансформатора КЛЛ. В отношении термического режима предпочтительнее лампы с вынесенным трансформатором, позволяющим лучше организовать охлаждение и применять более мощные компоненты с большим запасом по параметрам.

## **Экологические аспекты, снижающие достоинства КЛЛ:**

- В колбе КЛЛ содержится свободная ртуть, что даже при налаженной системе утилизации отслуживших ламп представляет опасность при повреждении такой лампы в быту. Однако в современных амальгамированных лампах количество ртути снижено уже до 5-7 мг на лампу средней мощности, и, по утверждениям производителей, специальная демеркуризация помещения в таком случае не требуется.

## **Экологические аспекты, снижающие достоинства КЛЛ:**

- КЛЛ технологически представляет собой сочетание обычной стеклянно-вольфрамовой лампы накаливания сложной конфигурации (колба), специфических для ЛДС химических компонентов (ртуть, люминофоры, покрытия катодов) и схемы полупроводникового высокочастотного преобразователя (трансформатор), совокупные экологические издержки производства которых (добыча редких элементов, изготовление электронных схем, затраты энергии в производстве и т.п.) значительны и должны быть тщательно просчитаны, чтобы не перекрыть выгоды от перехода на КЛЛ с традиционных ламп накаливания. Тем более что требования к качеству света (и сложности состава люминофора), к надёжности (и сложности) трансформатора непрерывно растут, вынуждая производителей дополнительно усложнять технологию.

**Светодиодные лампы** или светодиодные светильники в качестве источника света используют светодиоды, применяются для светодиодного освещения.

**Светодиодный светильник** - самостоятельное устройство. Корпус светильника может быть как уникальным, так и соответствовать светильникам с существующими лампами (люминесцентными, накаливания, галогенными). Конструктивно состоит из корпуса, светодиодов и электронного драйвера.

## **Преимущество светодиодного светильника:**

- низкое энергопотребление,
- долгий срок службы.
- простота установки.

## **Недостатки:**

- высокая цена.

# **Электротермическое преобразование энергии**

## **Электротермическое преобразование энергии :**

- печи сопротивления,
- дуговые печи, электросварка.

### **Печи сопротивления:**

Электротермическое преобразование энергии осуществляется за счет выделения тепла при прохождении тока через электронагревательный элемент.

### **Дуговые печи:**

Электротермическое преобразование энергии осуществляется за счет выделения тепла при создании электрической дуги .

## Электротермическое преобразование энергии

Расход электроэнергии в печах сопротивления включает покрытие тепловых потерь через стенки печи, под, крышку и т. д.

$$\mathcal{E} = a_0 \tau + a_1 g + a_2,$$

где  $a_0$  – среднечасовой расход энергии на покрытие суммарных потерь тепла;

$\tau$  – продолжительность термообработки;

$a_1$  – полезный расход электроэнергии на нагрев материала;

$a_2$  – расход электроэнергии на нагрев тары.

## Электротермическое преобразование энергии

Повышение энергоэффективности печей сопротивления достигается в основном снижением тепловых потерь и оптимизацией технологических режимов. Эти же рекомендации могут быть приняты и для повышения энергоэффективности дуговых печей.

Электротермические установки являются мощными потребителями электроэнергии. Это определяет целесообразность использования электропечных установок для регулирования суточного графика электрической нагрузки предприятия. Более равномерный график нагрузки приводит к сокращению потерь электроэнергии в системе электроснабжения и к уменьшению заявленного максимума нагрузки. Кроме того, создаются условия для улучшения качества электроэнергии. Таким образом, электротермические установки целесообразно использовать в качестве потребителей-регуляторов нагрузки системы электроснабжения.

**ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА  
РАБОТУ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

# **Показатели качества электроэнергии**

***Качество электрической энергии*** – совокупность характеристик электрической энергии, при которых электроприемники способны выполнять заложенные в них функции.

Качество электроэнергии может существенно влиять на расход электроэнергии, надежность систем электроснабжения, технологические производственные процессы.

Качество электроэнергии регламентируется ГОСТом 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

## Показатели качества электроэнергии

Показателями качества электроэнергии являются:

- установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ ;
- размах изменения напряжения  $\delta U_t$ ;
- доза фликера  $P_t$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_u$ ;
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{u(n)}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0u}$ ;
- отклонение частоты  $\Delta f$ ;
- длительность провала напряжения  $\Delta t_n$ ;
- импульсное напряжение  $U_{\text{имп}}$ ;
- коэффициент временного перенапряжения  $K_{\text{пер } u}$ .

Нормы качества  
электроэнергии

```
graph TD; A[Нормы качества электроэнергии] --> B[Нормально допустимые]; A --> C[Предельно допустимые];
```

Нормально  
допустимые

Предельно  
допустимые

Оценка соответствия показателей качества электроэнергии указанным нормам проводится в течение расчетного периода, равного 24 ч.

Общая продолжительность измерений качества электроэнергии, за исключением измерений провала напряжения, импульса напряжения и временного перенапряжения, должна выбираться с учетом обязательного включения характерных для измеряемых показателей рабочих и выходных дней. Рекомендуемая общая продолжительность измерений составляет 7 суток. Сопоставление показателей качества с нормами стандарта необходимо производить за каждые сутки периода измерений отдельно.

## ***Отклонение напряжения***

Нормально допустимые отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии равны  $\pm 5\%$ .

Предельно допустимые отклонения составляют  $\pm 10\%$ .

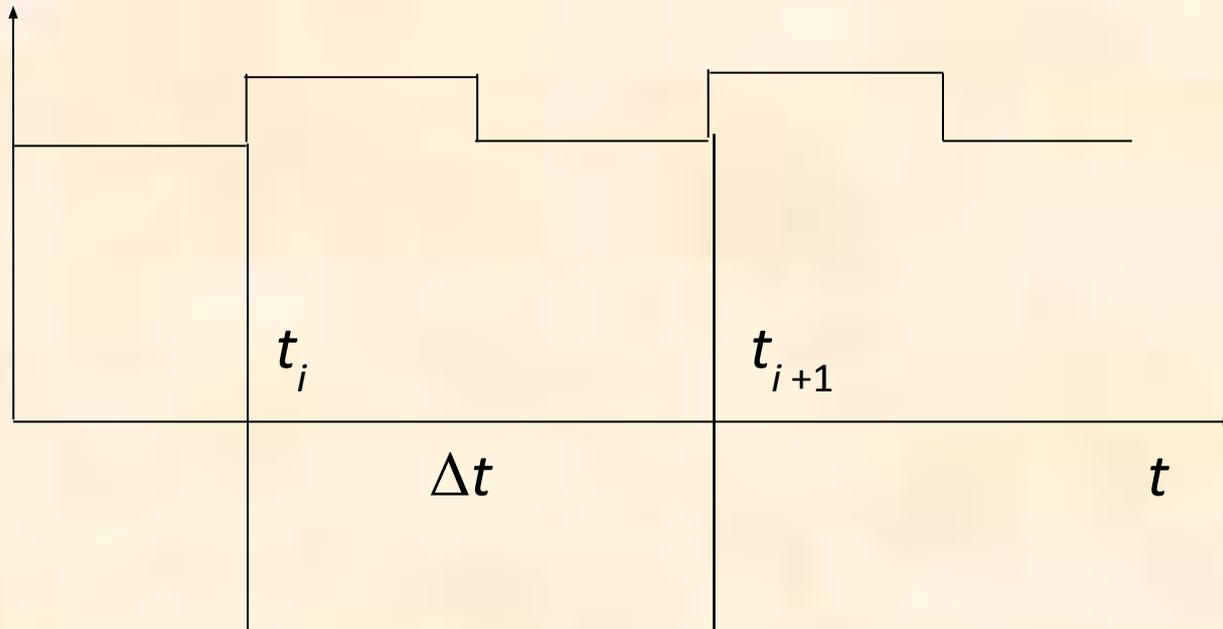
## ***Колебания напряжения***

Характеризуются следующими показателями:

- размах изменения напряжения;
- доза фликера.

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения  $\delta U_t$  в точках общего присоединения к электрическим сетям - при колебаниях напряжения, огибающая которых имеет форму меандра.

## Показатели качества электроэнергии



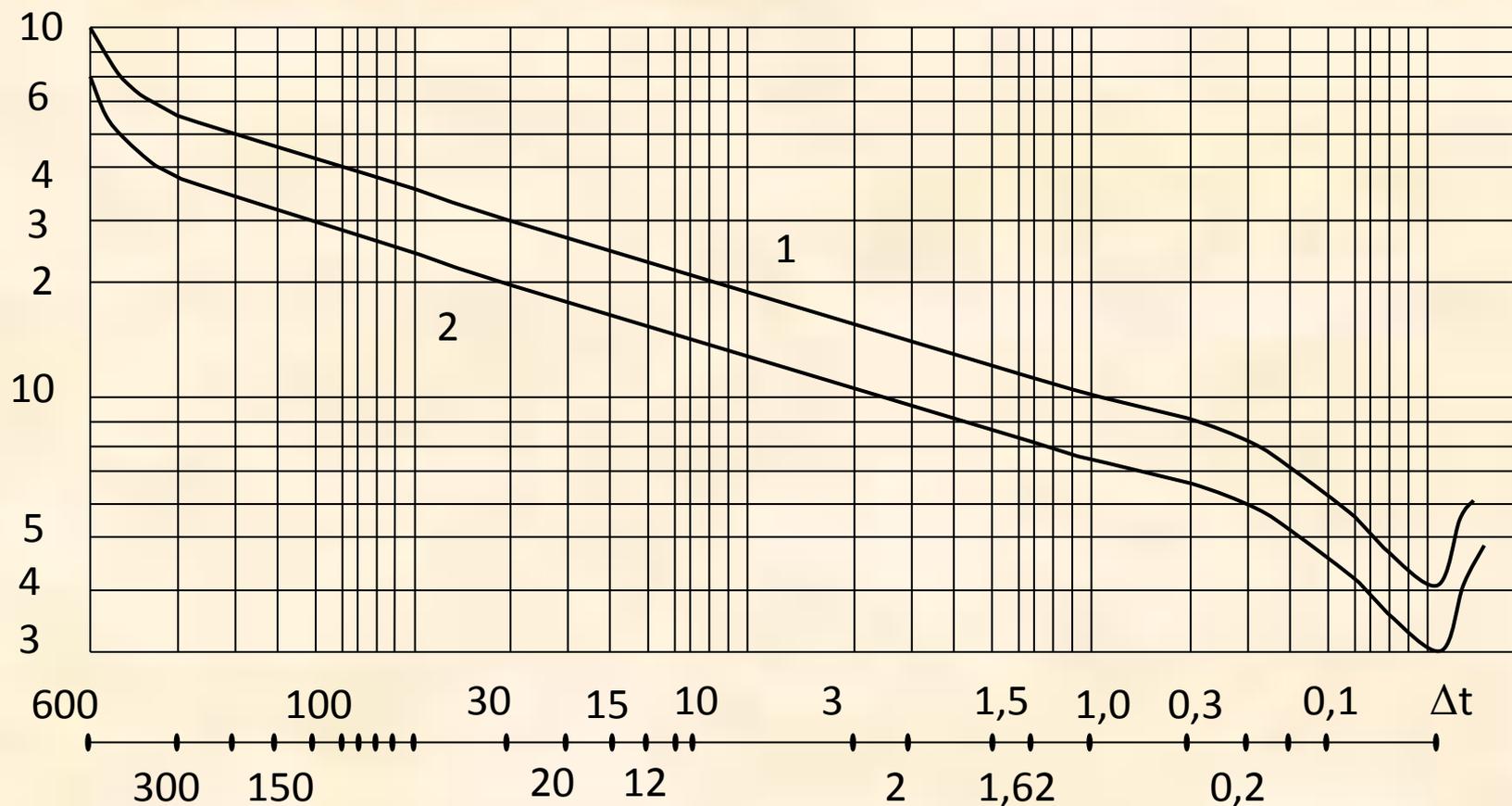
Интервал времени между измерениями напряжения вычисляют по формуле

$$\Delta t_{t+i} = t_{t+i} - t_i,$$

где  $t_i$ ,  $t_{t+i}$  - начальные моменты следующих один за другим изменений напряжения.

## Показатели качества электроэнергии

В зависимости от частоты повторений изменения напряжения  $F_{\text{мин-1}}$  или интервала между изменениями напряжения  $\Delta t_{\text{мин}}$ , равны значениям, определяемым по кривой 1. Для потребителей электроэнергии с лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, предельные значения  $\delta U_t$  определяются по кривой 2.



Предельно допустимое значение суммы установившегося отклонения напряжения  $\delta U_y$  и размаха изменений напряжения  $\delta U_t$  в точках присоединения к электрическим сетям 0,38 кВ равно  $\pm 10\%$  от номинального напряжения.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  при колебаниях напряжения равно 1,38, а для длительной дозы фликера  $P_{lt}$  при тех же колебаниях напряжение равно 1,0. Кратковременную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения 10 мин. Длительную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения, равном 2 часа.

**Фликер** – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока ламп, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей источник.

**Доза фликера** – мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени.

Предельно допустимые дозы фликера для потребителей с лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, равны 1,0 и 0,74 для кратковременной и длительной доз.

**Несинусоидальность напряжения** характеризуется следующими показателями:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент  $n$ -ной гармонической составляющей напряжения.
- Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется как отношение действующего значения гармонического содержания несинусоидального напряжения к напряжению основной частоты:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \approx \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%.$$

## Показатели качества электроэнергии

При подсчете КУ допускается не учитывать гармоники, величина которых менее 0,1%.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения в сетях с разными напряжениями приведены в таблице в процентах.

| Нормально допустимые значения<br>при $U_{\text{ном}}$ , кВ |      |     |         | Предельно допустимые значения<br>при $U_{\text{ном}}$ , кВ |      |     |         |
|--|------|-----|---------|--|------|-----|---------|
| 0,38   | 6-20 | 35  | 110-330 | 0,38   | 6-20 | 35  | 110-330 |
| 8,0  | 5,0  | 4,0 | 2,0     | 12,0   | 8,0  | 6,0 | 3,0     |

***Несимметрия напряжений*** характеризуется следующими показателями:

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{02}$ .
- Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в точках общего присоединения к электрическим сетям равны 2,0 и 4,0% соответственно.
- Нормально допустимое и предельно допустимое значения несимметрии напряжений по нулевой последовательности в точках общего присоединения к четырехпроводным электрическим сетям с номинальным напряжением 0,38 кВ равны 2,0 и 4,0% соответственно.

**Отклонение частоты** напряжения переменного тока в электрических сетях характеризуется показателем отклонения частоты  $\Delta f$ . Нормально допустимое и предельно допустимое значения отклонения частоты равны  $\pm 0,2$  и  $\pm 0,4$  Гц соответственно.

**Провал напряжения**, под которым понимается внезапное понижение напряжения ниже  $0,9U_{\text{ном}}$ , за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему, характеризуется длительностью  $\Delta t_{\text{п}}$ . Предельная величина  $\Delta t_{\text{п}}$  в сетях до 20 кВ включительно равна 30 с.

**Импульс напряжения**, т.е. резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление до номинального или близкого к номинальному напряжению, характеризуется показателем импульсного напряжения. Величина импульсного напряжения регламентируется ГОСТом.

Коэффициент временного перенапряжения, определяемый как отношение максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети, характеризуется показателем коэффициента временного перенапряжения  $K_{перU}$ .

В среднем за год в точке присоединения возможны около 30 временных перенапряжений.

## Показатели качества электроэнергии

Значения  $K_{\text{пер}U}$  в точках присоединения электрической сети общего назначения, в зависимости от длительности временных перенапряжений

| Длительность<br>временного<br>перенапряжения, [с]   | до 1 | до 20 | до 60 |
|---|------|-------|-------|
| Коэффициент<br>временного<br>перенапряжения, [о.е.] | 1,47 | 1,31  | 1,15  |

**Влияние отклонений  
напряжения и частоты на  
электромеханическое  
преобразование  
электроэнергии**

## Показатели качества электроэнергии

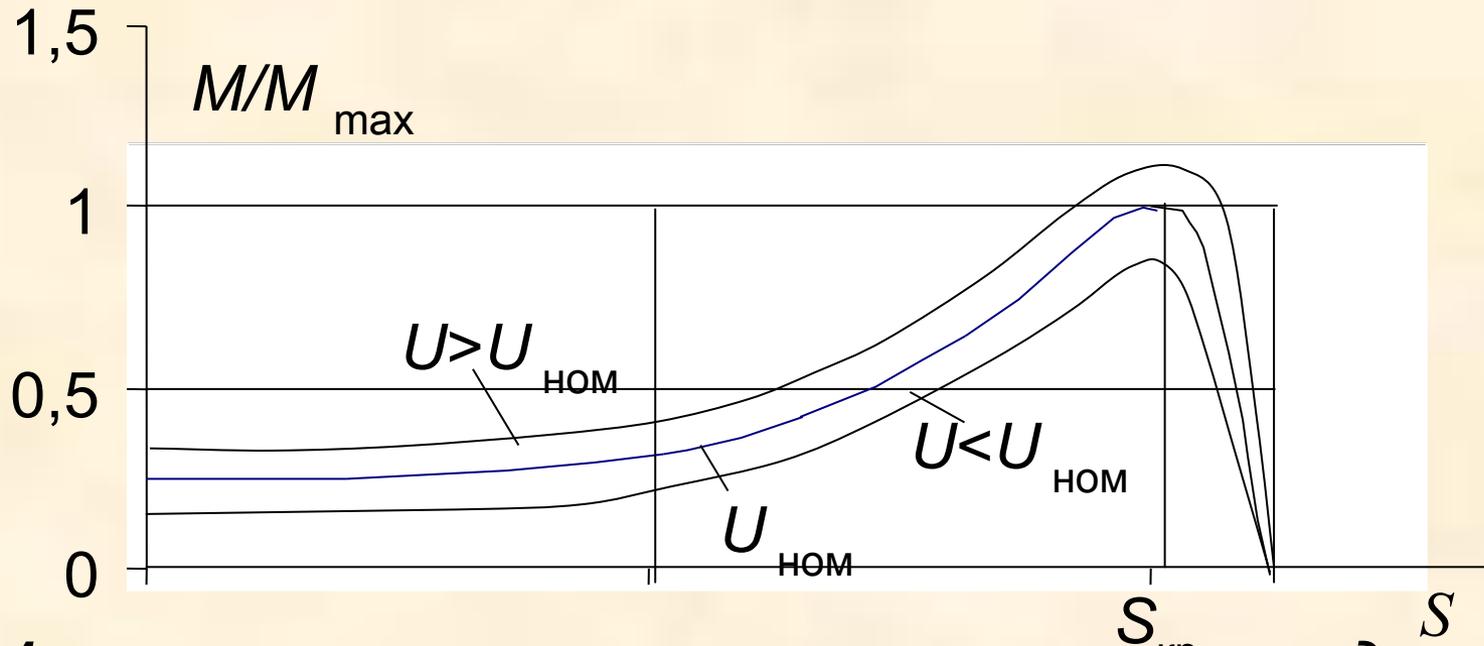
- Причинами, вызывающими отклонения напряжения в системе электроснабжения предприятий, являются изменение режимов работы электроприемников и источников питания, нерациональное подключение однофазных и ударных нагрузок к элементам системы электроснабжения.
- Отклонения частоты определяются режимами энергосистемы и практически не зависят от электропотребления предприятия.

Изменение напряжения на зажимах приемника электроэнергии приводит к изменению его технико-экономических показателей. Анализ зависимости энергетических характеристик системы электроснабжения целесообразно провести путем изучения влияния качества напряжения на основные типы электроприемников:

- двигатели;
- осветительные установки;
- технологические установки.

Подавляющее большинство двигателей на промышленных предприятиях - асинхронные машины.

Вращающий момент асинхронного двигателя связан с величиной скольжения графической зависимостью



*Моментные характеристики асинхронного двигателя при различных питающих напряжениях*

Величина вращающего момента, в зависимости от питающего напряжения, определится как

$$M = \frac{2B_{\text{НОМ}} \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}}}, \quad B_{\text{НОМ}} = \frac{(M_{\text{max}})_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}}$$

где  $(M_{\text{max}})_{\text{НОМ}}$ ,  $M_{\text{НОМ}}$  - максимальное номинальное и номинальное значения вращающего момента;

$S_{\text{кр}}$  - критическое скольжение, при котором двигатель развивает максимальный вращающий момент ( $S_{\text{кр}} = 5-15\%$ ). Следовательно, при изменении напряжения  $U$  механическая характеристика двигателя изменится, что, при сохранении характеристики нагрузки  $M_c = \text{const}$ , приводит к изменению скольжения примерно обратно пропорционально квадрату напряжения.

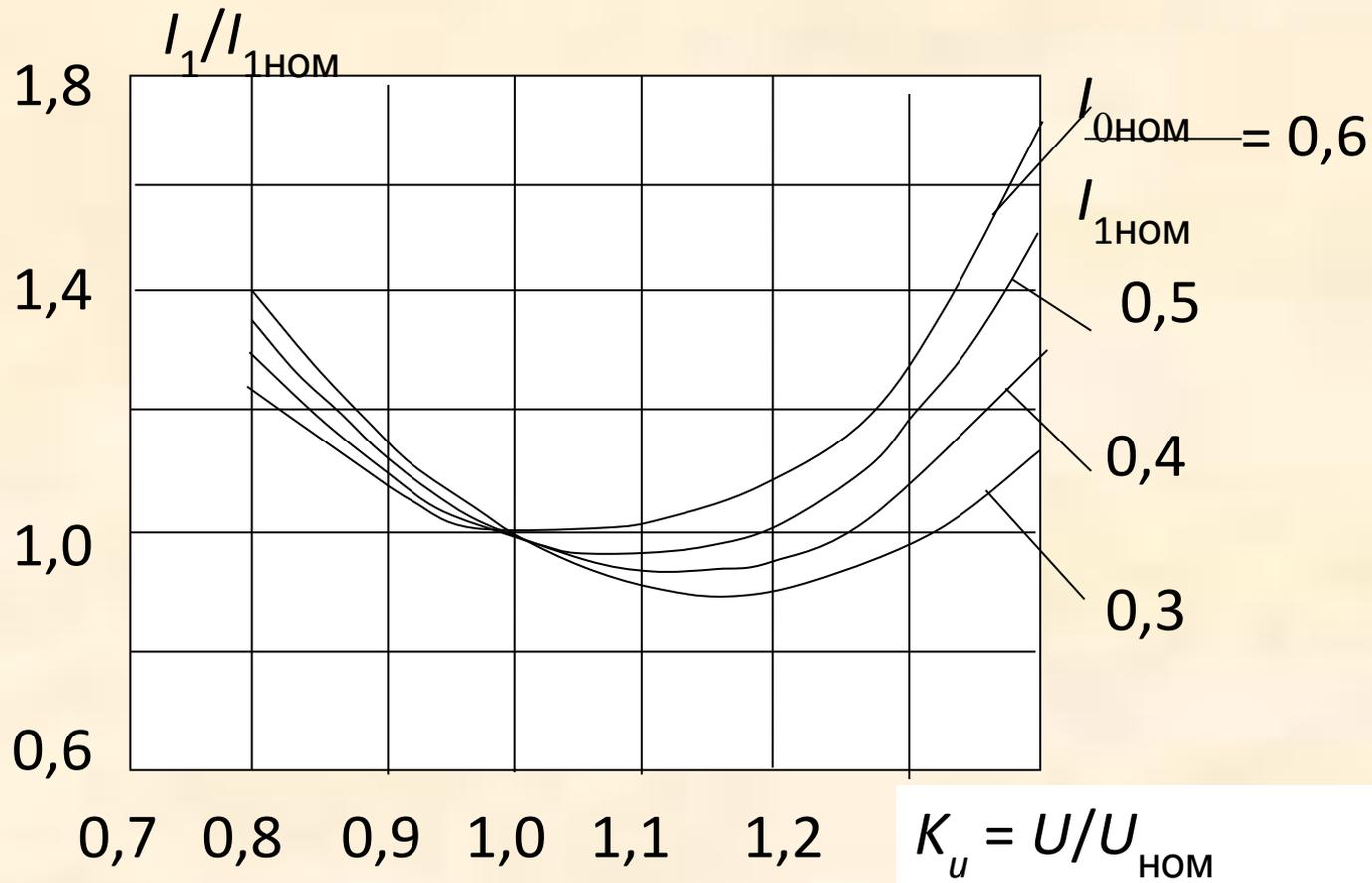
## Показатели качества электроэнергии

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, может быть подсчитана по формуле

$$P = \sqrt{3}U \left( I_0 \cos \varphi_0 + \frac{I_{2\text{НОМ}}^1 M_{\text{с}} U_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}} U} \right) \cdot \sqrt{\frac{B_{\text{НОМ}} + \sqrt{B_{\text{НОМ}}^2 - 1}}{2B_{\text{НОМ}}}},$$

где  $U$ ,  $U_{\text{НОМ}}$  - фактическое и номинальное линейные напряжения питающей сети.

## Показатели качества электроэнергии



*Изменение тока статора двигателя в зависимости от напряжения для различных кратностей тока*

*холостого хода  $I_{0ном}$  и номинального  $I_{1ном}$*

Реактивная мощность, потребляемая двигателем, равна

$$Q \approx Q \left[ c \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 + (1-c) \left( \frac{M_c U_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}} U} \right)^2 \right],$$

где

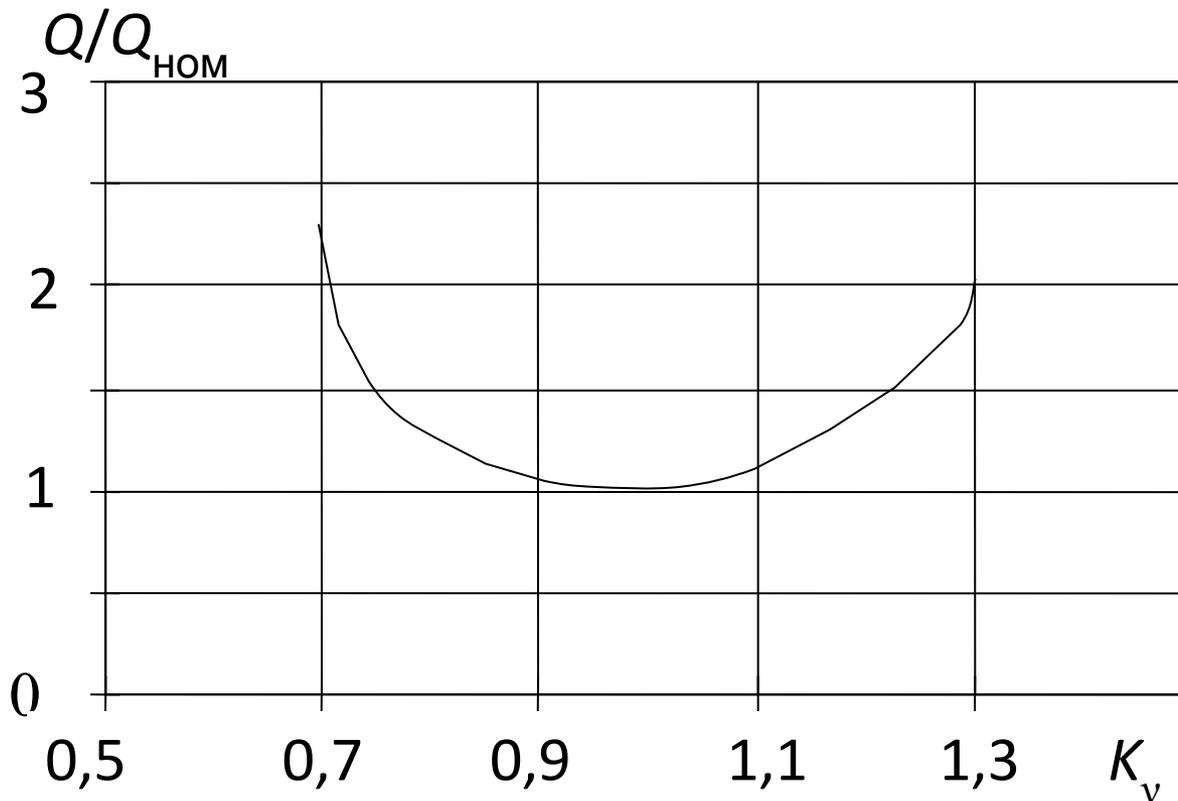
$$c \cong 1 - \frac{1}{(B_{\text{НОМ}} + \sqrt{B_{\text{НОМ}}^2 - 1}) \operatorname{tg} \varphi_{\text{НОМ}}}.$$

Фаза тока статора приближенно может быть определена как

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{I_0 + I_2^1 \sin \varphi^1}{I_2^1 \cos \varphi^1}.$$

## Показатели качества электроэнергии

*График изменения реактивной мощности, потребляемой двигателем в зависимости от напряжения*



Таким образом, **при уменьшении напряжения** :

- намагничивающий ток уменьшается, а ток статора, равный геометрической сумме приведенного тока ротора и тока холостого хода, в зависимости от загрузки асинхронного двигателя и соотношения между  $I_2$  и  $I_0$ , может увеличиваться или уменьшаться;
- ток ротора увеличивается всегда;
- работа с пониженным напряжением более чем на 5% номинального допустима только при условии недогрузки двигателя. В противном случае возможен перегрев обмотки ротора.

Таким образом, **при увеличении напряжения** :

- увеличивается магнитный поток, а скольжение и ток ротора уменьшаются;
- намагничивающий ток увеличивается, а ток статора может увеличиться или уменьшиться в зависимости от загрузки асинхронного двигателя и соотношения  $I_0$  и  $I_2$ ;
- мощность, развиваемая двигателем, останется практически без изменений, так как частота вращения ротора изменяется незначительно.

## Показатели качества электроэнергии

| Характеристики двигателей                            | Изменение характеристик при изменении напряжения |                           |
|--|--|---------------------------|
|  | -10%   | +10%                      |
| Пусковой и максимальный вращающий момент             | -19%   | 21%                       |
| Синхронная частота вращения                          | const  | const                     |
| Скольжение   | 23%  | -17%                      |
| Частота вращения при номинальной нагрузке            | -1,5%  | 1%                        |
| Коэффициент полезного действия при нагрузке:         |  |                           |
| - номинальной  | -2%  | +1%                       |
| - 75%  | const  | const                     |
| - 50%  | -1-2%  | 1-2%                      |
| Коэффициент мощности при нагрузке:                   |  |                           |
| номинальной  | 1%   | -3%                       |
| - 75%  | 2-3%   | -4%                       |
| - 50%  | 4-5%   | -5-6%                     |
| Ток ротора при номинальной нагрузке                  | 14%  | 11%                       |
| Ток статора при номинальной нагрузке                 | 10%  | -7%                       |
| Пусковой ток   | -10-12%  | 10-12%                    |
| Прирост температуры обмотки при номинальной нагрузке | 5-6°   | практически без изменений |

Изменение частоты питающего напряжения вызывает изменение индуктивных сопротивлений асинхронного двигателя, что сказывается на его энергетических характеристиках.

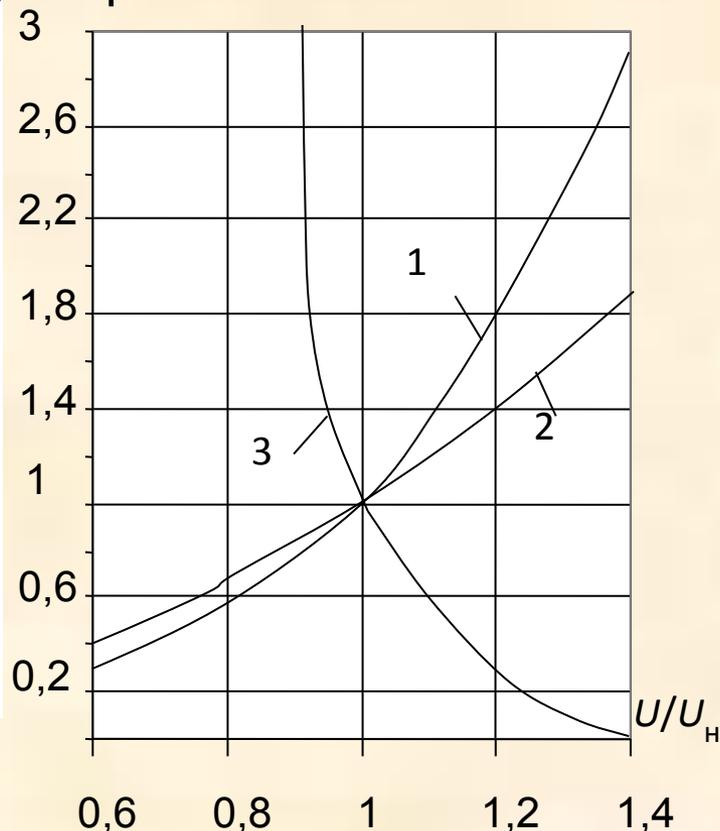
Понижение частоты практически равнозначно повышению напряжения.

Несимметрия напряжений и токов трехфазной системы является одним из важнейших показателей качества электроэнергии. Причиной появления несимметрии является широкое применение мощных однофазных электроприемников - электротермических установок и несимметричных трехфазных нагрузок, например, дуговых электропечей.

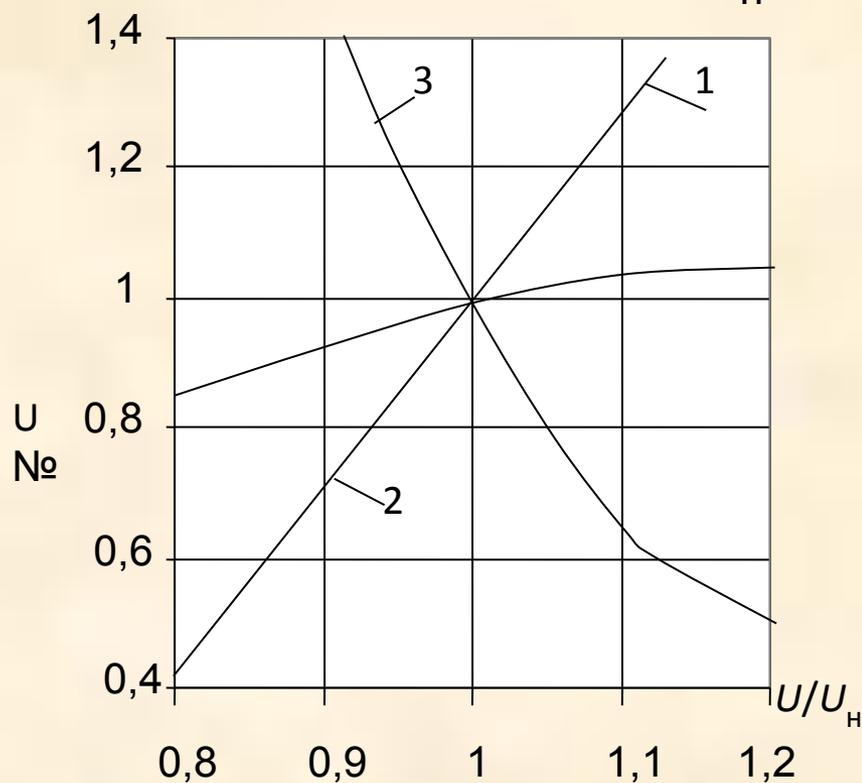
**Влияние отклонений  
напряжения на работу  
осветительных установок**

## Показатели качества электроэнергии

На рисунках показаны зависимости относительных значений светоотдачи  $B/B_H$  (кривые 1), потребляемой мощности  $P/P_H$  (кривая 2), срока службы  $T/T_H$  (кривая 3) в функции относительного значения напряжения  $U/U_H$ .



Относительные  
характеристики ЛН



Относительные  
характеристики лампы ДРЛ

## Показатели качества электроэнергии

*Увеличение мощности, потребляемой лампами различных типов, в процентном отношении к номинальной*

| Тип лампы                 | Превышение напряжения, % |     |     |      |      |      |
|---------------------------|--------------------------|-----|-----|------|------|------|
|                           | 1                        | 2   | 3   | 5    | 6    | 10   |
| Лампы накаливания         | 1,6                      | 3,2 | 4,7 | 8,1  | 11,5 | 16,4 |
| Ртутные лампы типа ДРЛ    | 2,4                      | 4,9 | 7,2 | 12,2 | 17   | 24,3 |
| Натриевые лампы типа ДНаТ | 2                        | 8   | 11  | 18   | 23   | 34   |

## Показатели качества электроэнергии

Кроме существенного увеличения потребляемой электроэнергии на освещение, при увеличении питающего напряжения возрастает количество ламп, необходимых для эксплуатации осветительных установок, а значит - и эксплуатационные расходы.

*Соотношения между превышением питающего напряжения, относительным сроком службы и количеством необходимых для эксплуатации ламп различных типов*

| Параметр  | Превышение напряжения, % |      |      |      |      |      |      |
|---|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
|   | 0                        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Относительный срок службы ламп, %:                |                          |      |      |      |      |      |      |
| накаливания                                       | 100                      | 87,1 | 75,8 | 66,2 | 50,5 | 38,7 | 7,8  |
| разрядных   | 100                      | 95   | 93   | 90   | 85   | 80   | 73   |
| Количество ламп, необходимых для эксплуатации, %: |                          |      |      |      |      |      |      |
| накаливания                                       | 100                      | 114  | 132  | 151  | 198  | 258  | 1284 |
| разрядных   | 100                      | 105  | 108  | 111  | 118  | 125  | 137  |

Приведенные данные убедительно показывают, что для рационального использования электроэнергии для целей освещения и снижения эксплуатационных затрат необходимо эффективно стабилизировать напряжение на зажимах источников света. Обычно осветительные сети проектируются так, чтобы отклонение напряжения у осветительных приборов не превышало 2,5%.

Выбрать сечение проводов разветвленной осветительной сети, при условии располагаемой потери напряжения  $\Delta U$ , можно по формуле

$$F = \frac{\Sigma M + \lambda \Sigma m}{C \Delta U},$$

где  $F$  - сечение проводников данного участка сети;

$\Sigma M$  - сумма моментов рассчитываемого и всех последующих (по направлению потока энергии) участков с тем же числом проводников в линии, что и на рассматриваемом участке;

$\Sigma m$  - сумма моментов всех ответвлений, питаемых через рассчитываемый участок;

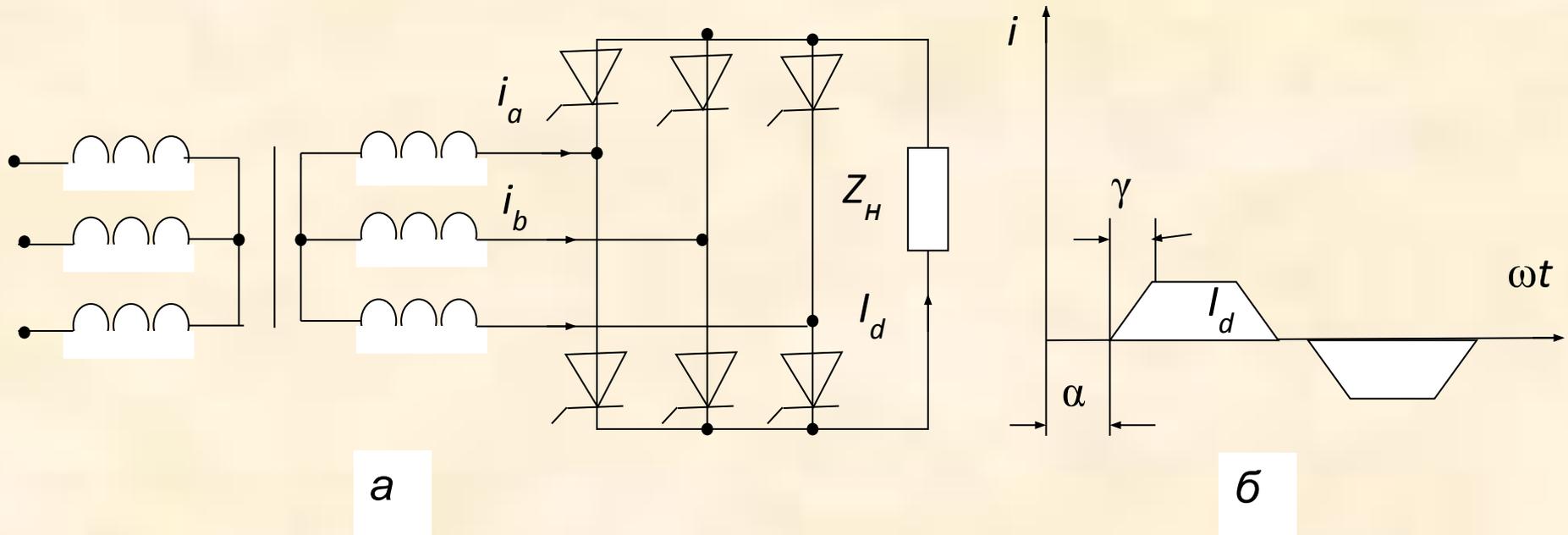
$C$  - коэффициент, учитывающий напряжение, систему питания и материал проводов;

$\lambda$  - коэффициент приведения моментов.

# **Источники высших гармоник в системах электрообеспечения**

Источниками высших гармоник в системах электроснабжения являются электроприемники с нелинейными характеристиками. Типичной нелинейной нагрузкой являются вентильные преобразователи.

Наиболее распространены вентильные преобразователи, представляющие собой трехфазную мостовую схему:



Трехфазная мостовая схема: а - схема; б - диаграмма тока фазы

При симметричном управлении тиристорами преобразователя в кривой фазного тока содержатся нечетные гармоники, не кратные трем:  $n = 5, 7, 11, 13, 17, \dots$

Кроме гармонического спектра фазных токов выпрямителя, определяемого схемой выпрямления, существуют неканонические высшие гармоники с порядками, не соответствующими числу пульсаций выпрямления.

Причинами возникновения неканонических гармоник являются:

- отклонение углов управления вентилями от номинального значения;
- питание вентильного преобразователя от сети с искаженной формой кривой напряжения;
- питание вентильного преобразователя от сети с несимметрией напряжений.

***Влияние высших гармоник  
на системы  
электрообеспечения***

Высшие гармоники приводят к появлению дополнительных потерь в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; ухудшается работа устройств автоматики, телемеханики, связи.

## **Потери от высших гармоник в электрических машинах:**

Высшие временные гармоники тока вызывают дополнительные потери в обмотках электрических машин. Добавочные потери в стали машин малы и обычно ими пренебрегают.

Основная часть добавочных потерь в синхронных машинах приходится на обмотку статора и демпферную систему. В асинхронных двигателях высокого напряжения потери в обмотках статора и ротора примерно одинаковы. Суммарные потери  $\Delta P_{\Sigma n}$ , определяемые всеми гармониками напряжения, определяются как:

$$\Delta P_{\Sigma n} = \sum_{n=2} \Delta P_n \left( \frac{U_n}{U_1} \right)^2.$$

Добавочные потери в асинхронном двигателе от тока  $n$ -й гармоники

$$\Delta P_n = 3 I_n^2 (R_{стn} + R'_{ротn}),$$

где  $R_{стn}$  и  $R_{ротn}$  - активные сопротивления статора и ротора на частоте гармоники  $n$ .

За счет поверхностного эффекта сопротивление статора и ротора приближенно определяется как

$$R_{стn} = R_{ротn} \sqrt{n} : R'_{ротn} = R'_{ротn} \sqrt{n}.$$

Для асинхронных двигателей высокого напряжения  $R_{ст} \approx R_{рот}$ .

Расчетная формула для суммарных потерь от высших гармоник

$$\Delta P_{\Sigma n} = \Delta P_{\text{ном}} K_{\text{п}}^2 \sum_{n=2} \left( \frac{U_n}{U_1} \right)^2 (\sqrt{n}) + \sqrt{n} \approx 1,$$

где  $K_{\text{п}}$  - кратность пускового тока;

$\Delta P_{\text{ном}}$  - номинальные потери в меди статора.

На практике, даже при  $K_{\text{нсп}} = 10-15 \%$ , перегрев АД не наблюдается ни при номинальной нагрузке, ни при пониженной.

Потери активной мощности от токов высших гармоник в трансформаторах подсчитываются по формуле

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2} I_n^2 R_k K_{nm}$$

где  $I_n$  - ток  $n$ -й гармоники, проходящий через трансформатор;

$R_k$  - сопротивление короткого замыкания трансформатора при номинальной частоте;

$K_{nm}$  - коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник за счет поверхностного эффекта.

Для силовых трансформаторов можно принять:

$$K_{5m} = 2,1; K_{7m} = 2,5; K_{11m} = 3,2; K_{13m} = 3,7.$$

## Потери мощности в конденсаторах

В диэлектрике конденсаторов от несинусоидального напряжения появляются дополнительные активные потери:

$$\Delta P_{\Sigma} = \omega C \operatorname{tg} \delta \sum_{n=1}^{13} V U_n^2$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  - коэффициент диэлектрических потерь, принимается одинаковым для всех гармоник до  $n = 13$ ;

$U_n$  - напряжение  $n$ -ной гармоники на шинах после подключения батареи конденсаторов емкостью  $C$ .

Величина потерь от тока  $n$ -ной гармоники может быть подсчитана по формуле:

$$\Delta P_{\phi v} = 3 I_n^2 X_p (n \operatorname{tg} \delta + \sqrt{n} \operatorname{ctg} \alpha_p)$$

где  $X_p$  - индуктивное сопротивление реактора для основной гармоники;

$$\operatorname{ctg} \alpha_p = R_p / X_p.$$

## Влияние высших гармоник на изоляцию

Искажение формы кривой напряжения сказывается на возникновении и протекании ионизационных процессов в изоляции электрических машин. Исследования показывают, что при одинаковых амплитудах кривых напряжения  $\text{tg } \delta$  будет большим для кривой заостренной формы и меньшим - для уплощенной. Наличие высших гармоник часто приводит к заострению формы кривой напряжения, что увеличивает потери мощности в изоляции. В частности, при коэффициенте несинусоидальности напряжения 5 % через два года эксплуатации  $\text{tg } \delta$  увеличивается в два раза.

## Влияние высших гармоник на учет электроэнергии

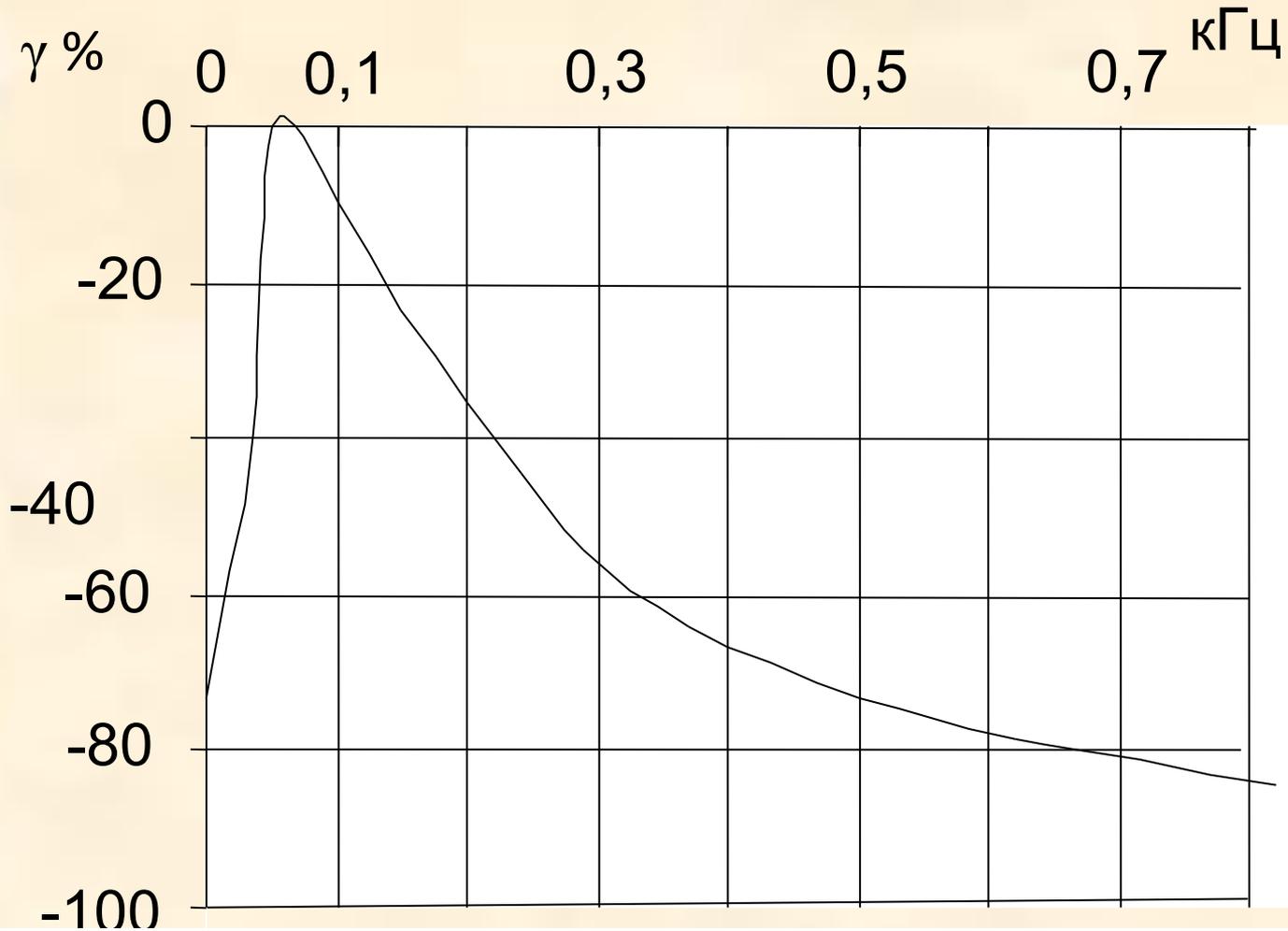
Приборы учета электроэнергии при несинусоидальных токах и напряжениях дают большую погрешность. В частности, распространенные индукционные счетчики имеют отрицательную частотную погрешность на частотах высших гармоник.

Результирующая погрешность учета электроэнергии, обусловленная несинусоидальностью, равна

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{n=2}^n \Delta P_n^* jn,$$

$$\Delta T_n^* = \frac{\Delta P_n}{P_1}.$$

# Показатели качества электроэнергии



Частотные характеристики счетчика

## Показатели качества электроэнергии

- При наличии нелинейных электроприемников происходит «переучет» электроэнергии;
- Погрешности учета приводят к нарушению баланса потребляемой электроэнергии ввиду учета электроэнергии различного качества;
- Большую точность измерения электроэнергии в условиях несинусоидальных режимов обеспечивают электронные счетчики;
- Измерение напряжения и тока при наличии высших гармоник также приводит к дополнительным погрешностям;
- Высшие гармоники ухудшают работу систем автоматики, телемеханики;
- Надежность систем электроснабжения уменьшается.

# **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Под управлением КЭ понимается выполнение необходимых организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение заданных требований к КЭ.

К техническим мероприятиям относится применение специальных технических средств или мероприятий, требующих значительных капитальных вложений.

## **К организационным мероприятиям относятся:**

1. Применение рациональных схем электроснабжения.
2. Применение автоматического регулирования трансформаторов, компенсирующих устройств, синхронных двигателей, преобразователей, тиристорных источников реактивной мощности.
3. Регулирование графика нагрузки и режимов электропотребления.
4. Эксплуатационные мероприятия по улучшению КЭ, отраженные в виде должностных инструкций, оперативных и ремонтных схем электроснабжения, утвержденных планах мероприятий по улучшению КЭ.
5. Системы экономического и материального стимулирования предприятия и работников энергетических служб, обеспечивающих повышение КЭ.

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ПРЕДПРИЯТИЯ**

Электробаланс предприятия состоит из прихода и расхода активной и реактивной электроэнергии.

В приход включают электроэнергию, полученную от энергосистемы или от сетей других предприятий, а также выработанную электроустановками предприятия - генераторами промышленных электростанций, синхронными компенсаторами и конденсаторами.

В расходную часть электробаланса включают следующие статьи расхода:

- 1) прямые затраты электроэнергии на основной технологический процесс с выделением полезного расхода электроэнергии на выпуск продукции без учета потерь в энергоемких технологических установках;
- 2) косвенные затраты электроэнергии на основной технологический процесс из-за нарушения технических норм или несовершенства;
- 3) затраты на вспомогательные нужды - вентиляцию, цеховой транспорт, освещение и т. д.;
- 4) потери электроэнергии в элементах систем электроснабжения - линиях, трансформаторах, реакторах, компенсирующих устройствах и двигателях;
- 5) отпуск электроэнергии посторонним потребителям.

Задачами составления электробаланса являются:

- 1) выявление и нахождение потерь электроэнергии и ее непроизводительных затрат;
- 2) определение действительных удельных норм расхода электроэнергии на единицу продукции предприятия;
- 3) выявление возможности сокращения непроизводительных расходов электроэнергии и возможности уменьшения расхода электроэнергии на выпуск основной продукции.

Важной составляющей электробаланса предприятия являются потери, которые состоят из потерь в электрической сети, потерь в трансформаторах, потерь в крупных двигателях.

ПОРА ДОМОЙ!



# Содержание лекции:

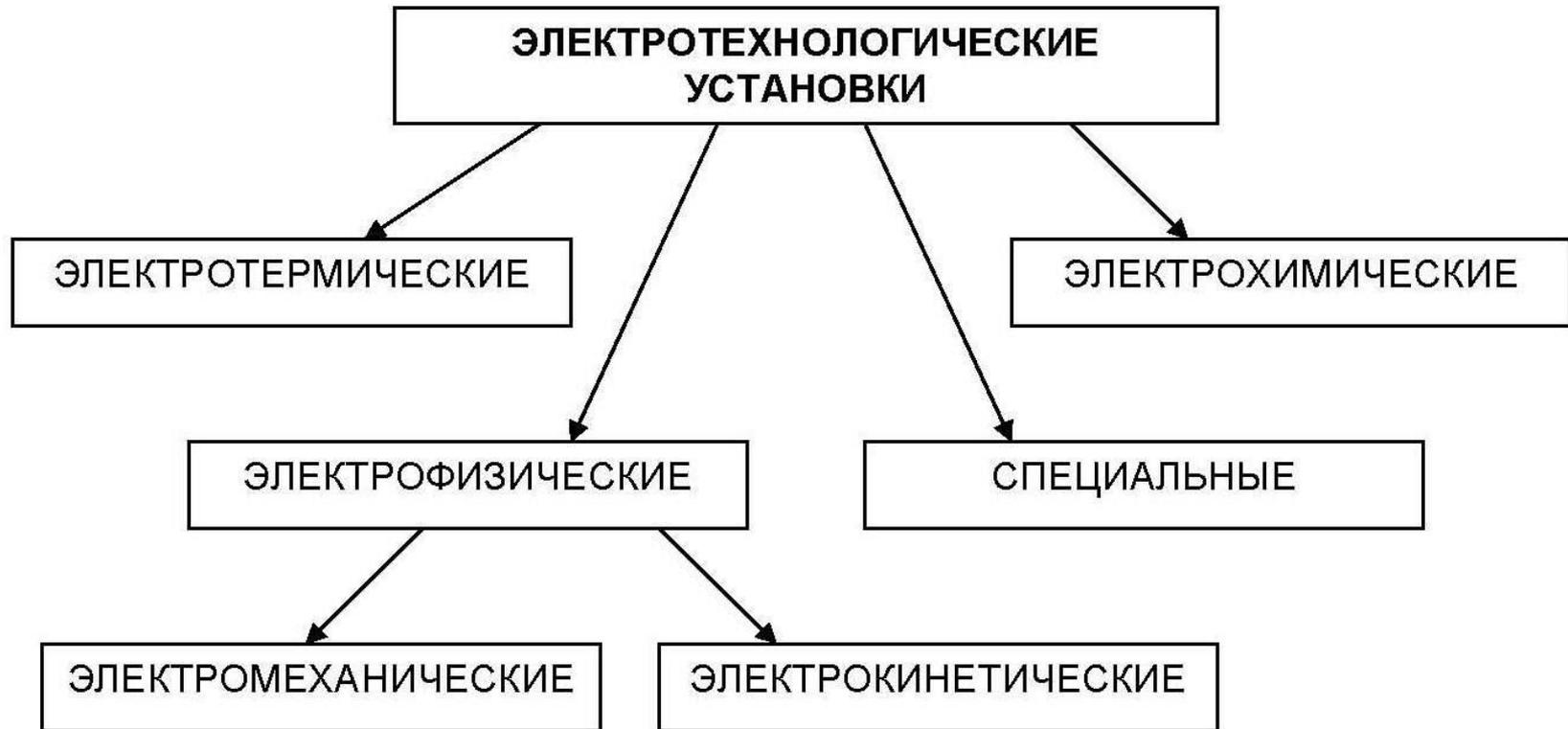
1. Введение
2. Электротермические установки
3. Классификация электротермического оборудования
4. Виды теплопередачи
5. Материалы для электротермических установок
6. Электрические печи сопротивления
7. ЭПС периодического действия
8. ЭПС непрерывного действия
9. Циклы термической обработки
0. Электрооборудование и регулирование параметров печей сопротивления
1. Печи и установки прямого (контактного) нагрева
2. Требования печей сопротивления к системе электроснабжения

# **Введение**

*Электроэнергия* – это посредник при преобразовании одних видов энергии в другие.

Установки, в которых происходит превращение электрической энергии в другие виды с одновременным осуществлением технологических процессов, в результате которых происходит изменение вещества, называют *электротехнологическими*.

Основные группы электротехнологических установок представлены на блок-схеме:



*Электротермические установки* применяются в промышленности для термообработки металлов под пластическую деформацию, закалку, плавления, нагрева диэлектриков; в сельском хозяйстве для обогрева помещений различного технологического назначения; в быту (бытовые нагревательные приборы).

*Электрохимические установки* применяются в промышленности при электролизе расплавов и растворов, для нанесения защитных и декоративных покрытий, электрохимико-механической обработки изделий в электролитах.

В качестве примера на рис. 1.4 представлена схема электролизной установки.

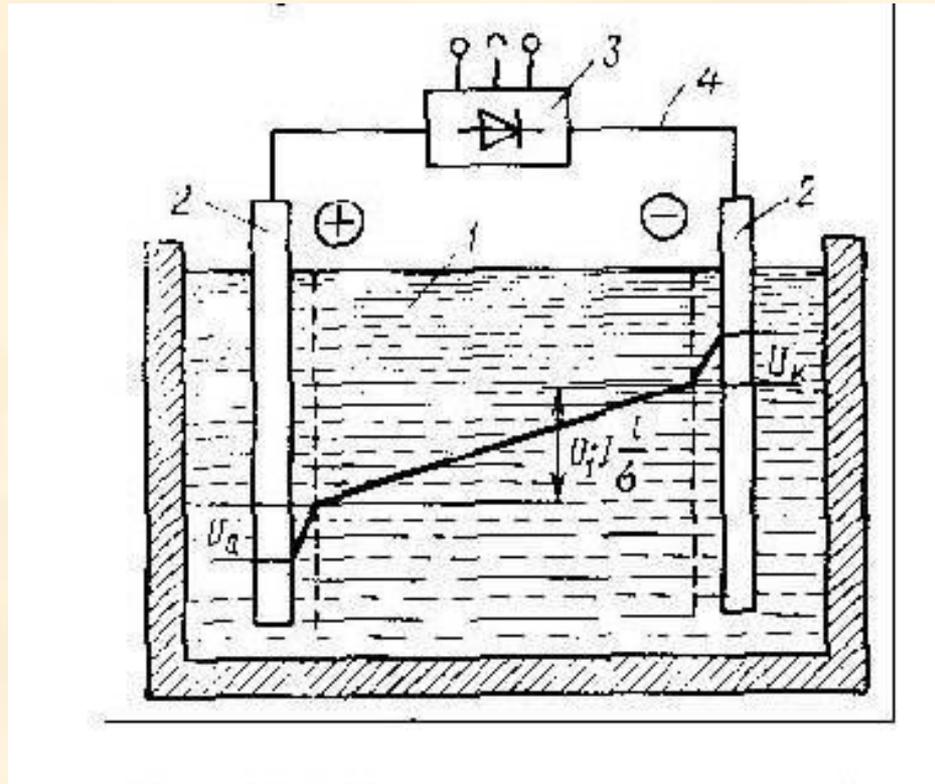


Рис. 1.4. Схема электролизной установки и распределение потенциала между электродами: 1 – электролит; 2 – электроды; 3 – источник питания; 4 – проводящие шины

*Электромеханические установки* применяются в промышленности для ультразвукового воздействия на обрабатываемый материал, магнито-импульсной обработки металлов.

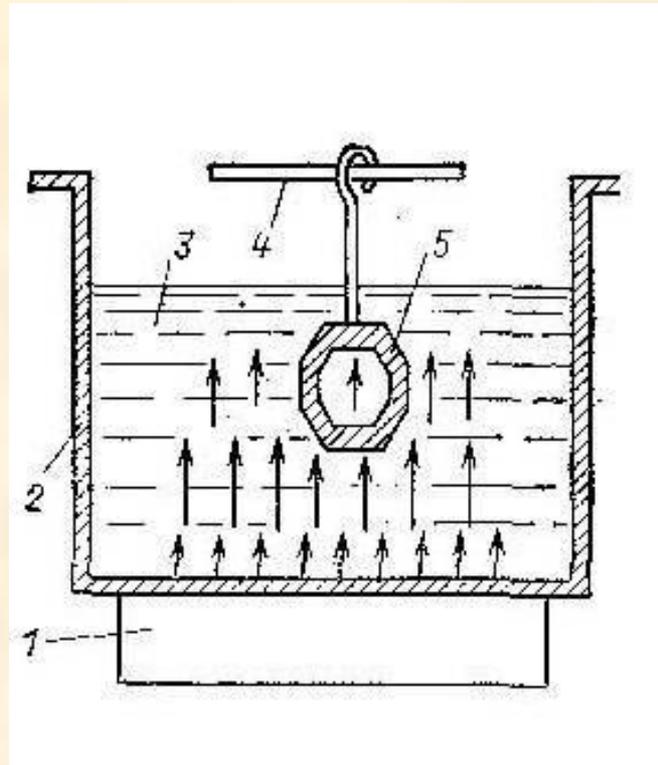


Рис. 2. Принципиальная схема ультразвуковой очистки:  
1 – генератор ультразвуковых колебаний; 2 – ванна,  
3 – жидкость (растворитель); 4 – подвеска; 5 – очищаемая деталь

*Электрокинетические установки* применяются для разделения сыпучих материалов и эмульсий, очистки сточных вод, электроокраски, электроэрозионной обработки металлов. Как пример на рис. 3 показана установка для электроэрозионной обработки металлов.

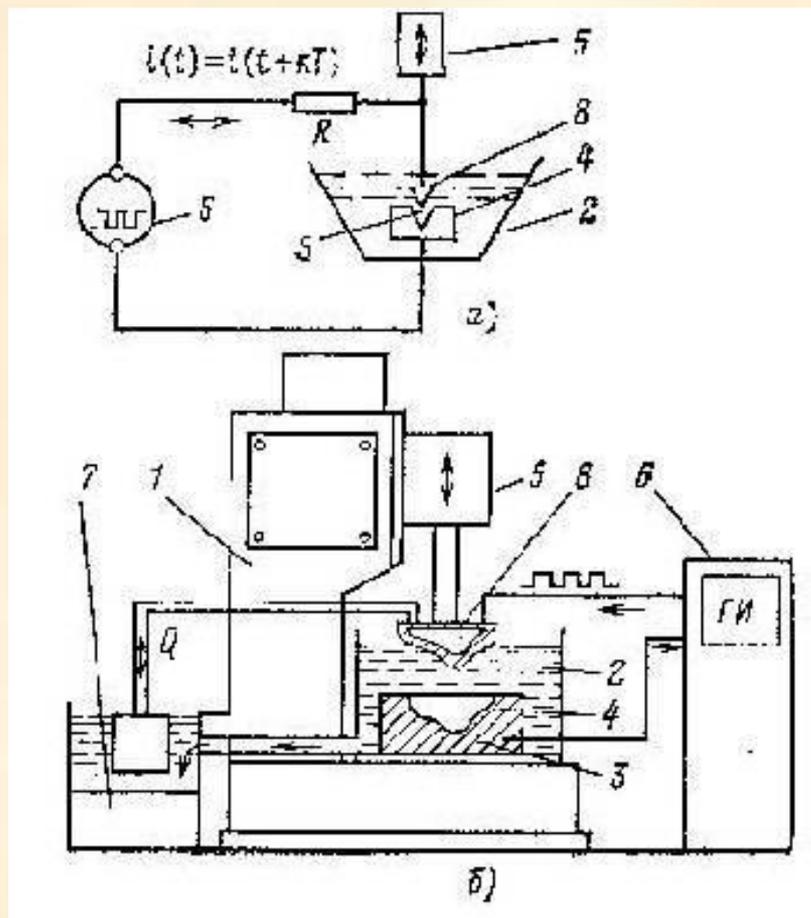


Рис. 3. Установка для электроэрозионной обработки:

а – принципиальная схема; б – полная схема 1 – собственно станок;

2 – рабочая ванна; 3 – стол для установки электрода-изделия;

4 – электрод-изделие; 5 – регулятор подачи; 6 – источник питания

(генератор импульсов); 7 – система снабжения диэлектрической

жидкостью; 8 – электрод-инструмент

*Электротехнологические установки специального назначения* – установки, представляющие совокупность различного рода воздействий, в частности перенос энергии за счет электромагнитного поля.

В качестве примера электротехнологических установок специального назначения можно привести устройства для электродинамической сепарации в бегущем магнитном поле, предназначенные для извлечения ломов и отходов неферромагнитных металлов из твердых отходов, а также для сортировки ломов цветных металлов; устройства для электромагнитного транспорта и электромагнитного перемешивания жидких металлов.

# **ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**

**Применение электрической энергии для нагрева имеет ряд достоинств, какие он имеет по сравнению с топливным нагревом:**

- существенное снижение загрязнения окружающей среды;**
- получение строго заданных значений температур, в том числе и превосходящих уровни, достигаемые при сжигании любых видов топлива;**
- создание сосредоточенных интенсивных тепловых потоков;**
- достижение заданных полей температур в нагреваемом пространстве;**
- строгий контроль и точное регулирование длительности выделения энергии;**
- гибкость в управлении потоками энергии;**
- возможность нагрева материалов изделий в газовых средах любого химического состава и вакууме.**



