

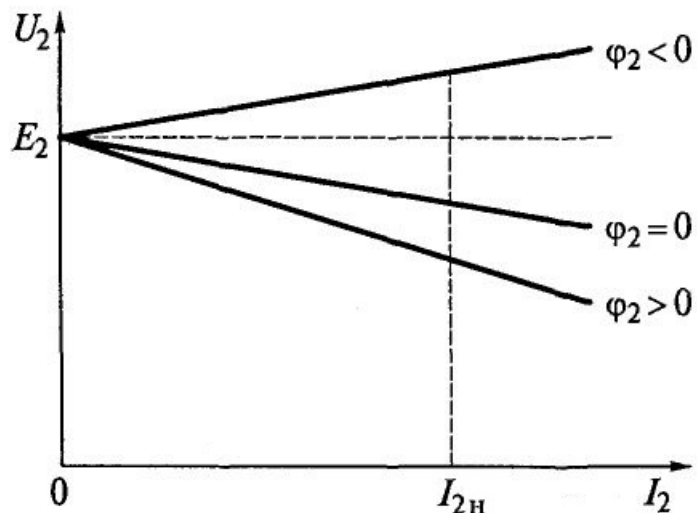
# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Изменение напряжения  
трансформатора

# Изменение напряжения трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора

$U_2 = f(I_2)$  при  $\cos\varphi_2 = \text{const}$ , а также  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$

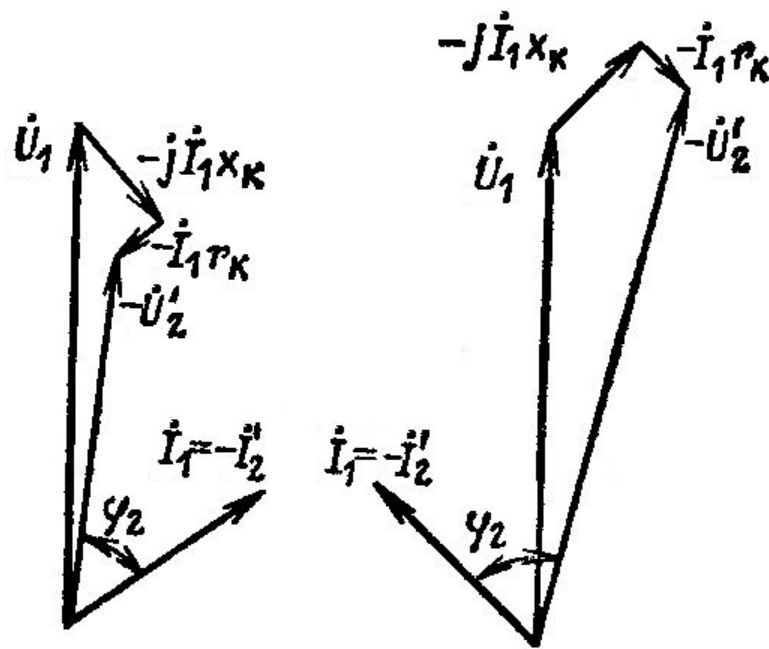
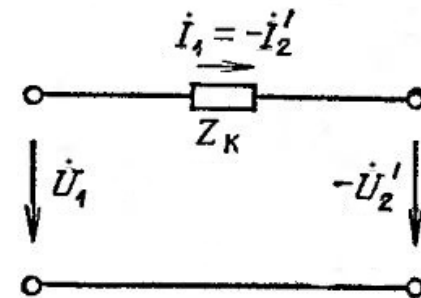


На ХХ  $I_2 = 0$ ,  $U_2 = E_{20}$  (номинальное  $U_2$ )

По мере роста нагрузки ( $I_2$ ) растет  $\Delta U$

Пренебрегая  $I_{12}$  представим тр-р в виде  $Z_K$

Тогда  $-\dot{U}'_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_K$



- при  $RL$ -нагрузке  $U_2$  снижается
- при  $RC$ -нагрузке  $U_2$  растет

## Изменение напряжения трансформатора

## Изменение напряжения

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_{2H}} \cdot 100 = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} \cdot 100 = \frac{U_{1H} - U'_2}{U_{1H}} \cdot 100$$

Векторная диаграмма для уравнения  $\dot{U}_1 = -\dot{U}'_2 - \dot{I}'_2 Z_K \rightarrow$

Пренебрегая  $|AB|$  (при малых  $\alpha$ )  $U_1 \approx |OB|$

При XX  $U'_2 \approx U_1$  ( $I'_2=0$ ) и  $|0B|$  совпадает с  $|0C|$

При нагрузке  $\Delta U \approx |BC|$

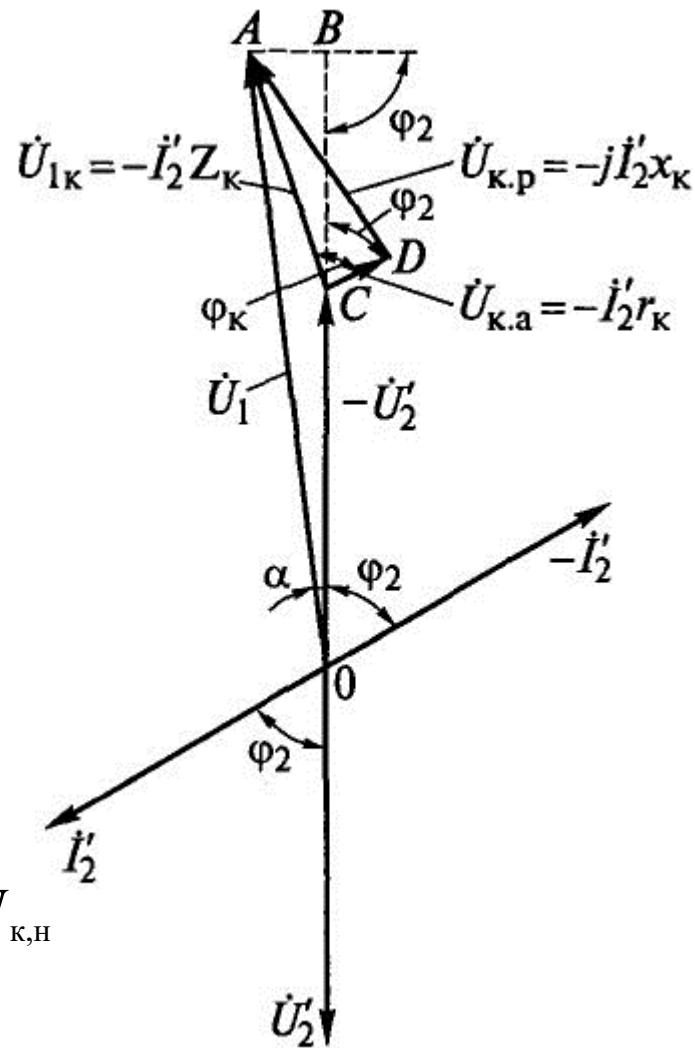
$$\Delta U \approx |BC| = U_{1\kappa} \cos(\varphi_{\kappa} - \varphi_2)$$

$$\Delta U = U_{1\kappa} \cos \varphi_{\kappa} \cos \varphi_2 + U_{1\kappa} \sin \varphi_{\kappa} \sin \varphi_2 = U_{\kappa,a} \cos \varphi_2 + U_{\kappa,p} \sin \varphi_2$$

Известное сопротивление  $Z_k$  определяет  $U_{k,H} = I'_{2,H} Z_k$

тогда произвольное  $U_K$ : 
$$U_{1K} = I_2' Z_K = \frac{I_{2,H}'}{I_{2,H}'} I_2' Z_K = \frac{I_2'}{I_{2,H}'} I_{2,H}' Z_K = \beta U_{K,H}$$

$$\beta = \frac{I_2'}{I_{2,н}'} - \text{коэффициент нагрузки}$$



# Изменение напряжения трансформатора

Изменение напряжения

$$\Delta U = \beta (U_{\text{к,а,н}} \cos \varphi_2 + U_{\text{к,р,н}} \sin \varphi_2)$$

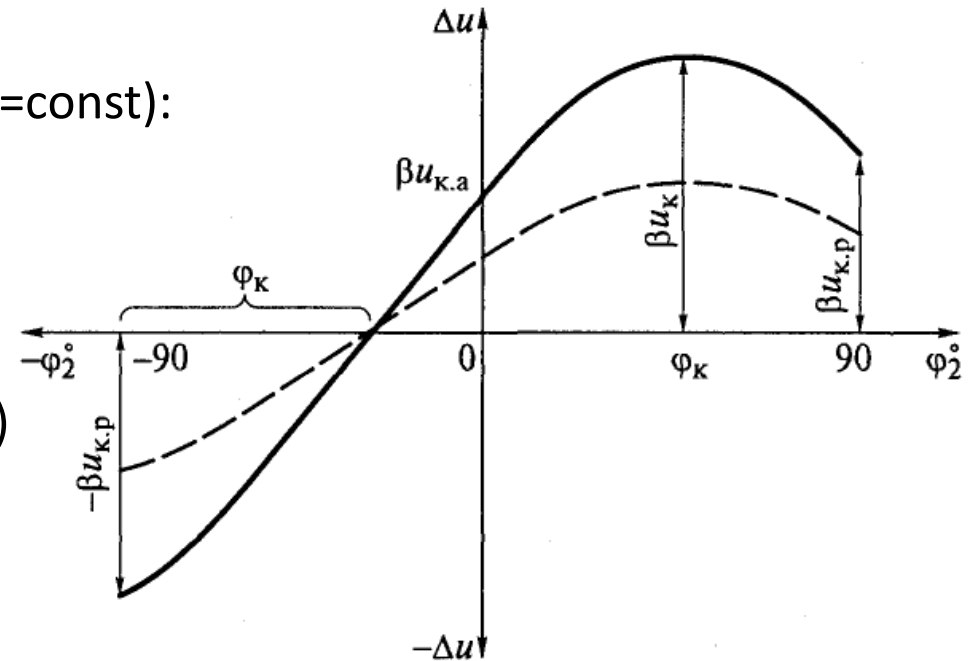
В паспортных данных  $u_{\text{к}}$  в процентах

Выразим  $\Delta U$  в процентах (разделив на  $U_{1,\text{н}}$ )

$$\Delta u = \beta (u_{\text{к,а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к,р}} \sin \varphi_2)$$

Изменение напряжения зависит от характера нагрузки ( $\beta = \text{const}$ ):

- при  $\varphi_2 = 0$   $\Delta u = \beta u_{\text{к,а}}$  (активная нагрузка)
- при  $\varphi_2 = 90^\circ$   $\Delta u = \beta u_{\text{к,р}}$  (индуктивная нагрузка)
- при  $\varphi_2 = -90^\circ$   $\Delta u = -\beta u_{\text{к,р}}$  (емкостная нагрузка)
- при  $\varphi_2 = \varphi_{\text{к}}$   $\Delta u = \beta u_{\text{к}}$  (максимальное  $\Delta u$ )
- $\Delta u = 0$  при  $\varphi_{\text{к}} - \varphi_2 = 90^\circ$  или  $\varphi_2 = -90^\circ + \varphi_{\text{к}}$  (нужна емкость)

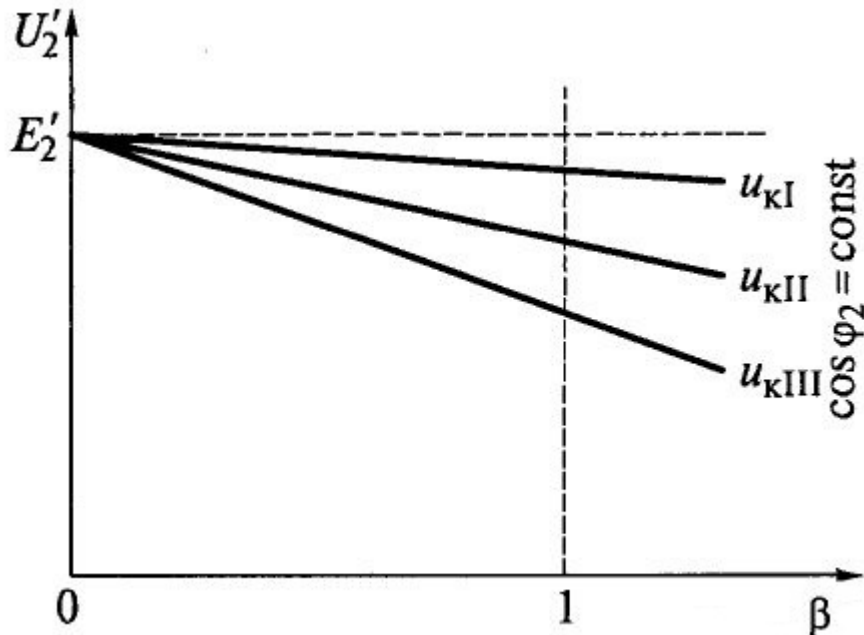


# Изменение напряжения трансформатора

Если на векторной диаграмме не пренебрегать  $\alpha$  ( $|AB|$ ),  
можно вывести более точную формулу ( $\Delta u$  в %)

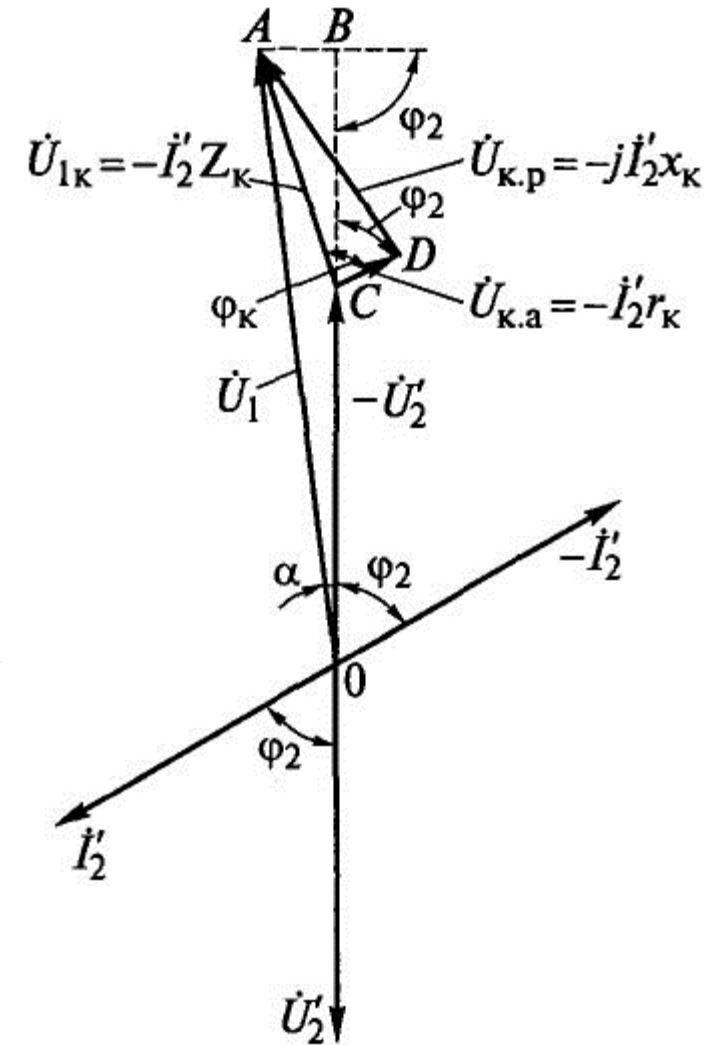
$$\Delta u = \beta(u_{к,а} \cos \varphi_2 + u_{к,р} \sin \varphi_2) + \beta^2 \frac{(u_{к,р} \cos \varphi_2 - u_{к,а} \sin \varphi_2)^2}{200}$$

Второе слагаемое невелико



Изменение напряжения при  $\cos \varphi_2 = \text{Const}$  определяется  $u_k$

- чем больше  $u_k$  (и  $z_k$ ), тем сильнее изменяется  $U_2$
- на параллельную работу можно включать тр-ры только с одинаковым  $u_k$  ( $\pm 10\%$ )



# Регулирование вторичного напряжения трансформатора

Иногда требуется поддерживать  $U_2$  при изменении  $U_1$  или большом  $\Delta U_2$

$$U_2 \approx U_1 \frac{w_2}{w_1}$$

→ надо изменять число витков:  
несколько ответвлений в обмотке  
+ переключатель

Проблемы:

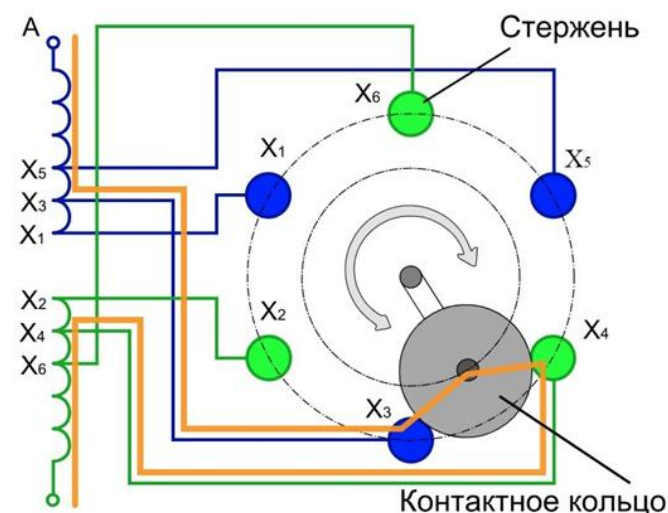
- нельзя разрывать цепь тока
- нельзя закорачивать витки между отводами

Два вида переключения

- переключение ответвлений обмотки без возбуждения (**ПБВ**)
- переключение (регулирование) под нагрузкой (**РПН**)

Тр-ры с переключением без возбуждения

- переключение после отключения от сети
- 5 ответвлений: +5%, +2,5%, 0, -2,5%, -5%
- ответвления на ВН (ток меньше, и больше)
- ответвления в наружном слое обмотки
- ответвления симметричны по высоте
- переключатель простой и компактный



# Регулирование вторичного трансформатора

Иногда требуется поддерживать  $U_2$  при изменении  $U_1$  или большом  $\Delta U_2$

$$U_2 \approx U_1 \frac{w_2}{w_1}$$

→ надо изменять число витков:  
несколько ответвлений в обмотке  
+ переключатель

Проблемы:

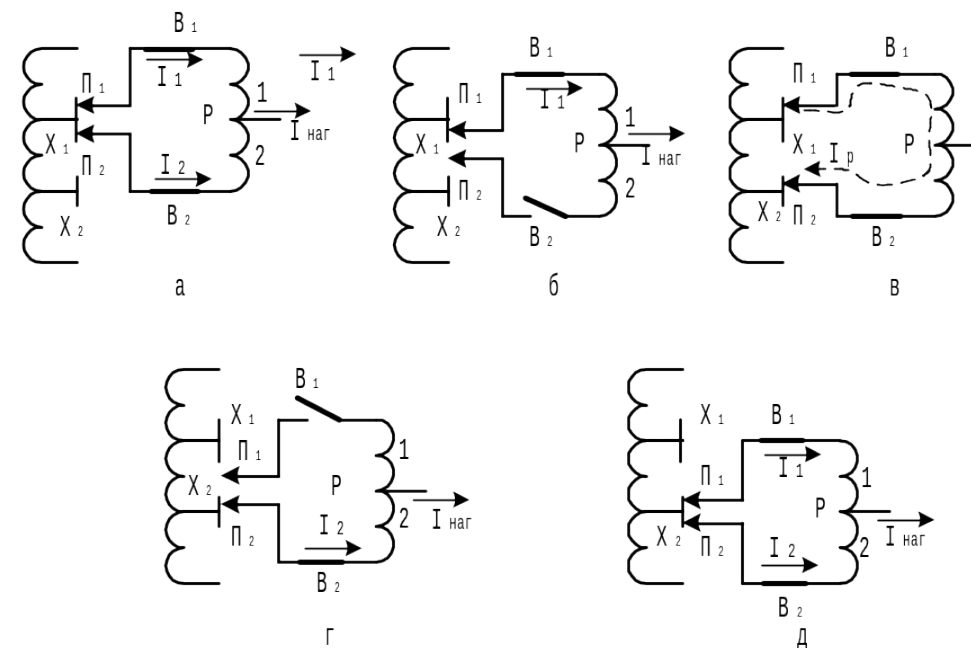
- нельзя разрывать цепь тока
- нельзя закорачивать витки между отводами

Два вида переключения

- переключение ответвлений обмотки без возбуждения (**ПБВ**)
- переключение (регулирование) под нагрузкой (**РПН**)

## Трансформаторы с регулированием под нагрузкой

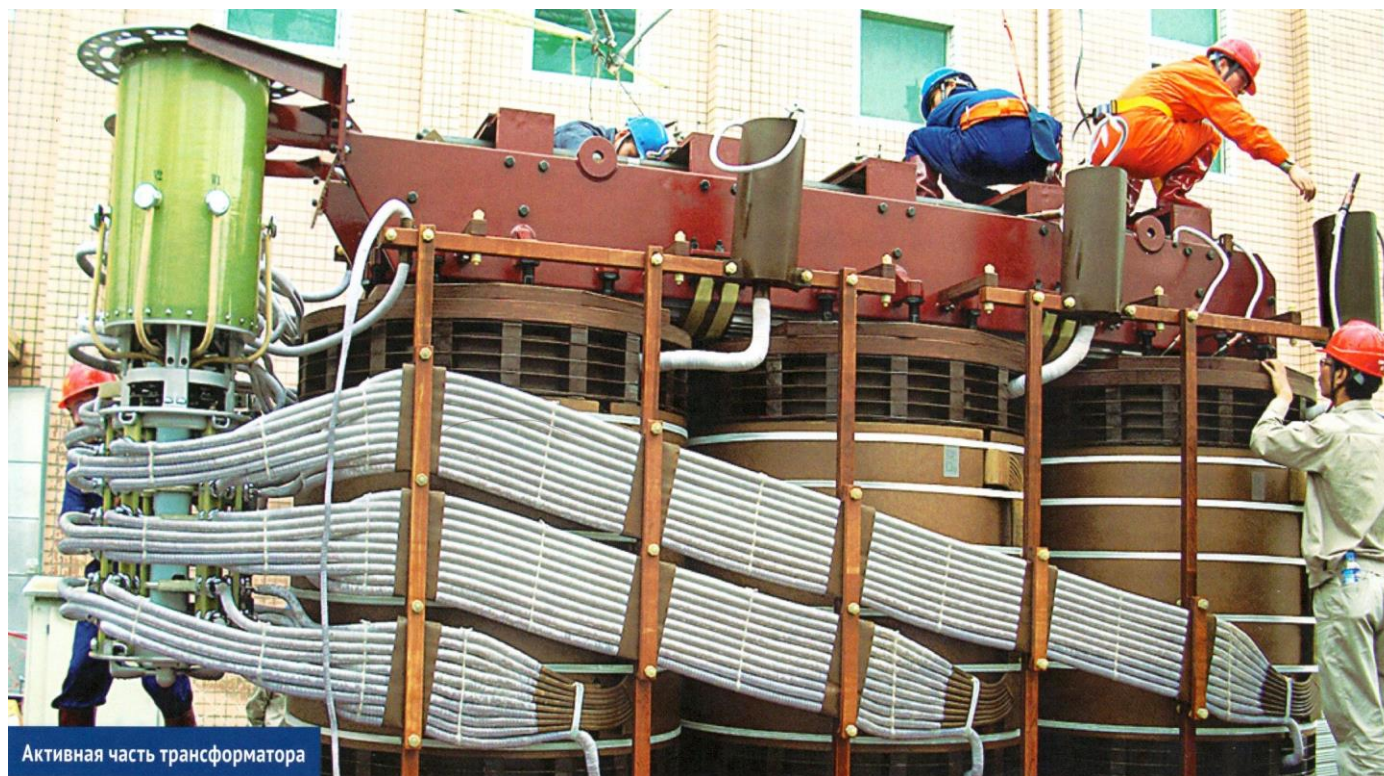
- регулирование 6...9 ступеней на  $\pm 9\% \dots \pm 16\%$
- переключение без разрыва тока
- и ограничение тока КЗ (реактор или резистор)





# Регулирование вторичного трансформатора

## Трансформатор с РПН



## Устройство ПБВ





# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Потери мощности и КПД  
трансформатора

# Потери мощности и КПД трансформатора

Тр-р потребляет и отдает активную мощность

$$P_1 = mU_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 \quad P_2 = mU_{2\phi} I_{2\phi} \cos \varphi_2$$

при этом  $P_2 = P_1 - \Sigma P$

сумма потерь  $\Sigma P = P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{\text{доб1}} + P_{\text{доб2}} + P_{\text{м}} + P_{\text{дэ}}$

Электрические потери  $\sim I^2$

$$P_{\varepsilon 1} = mI_{1\phi}^2 r_1 \quad P_{\varepsilon 2} = mI_{2\phi}^2 r_2 = mI_{2\phi}'^2 r_2'$$

Добавочные потери (от полей рассеяния) также  $\sim I^2$

Все эл.потери можно выразить через  $P_{\text{к}}$  (при  $I_{2\text{н}}'$ )

$$P_{\varepsilon 1} + P_{\text{доб1}} + P_{\varepsilon 2} + P_{\text{доб2}} = P_{\text{к}} \left( \frac{I_2'}{I_{2\text{н}}'} \right)^2 = P_{\text{к}} \beta^2$$

Диэлектрические потери в изоляции  $P_{\text{дэ}} \sim U^2$

(заметны лишь в высоковольтных тр-рах)

и не изменяются, как и магнитные потери, от  $I$

$$P_{\text{м}} + P_{\text{дэ}} = P_0 \quad \text{— потери ХХ при } U_{1\text{н}}$$

Суммарные потери:

переменные (от нагрузки) + постоянные

$$\Sigma P = P_{\text{к}} \beta^2 + P_0$$

При этом  $P_{\text{к}}$  и  $P_0$  есть в паспорте тр-ра

Коэффициент полезного действия  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

удобно выразить

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = \frac{P_2 + \Sigma P - \Sigma P}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}$$

мощность  $P_2$  (пренебрегая  $\Delta U$ )

$$P_2 = mU_{2\text{н}} I_2 \cos \varphi_2 = mU_{2\text{н}} \beta I_{2\text{н}} \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2$$

$$\text{тогда КПД } \eta = 1 - \frac{P_{\text{к}} \beta^2 + P_0}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_{\text{к}} \beta^2 + P_0}$$

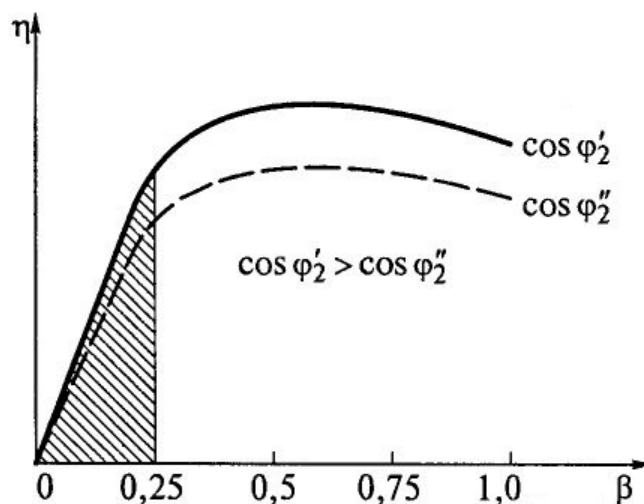
(удобно для практических расчетов)

# Потери мощности и КПД трансформатора

КПД трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_k \beta^2 + P_0}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_k \beta^2 + P_0}$$

– нелинейная зависимость от нагрузки  $\beta$



Найдем производную по  $\beta$ , приравняем 0  
Тогда: максимум КПД при такой нагрузке, когда равны переменные и постоянные потери

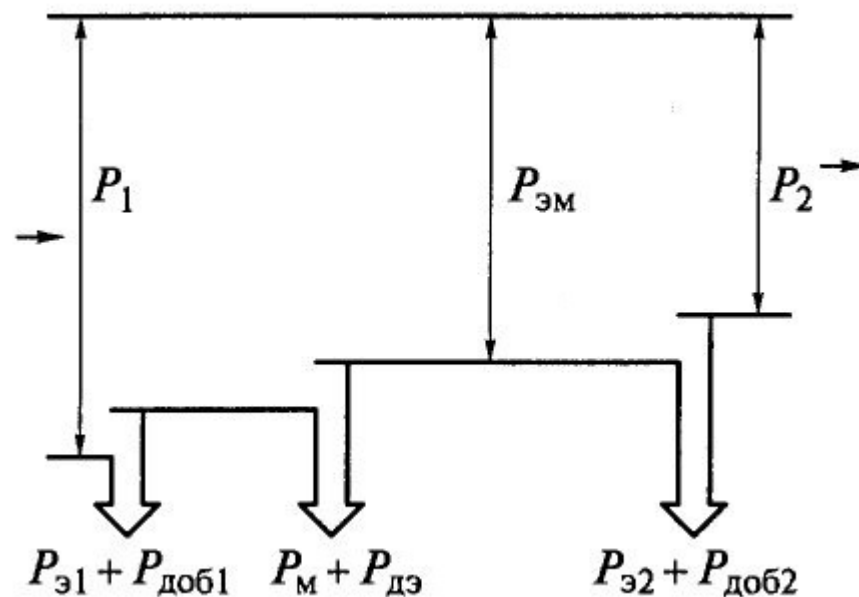
$$P_k \beta^2 = P_0; \quad \beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}$$

КПД силового трансформатора 95%...99,8%

Обычно  $\beta_{max} = 0,5...0,7$

При малых нагрузках эксплуатация невыгодна

Энергетическая диаграмма



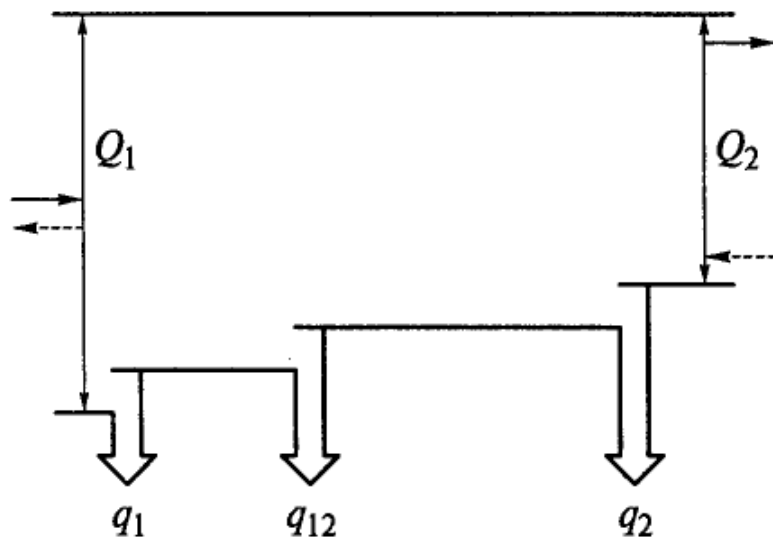
Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = m E_1 I_1 \cos \psi_1 = m E'_2 I'_2 \cos \psi_2$$

$\psi$  – угол между ЭДС и током

# Потери мощности и КПД трансформатора

Диаграмма реактивной мощности



Обычно тр-р потребляет  $Q_1$  и отдает в сеть  $Q_2$   
Бывает, тр-р потребляет  $Q_2$  ( $Q_2 < 0$ )

- при емкостной автономной нагрузке
- ночью при недогрузке ЛЭП
- в высокочастотных тр-рах

Тогда тр-р снижает потребление  $Q_1$   
или даже отдает  $Q_1$  в первичную сеть

$$Q_1 = mU_1 I_1 \sin \varphi_1$$

– для создания  $\Phi_{\sigma 1}$

– для создания  $\Phi_{\sigma 2}$

– для создания  $\Phi_{12}$

$$Q_2 = mU_2 I_2 \sin \varphi_2 = mU_2' I_2' \sin \varphi_2$$

$$q_1 = mI_1^2 x_1$$

$$q_2 = mI_2^2 x_2 = mI_2'^2 x_2'$$

$$q_{12} = mE_1 I_{12} = mI_{12}^2 x_{12}$$

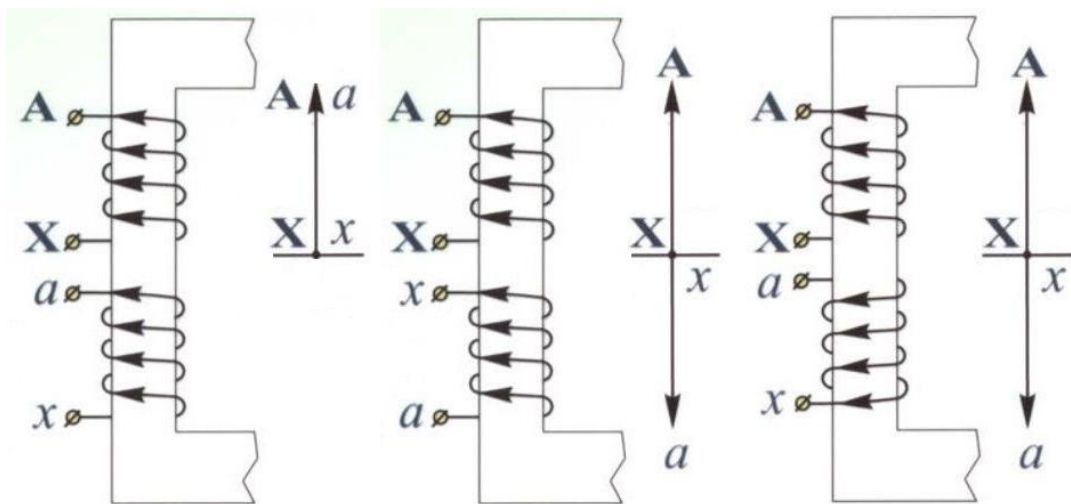
# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Группы соединения обмоток

# Группы соединения обмоток

Для включения тр-ров на параллельную работу  
надо знать сдвиг фаз между  $E_1$  и  $E_2$   
(сдвиг фаз должен быть одинаковым)  
Такой сдвиг фаз характеризует *группа  
соединения обмоток*

Обмотки одного стержня сцеплены с одним потоком  
→ направление ЭДС определяется выбором начала  
и конца обмотки и направлением намотки

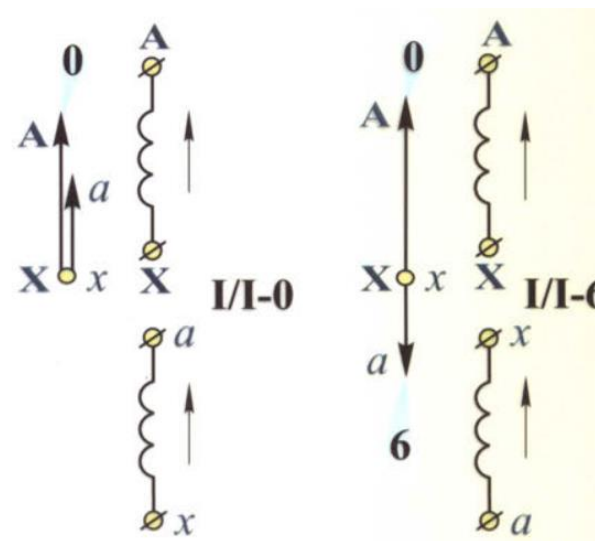


Однофазный трансформатор:

$E_1$  и  $E_2$  совпадают либо противоположны

- выбор начала и конца обмотки  $a - x$
- направление намотки

номер группы: циферблат часов (ВН на 12)  
или угол между векторами ЭДС /  $30^\circ$





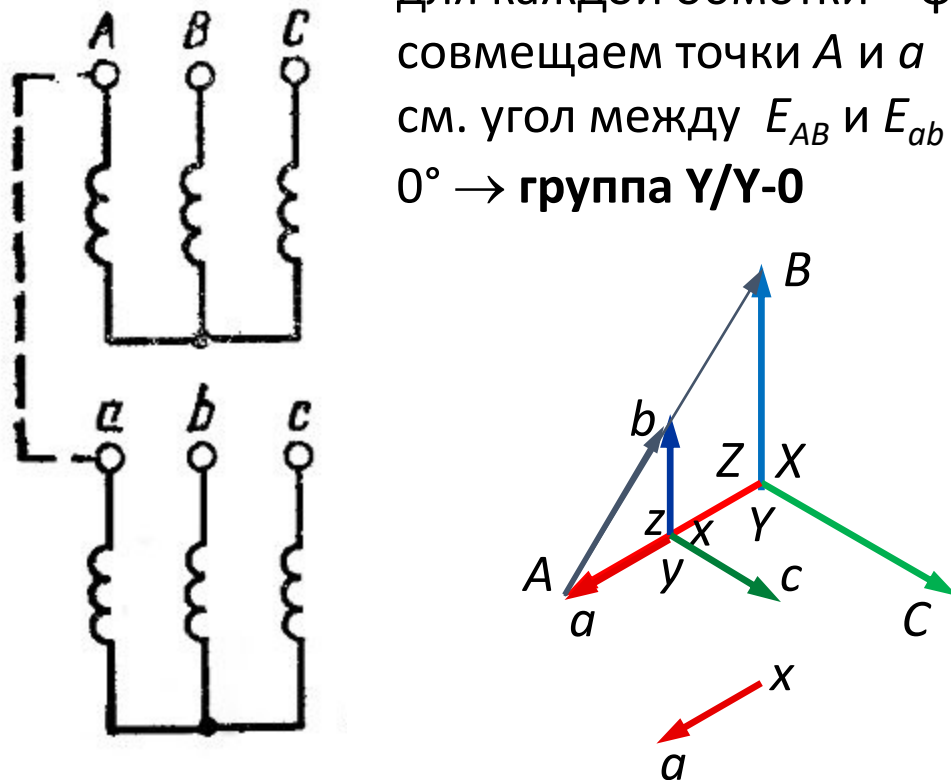
# Группы соединения обмоток

Трехфазный трансформатор

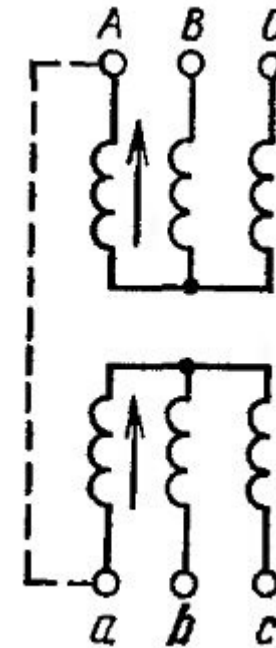
12 групп (от 0 до 11) – угол сдвига фаз между  
одноименными линейными ЭДС /  $30^\circ$

Рассмотрим пример

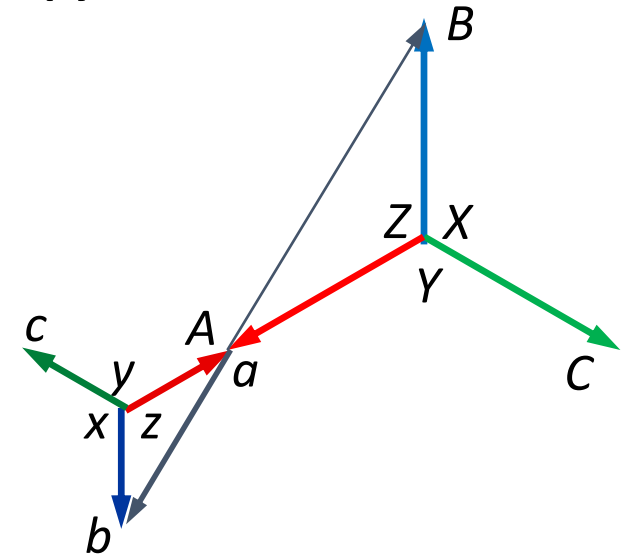
для каждой обмотки – фазные ЭДС  
совмещаем точки  $A$  и  $a$   
см. угол между  $E_{AB}$  и  $E_{ab}$   
 $0^\circ \rightarrow$  группа  $Y/Y-0$



Если в одной из обмоток поменять начала и  
концы фаз  $\rightarrow$  ЭДС повернутся на  $180^\circ \rightarrow$   
группа изменится на 6



группа  $Y/Y-6$



Правило работает для любой группы:  
новая группа = (группа + 6)

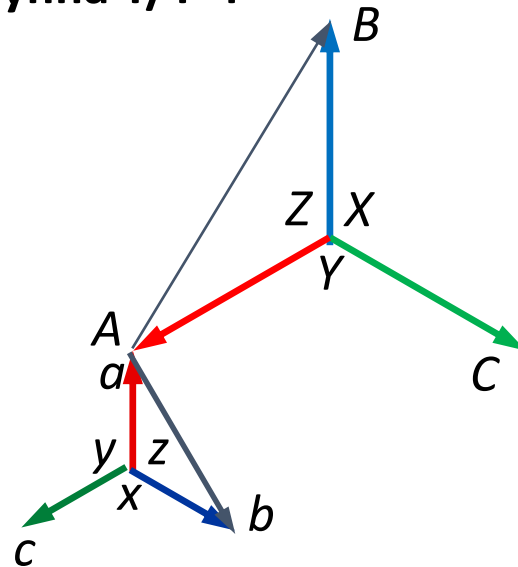
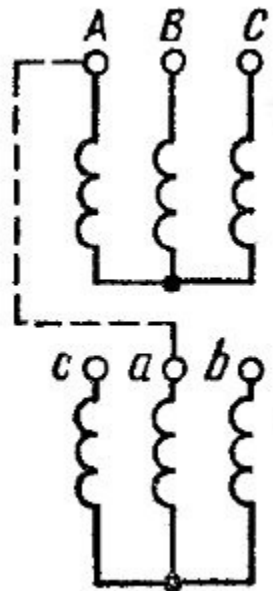
# Группы соединения обмоток

Трехфазный трансформатор

Если в одной из обмоток провести круговую перемаркировку фаз (сдвиг вправо)

→ группа изменится на 4 (группа + 4)

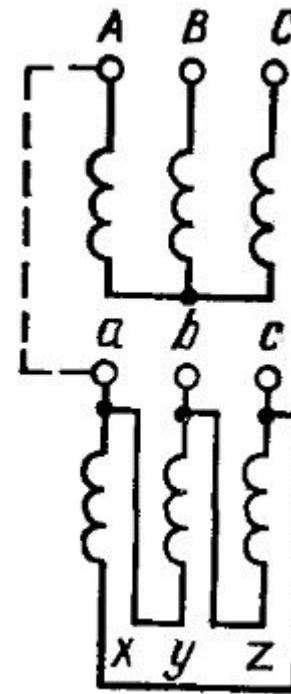
ЭДС фазы  $a$  совпадает с ЭДС фазы  $B$   
Угол между  $E_{AB}$  и  $E_{ab}$   $120^\circ$   
→ группа **Y/Y-4**



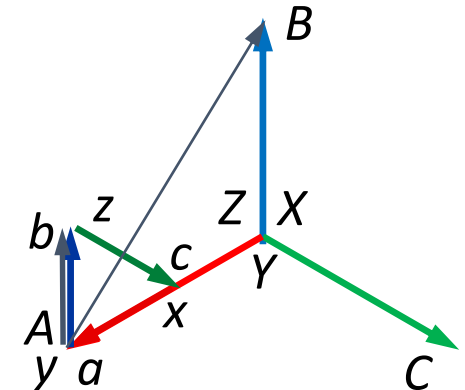
(еще один сдвиг вправо → группа 8)

В схемах Y/Y и  $\Delta/\Delta$  можно получить любую четную группу

Нечетные группы – в схемах Y/ $\Delta$  и  $\Delta/Y$



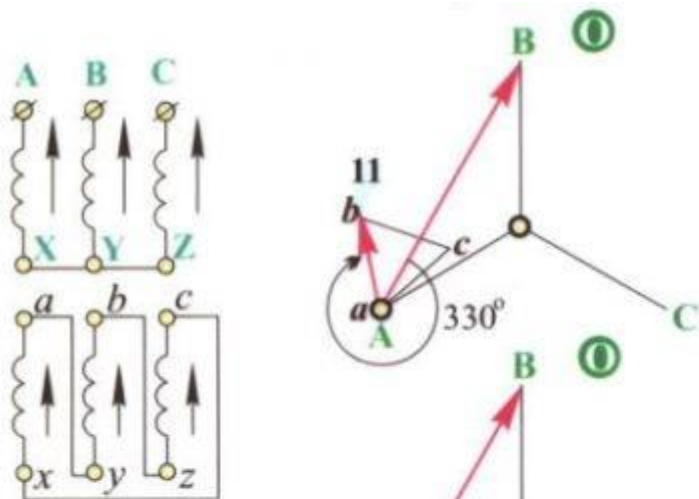
Например – группа **Y/ $\Delta$ -11**



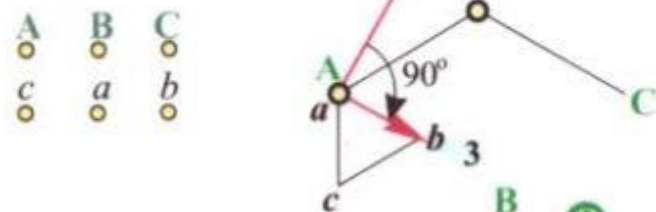
Сдвиг вправо – группы 3 и 7  
Перевернуть начала и концы фаз – группа 5  
(любые нечетные)

# Группы соединения обмоток

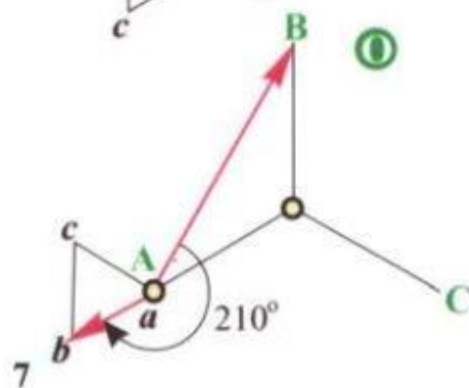
Y/Δ-11



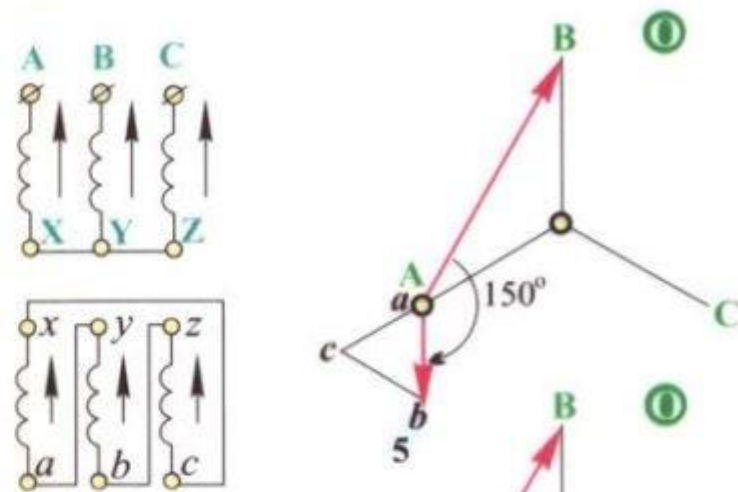
Y/Δ-3



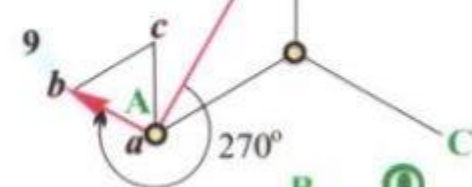
Y/Δ-7



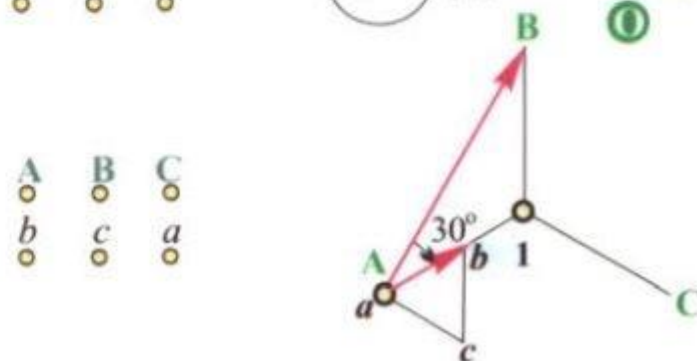
Y/Δ-5



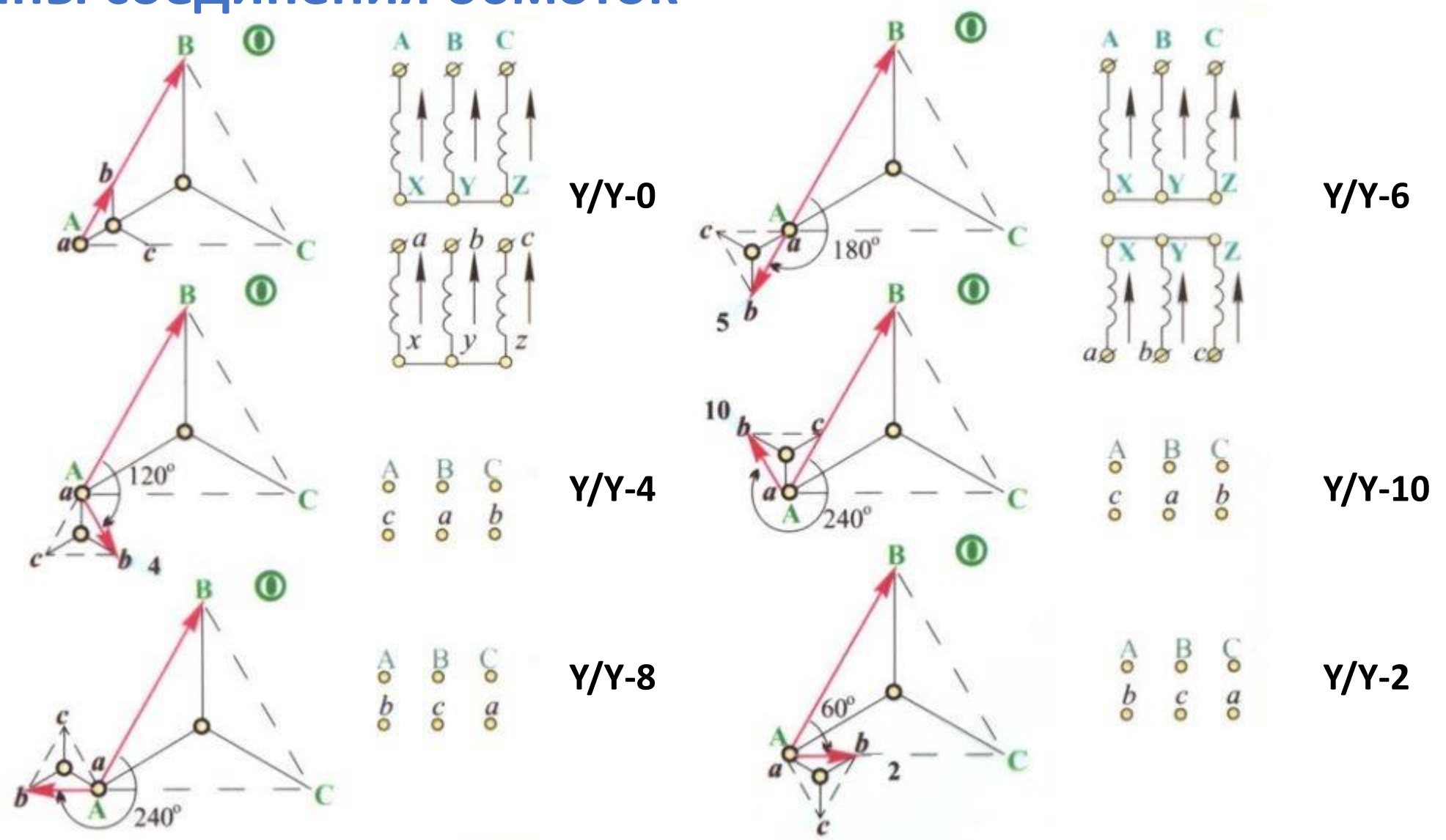
Y/Δ-9



Y/Δ-1



# Группы соединения обмоток

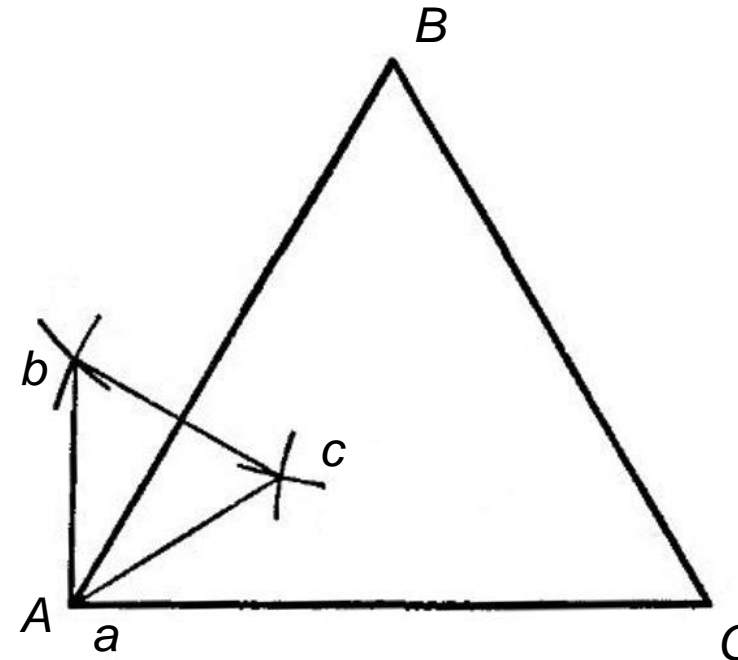


# Группы соединения обмоток

Трехфазный трансформатор

Экспериментальное определение группы трансформатора

- подключить тр-р к источнику симметричного  $U_1$
- соединить зажимы  $A$  и  $a$
- измерить линейные напряжения  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cc}$ ,  $U_{Cb}$ ,  $U_{Bc}$
- построить треугольник линейных напряжений ВН ( $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ )
- циркулем отложить измеренные напряжения
- на пересечении – вершины  $b$  и  $c$
- получили треугольник линейных напряжений НН ( $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca}$ )
- угол между  $U_{AB}$  и  $U_{ab} \rightarrow$  группа 11



Стандартные группы – Y/Δ-11 и Y/Y-0

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Параллельная работа  
трансформаторов



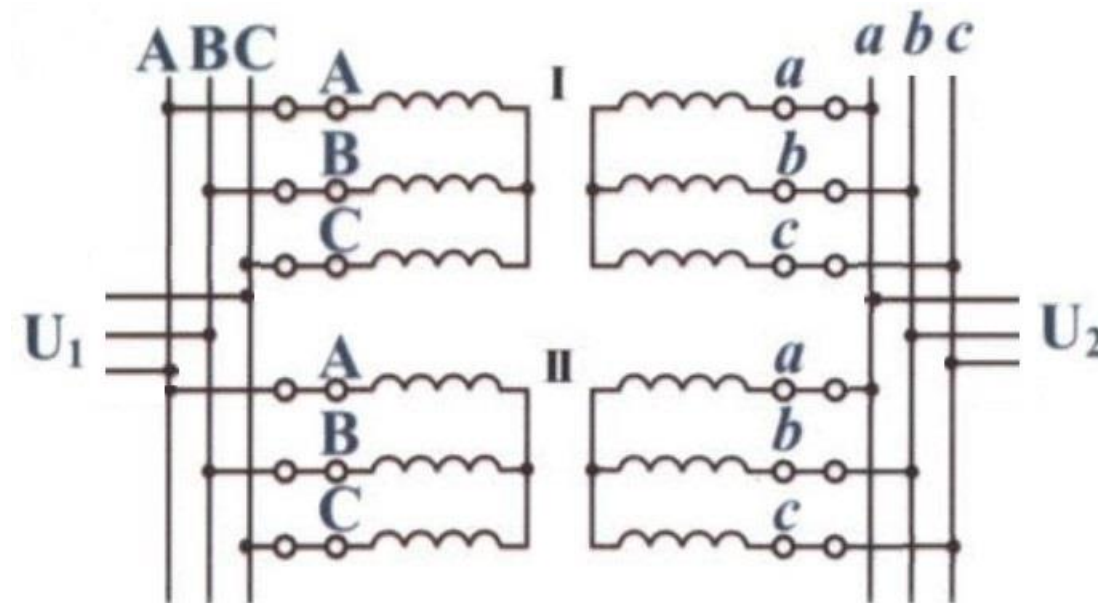
# Параллельная работа трансформаторов

Необходимость в параллельной работе:

- сезонные и суточные колебания нагрузки (минимизация потерь)
- резервирование электроснабжения (авария / ремонт)
- превышение максимальной единичной мощности
- рост / развитие потребления

Оптимальное включение:

- Каждый тр-р должен быть нагружен током, пропорциональным его номинальной мощности (тогда  $S_{\Sigma} = \sum S_{iH}$ )



Условия включения на параллельную работу:

- одинаковые  $U_{1H}$  и  $U_{2H}$  (равные  $k_T$ )
- одинаковые группы соединения
- одинаковые  $u_K$

# Параллельная работа трансформаторов

Работа при неодинаковых  $k_{\Gamma}$

Однофазные тр-ры:  $k_{\Gamma\alpha} < k_{\Gamma\beta}$

При одинаковых  $U_1$   $E_{2\alpha} = \frac{U_1}{k_{\Gamma\alpha}} > E_{2\beta} = \frac{U_1}{k_{\Gamma\beta}}$   
появится  $\Delta E = E_{2\alpha} - E_{2\beta}$

→ уравнивающий ток  $I_{2yp}$  между обмотками  
т.к. обмотки замкнуты друг на друга

$$\dot{I}_{2yp\alpha} = -\dot{I}_{2yp\beta} = \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{\kappa\alpha} + Z_{\kappa\beta}}$$

Если  $Z_{\kappa}$  равны, то  $I_{2yp} = I_{2yp\alpha} = I_{2yp\beta} = \frac{\Delta E}{2Z_{\kappa}}$

Выразим в о.е.

$$I'_{2yp} = \frac{\Delta E / Z_{\delta}}{2Z_{\kappa} / Z_{\delta}} = \frac{U_{1H} / I_{1H}}{2Z_{\kappa}} = \frac{\Delta E}{2 \frac{Z_{\kappa} I_{1H}}{U_{1H}}} = \frac{\Delta e}{2u_{\kappa}} I'_{2H}$$

Например, при  $\Delta e = 5\%$  и  $u_{\kappa} = 5\%$   $I_{2yp} = 0,5 I_{2H}$

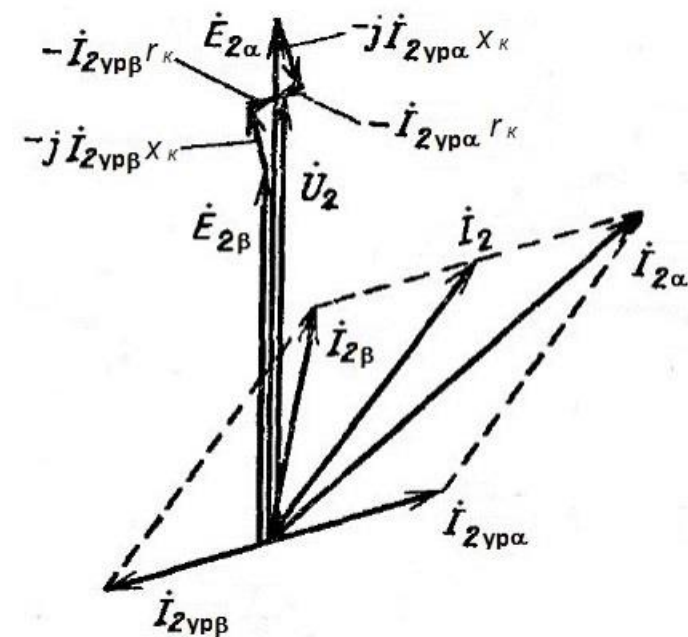
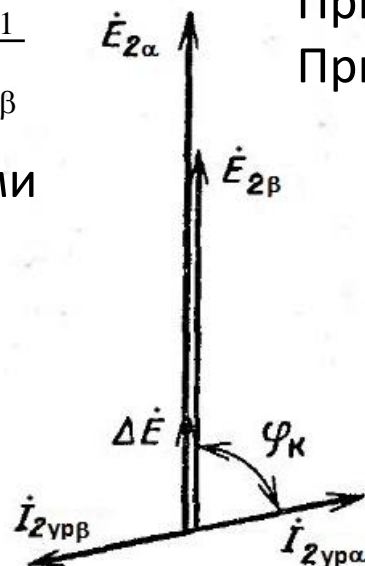
$I_{2yp}$  протекает при ХХ по  $z_{\kappa\alpha}$  и  $z_{\kappa\beta}$

В результате тр-ры формируют среднее  $U_2$

При включении  $U_2$  на нагрузку, возникает  $I_2$

При этом  $\dot{I}_{2\alpha} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{2yp\alpha}$

$$\dot{I}_{2\beta} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{2yp\beta}$$



Неравномерная нагрузка тр-ров ( $I_{2\alpha} > I_{2\beta}$ )

# Параллельная работа трансформаторов

## Работа при неодинаковых $k_T$

Неравномерная нагрузка тр-ров  
(больше нагружен тр-р с меньшим  $k_T$ )

Нельзя допускать перегрузку тр-ра:  
если  $I_{2\alpha} = I_{2\alpha H}$ , то  $I_{2\beta} < I_{2\beta H}$  (недогружен)

Полная мощность подстанции  
 $S_{\Sigma} < S_{\alpha H} + S_{\beta H}$  (недоиспользуется)

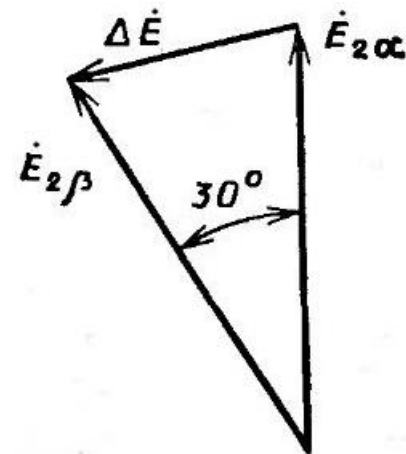
Допускается различие  $k_T$  не более  $\pm 0,5\%$   
(от среднего)

## Работа при неодинаковых группах соединения

При одинаковых  $U_1$  ЭДС  $E_{2\alpha}$ ,  $E_{2\beta}$  равны, но  
имеют разные фазы  $\rightarrow$  появится  $\Delta E$

Например, для групп 0 и 11 фазовый угол =  $30^\circ$

$$\Delta E = 2E_2 \sin \frac{30^\circ}{2} \approx 0,52E_2$$



Для групп 0 и 6 угол =  $180^\circ$

$$\Delta E = 2E_2$$

При соединении вторичных  
обмоток (даже на ХХ) под  
действием  $\Delta E$  возникает  
уравнительный ток (больше  
номинального, т.к. это КЗ)

Так делать нельзя! (но, возможно, удастся изменить группу)

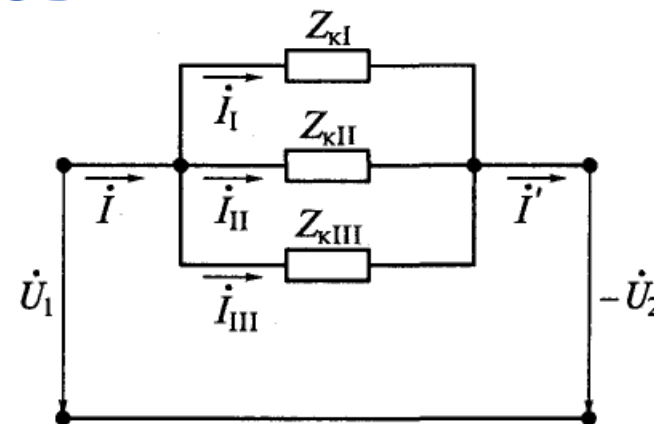
# Параллельная работа трансформаторов

## Работа при неодинаковых $U_K$

Напряжения одинаковы и уравнительных токов нет

Но ток нагрузки распределяется неравномерно

Пренебрегая намагничивающими токами,  
используем упрощенную схему замещения



Падения напряжений на тр-рах одинаковы  $I_I Z_{кI} = I_{II} Z_{кII} = I_{III} Z_{кIII}$

Токи обратно пропорциональны  $Z_K$   $I_I : I_{II} : I_{III} = \frac{1}{Z_{кI}} : \frac{1}{Z_{кII}} : \frac{1}{Z_{кIII}}$

Для каждого тр-ра  $I_1 = I'_2$  и его нагрузка  $\beta = \frac{I'_2}{I'_{2H}} = \frac{I_1}{I_{1H}}$  Для тр-ра  $i$  его нагрузка  $\beta_i = I_i / I_{iH}$

Выразим токи в о.е. (через % от  $I_H$ )

с учетом  $I_H Z_K = U_K$ , получим  $\beta_I : \beta_{II} : \beta_{III} = \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}} : \frac{1}{u_{кIII}}$

Больше нагружен тот тр-р,  
у которого  $u_K$  меньше

# Параллельная работа трансформаторов

Работа при неодинаковых  $u_k$

$$\beta_I : \beta_{II} : \beta_{III} = \frac{1}{u_{kI}} : \frac{1}{u_{kII}} : \frac{1}{u_{kIII}}$$

Для любого тр-ра относительный ток характеризует полную мощность в о.е.

$$\beta = \frac{I'_2}{I'_{2H}} = \frac{mU'_{2H}I'_2}{mU'_{2H}I'_{2H}} = \frac{S}{S_H} = S^*$$

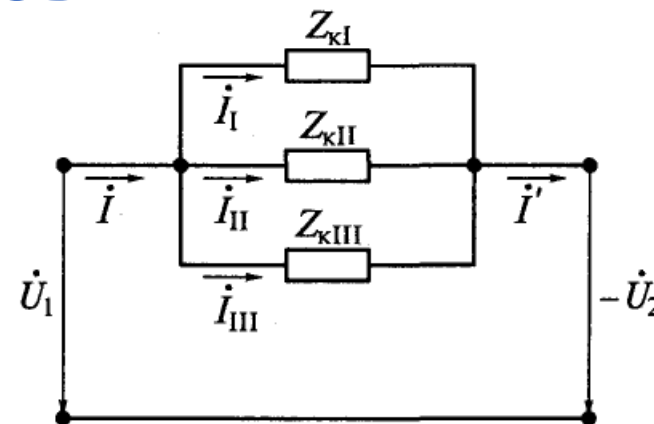
Тогда соотношение мощностей в о.е.  $S_I^* : S_{II}^* : S_{III}^* = \frac{1}{u_{kI}} : \frac{1}{u_{kII}} : \frac{1}{u_{kIII}}$

Тр-р с наименьшим  $u_k$  быстрее выйдет на  $S_H$

→ остальные будут недогружены

→  $S_\Sigma < \Sigma S_H$

Допускается различие  $u_k$  не более  $\pm 10\%$   
(от среднего)



Мощность одного из нескольких тр-ров

$$S_x = S_\Sigma \frac{S_{Hx} / u_{kx}}{\sum_i (S_{Hi} / u_{ki})}$$

# Параллельная работа трансформаторов

Сколько оставить включенных тр-ров?

Оптимально – минимум потерь

Построим зависимость потерь от нагрузки для 1, 2-х и 3-х включенных тр-ров

Пример:

- Подстанция с 3 одинаковыми тр-ми
  - $S_H = 1000$  кВА
  - $P_0 = 2,45$  кВт
  - $P_K = 12,2$  кВт
- При нагрузках  $\beta < 0,66$  выгодно использовать 1 тр-р
  - При нагрузках  $0,66 < \beta < 1,22$  выгодно использовать 2 тр-ра
  - При нагрузках  $\beta > 1,22$  выгодно использовать 3 тр-ра

