

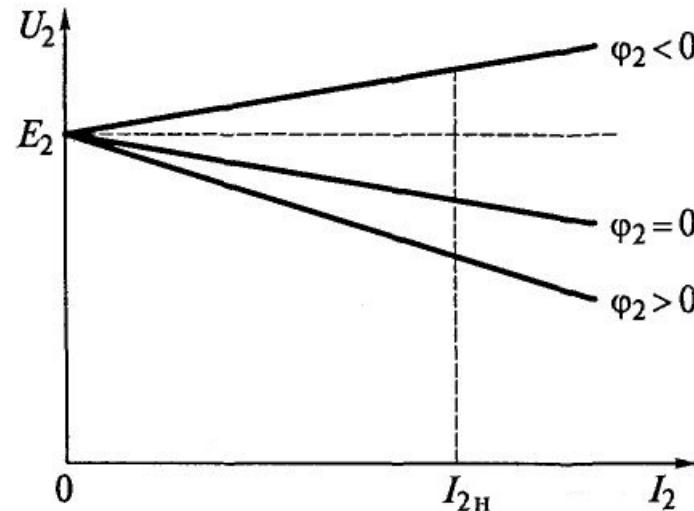
ТРАНСФОРМАТОРЫ

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 $f_1 = \text{const}$

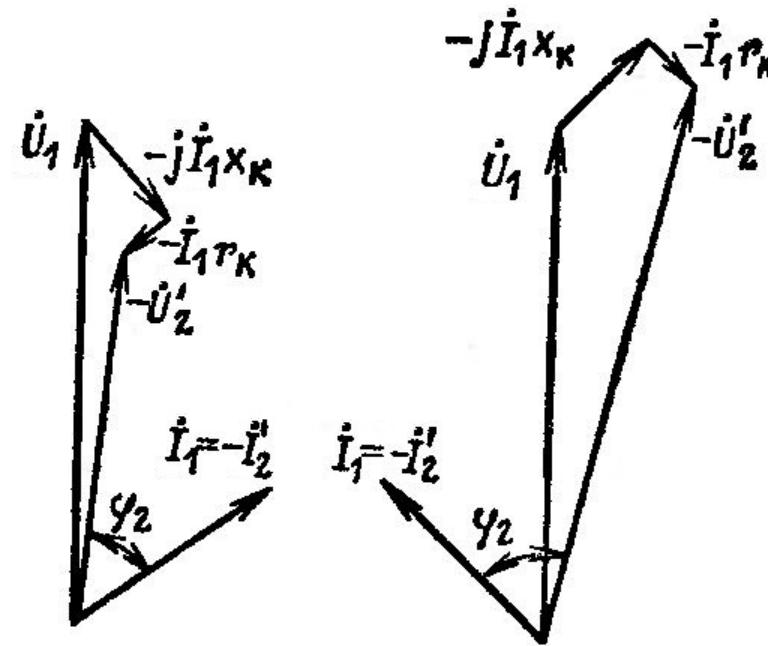
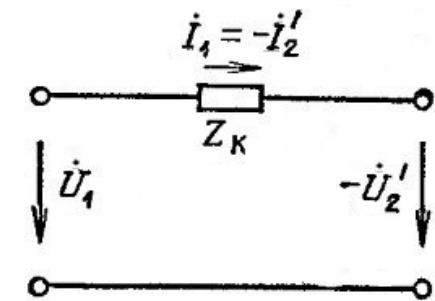


На ХХ $I_2 = 0$, $U_2 = E_{20}$ (номинальное U_2)

По мере роста нагрузки (I_2) растет ΔU

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

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

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

Пренебрегая $|AB|$ (при малых α) $U_1 \approx |0B|$

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

При нагрузке $\Delta U \approx |BC|$

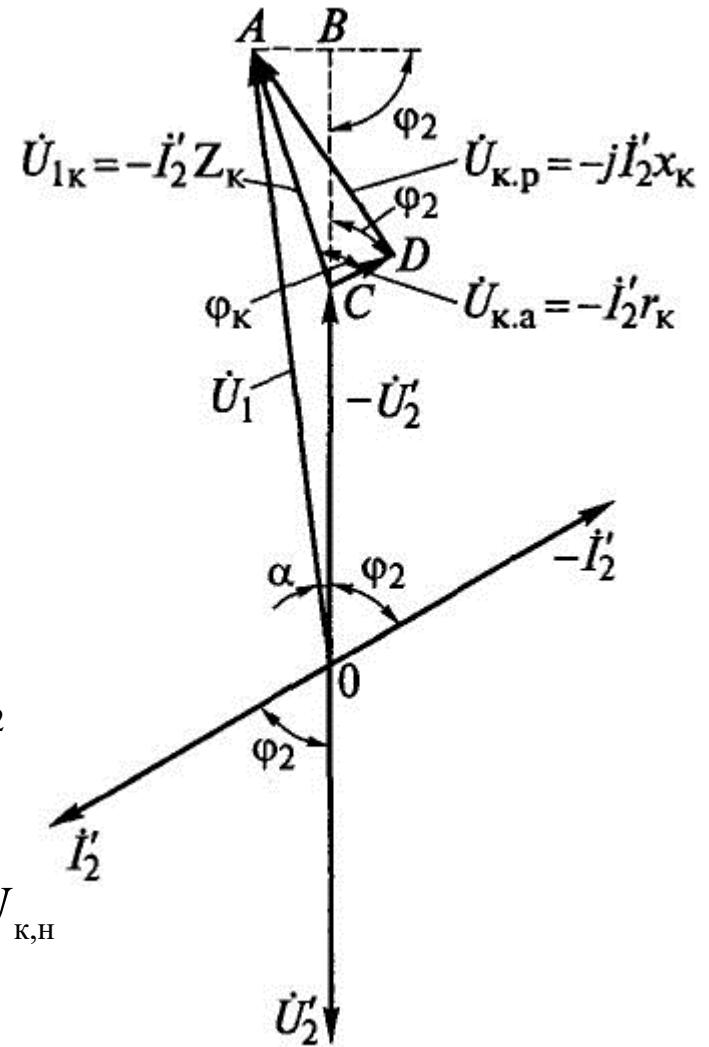
$$\Delta U \approx |BC| = U_{1k} \cos(\varphi_k - \varphi_2)$$

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

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

$$\text{тогда произвольное } U_k: U_{1k} = I'_2 Z_k = \frac{I'_{2,n}}{I'_{2,n}} I'_2 Z_k = \frac{I'_2}{I'_{2,n}} I'_{2,n} Z_k = \beta U_{k,n}$$

$$\beta = \frac{I'_2}{I'_{2,n}} \quad \text{– коэффициент нагрузки}$$



Изменение напряжения трансформатора

Изменение напряжения

$$\Delta U = \beta (U_{k,a,h} \cos \varphi_2 + U_{k,p,h} \sin \varphi_2)$$

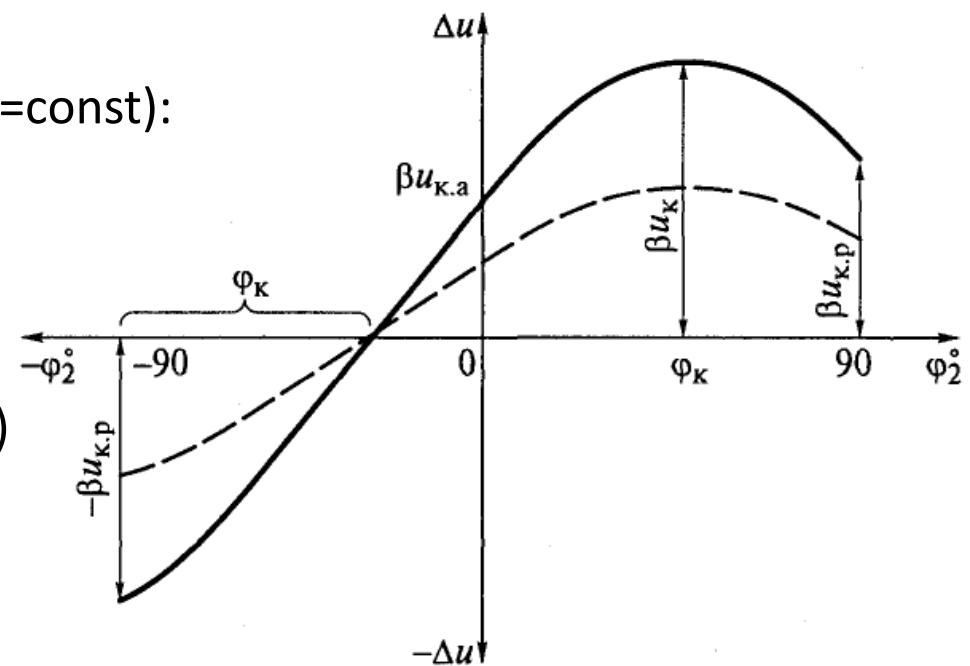
В паспортных данных u_k в процентах

Выразим ΔU в процентах (разделив на $U_{1,h}$)

$$\Delta u = \beta (u_{k,a} \cos \varphi_2 + u_{k,p} \sin \varphi_2)$$

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

- при $\varphi_2 = 0^\circ$ $\Delta u = \beta u_{k,a}$ (активная нагрузка)
- при $\varphi_2 = 90^\circ$ $\Delta u = \beta u_{k,p}$ (индуктивная нагрузка)
- при $\varphi_2 = -90^\circ$ $\Delta u = -\beta u_{k,p}$ (емкостная нагрузка)
- при $\varphi_2 = \varphi_k$ $\Delta u = \beta u_k$ (максимальное Δu)
- $\Delta u = 0$ при $\varphi_k - \varphi_2 = 90^\circ$ или $\varphi_2 = -90^\circ + \varphi_k$ (нужна емкость)

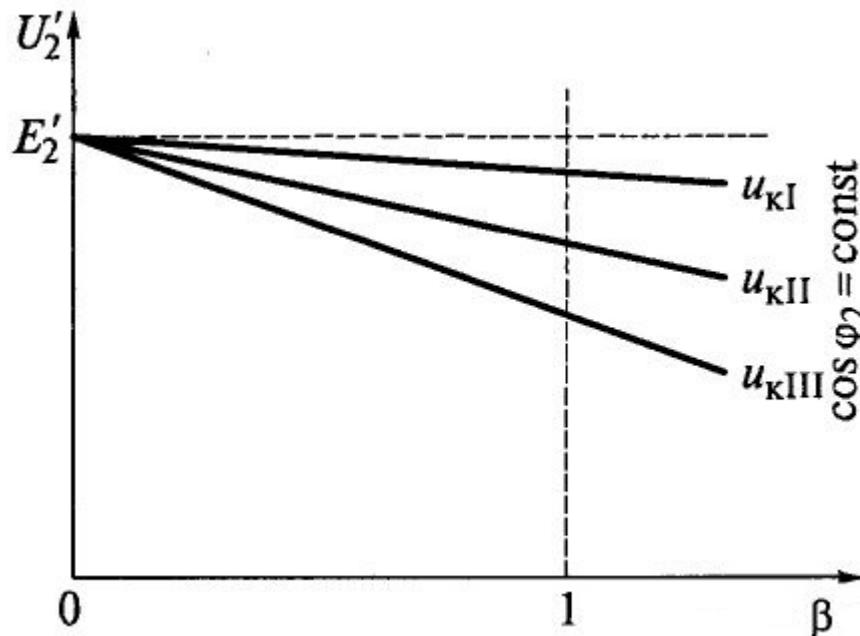


Изменение напряжения трансформатора

Если на векторной диаграмме не пренебречь α ($|AB|$),
можно вывести более точную формулу (Δu в %)

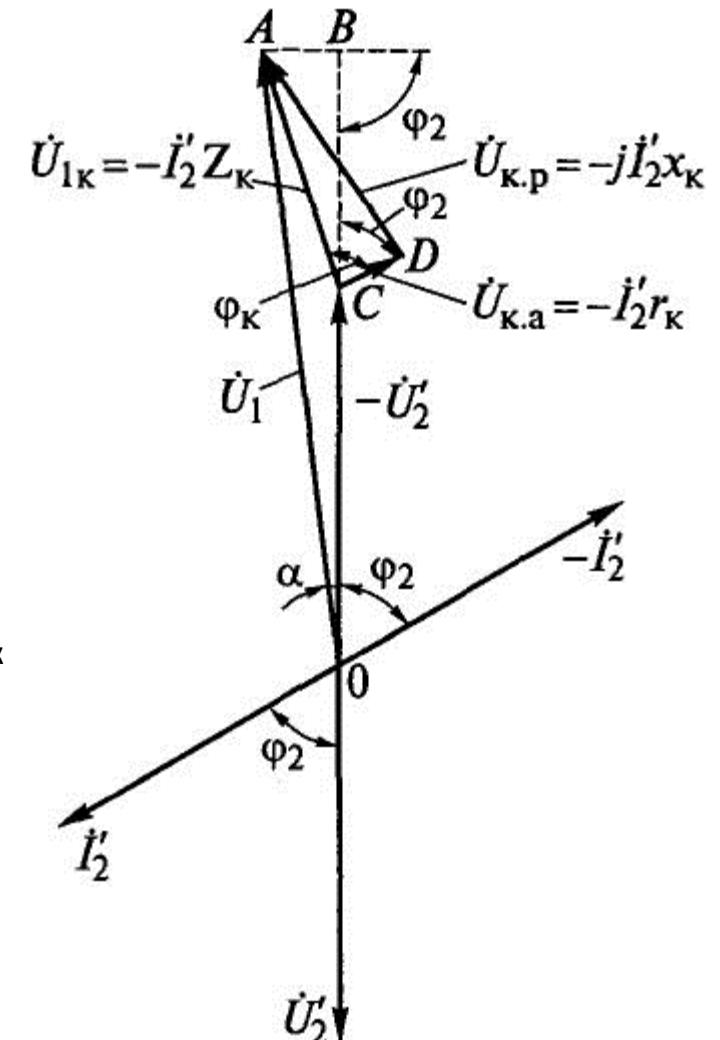
$$\Delta u = \beta \left(u_{k,a} \cos \varphi_2 + u_{k,p} \sin \varphi_2 \right) + \beta^2 \frac{\left(u_{k,p} \cos \varphi_2 - u_{k,a} \sin \varphi_2 \right)^2}{200}$$

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 ΔU_2

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

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

Проблемы:

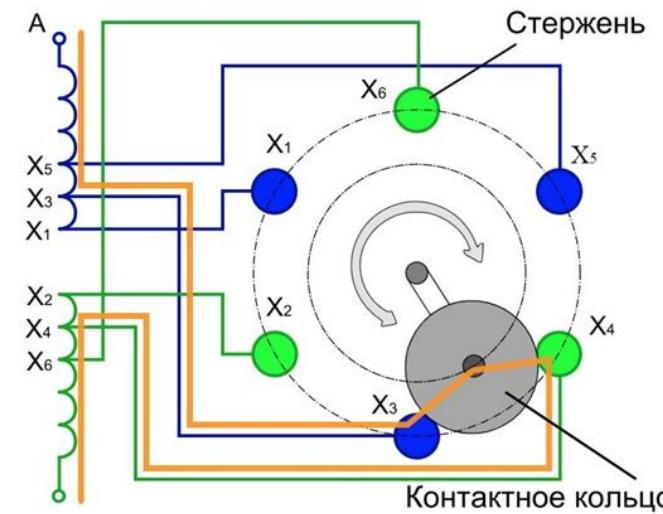
- нельзя разрывать цепь тока
- нельзя закорачивать витки между отводами

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 ΔU_2

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

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

Проблемы:

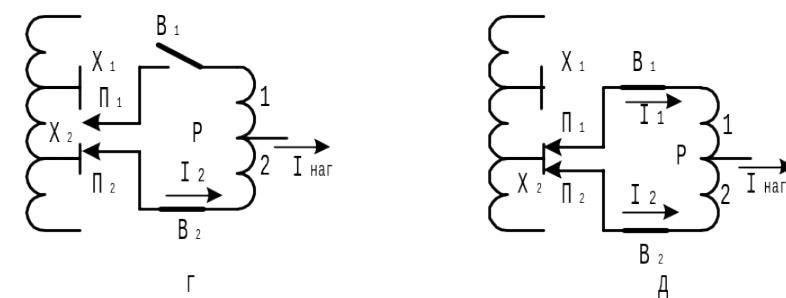
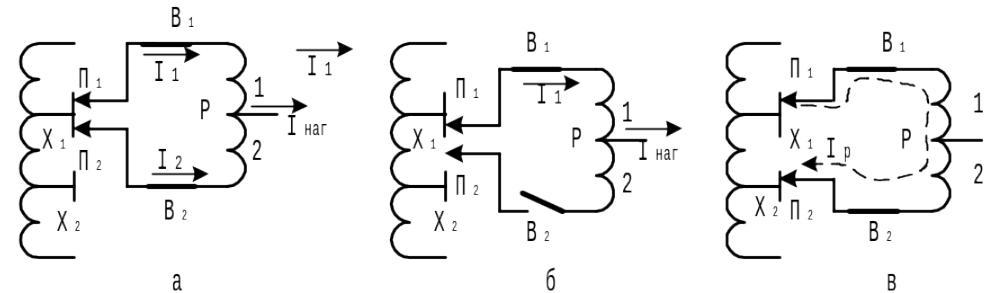
- нельзя разрывать цепь тока
- нельзя закорачивать витки между отводами

Два вида переключения

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

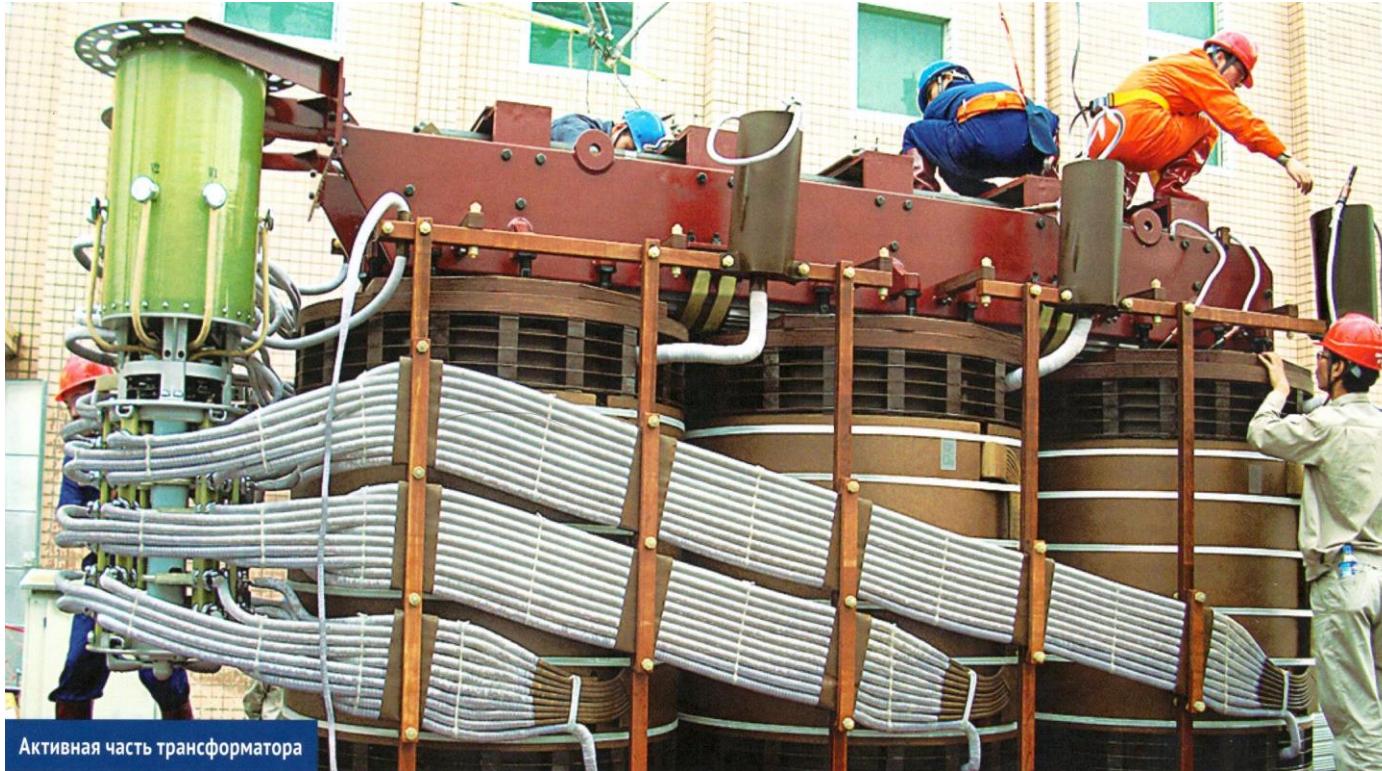
Трансформаторы с регулированием под нагрузкой

- 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 $\Sigma P = P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб1}} + P_{\text{доб2}} + P_{\text{м}} + P_{\text{дэ}}$

Электрические потери $\sim I^2$

$$P_{\text{э1}} = mI_{1\phi}^2 r_1 \quad P_{\text{э2}} = mI_{2\phi}^2 r_2 = mI_{2\phi}'^2 r_2'$$

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

Все эл.потери можно выразить через $P_{\text{к}}$ (при $I'_{2\text{H}}$)

$$P_{\text{э1}} + P_{\text{доб1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб2}} = P_{\text{к}} \left(\frac{I'_2}{I'_{2\text{H}}} \right)^2 = P_{\text{к}} \beta^2$$

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

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

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 ΔU)

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

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

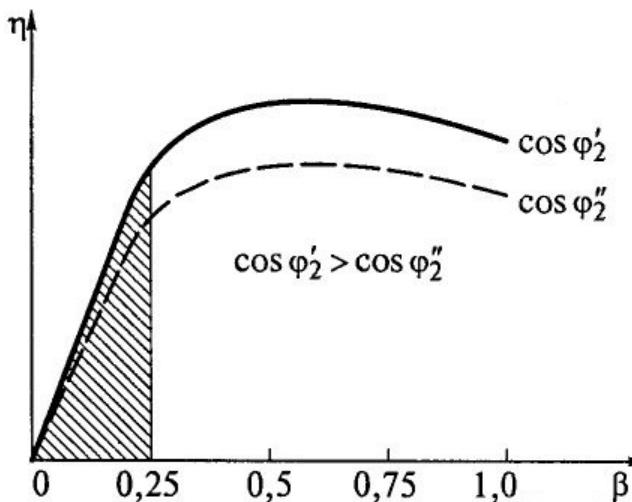
(удобно для практических расчетов)

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 β



Найдем производную по β , приравняем 0

Тогда: максимум КПД при такой нагрузке, когда равны переменные и постоянные потери

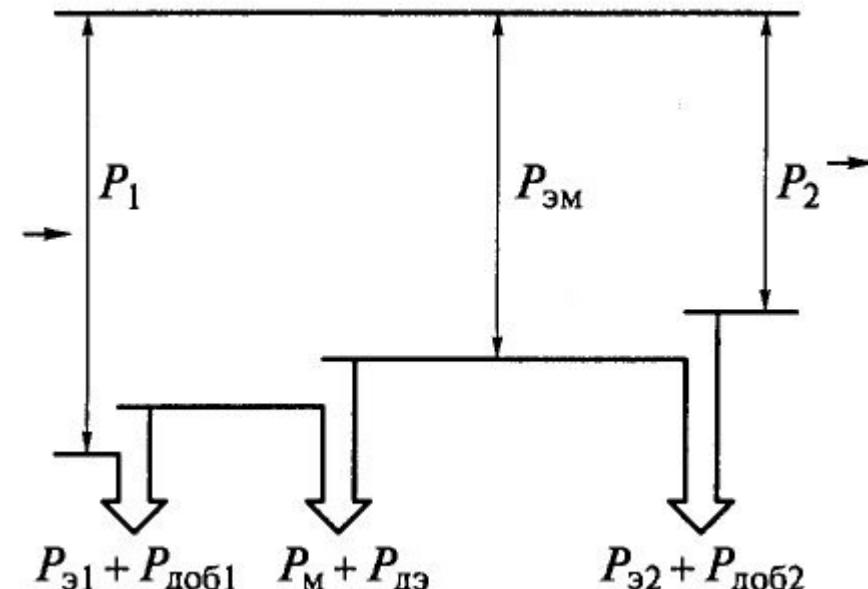
$$P_k \beta^2 = P_0; \quad \beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}$$

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

Обычно $\beta_{max} = 0,5...0,7$

При малых нагрузках эксплуатация невыгодна

Энергетическая диаграмма



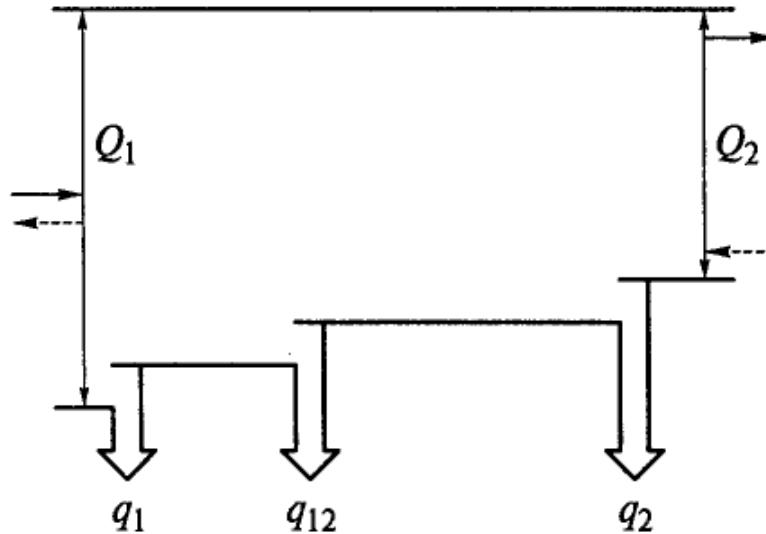
Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = mE_1 I_1 \cos \psi_1 = mE'_2 I'_2 \cos \psi_2$$

ψ – 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 Φ_{12}

$$Q_2 = mU_2 I_2 \sin \varphi_2 = mU'_2 I'_2 \sin \varphi_2$$

$$q_1 = mI_1^2 x_1$$

$$q_2 = mI_2^2 x_2 = mI'_2 x'_2$$

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

ТРАНСФОРМАТОРЫ

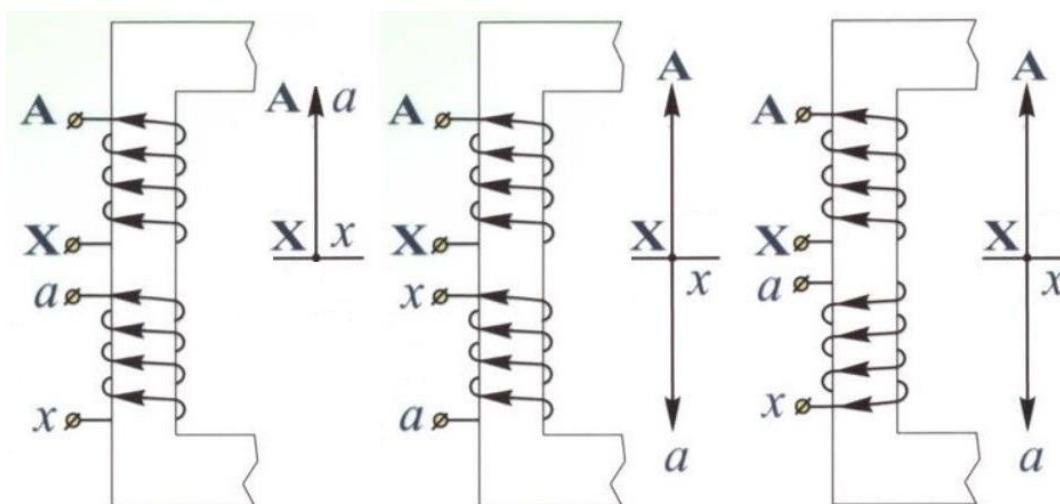
Группы соединения обмоток

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 *группу соединения обмоток*

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

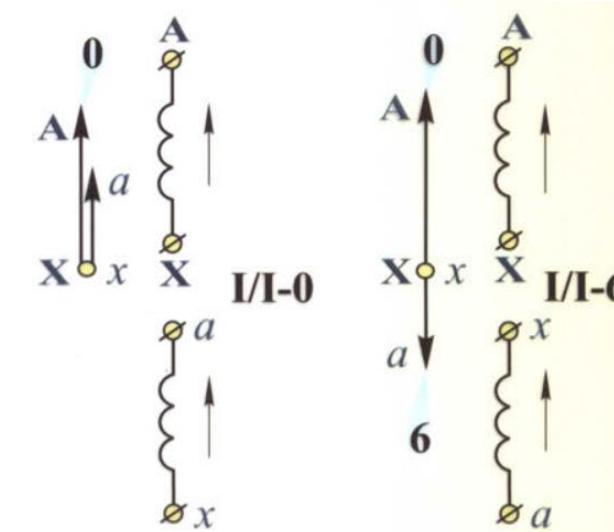


Однофазный трансформатор:

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°

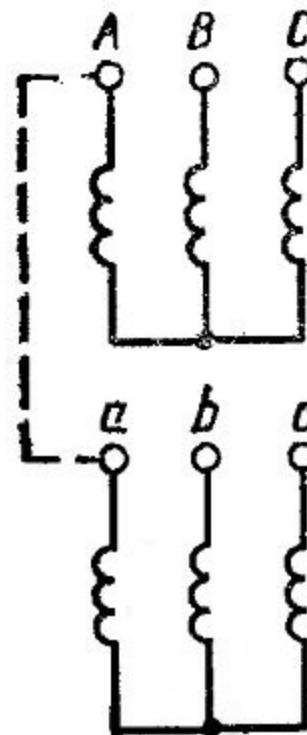


Группы соединения обмоток

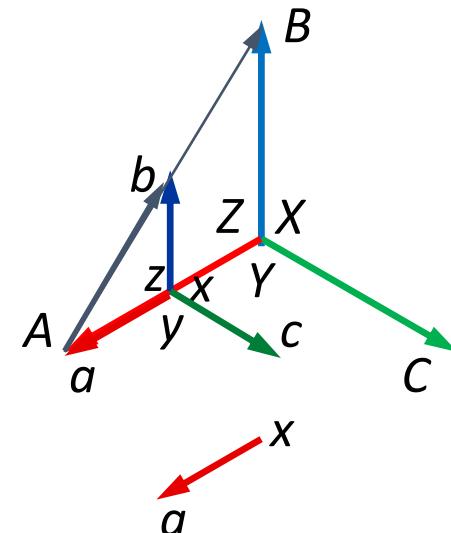
Трехфазный трансформатор

12 групп (от 0 до 11) – угол сдвига фаз между одноименными линейными ЭДС / 30°

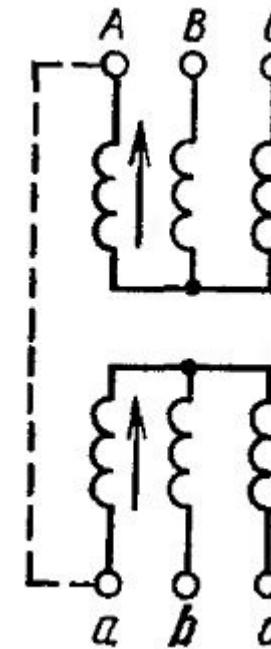
Рассмотрим пример



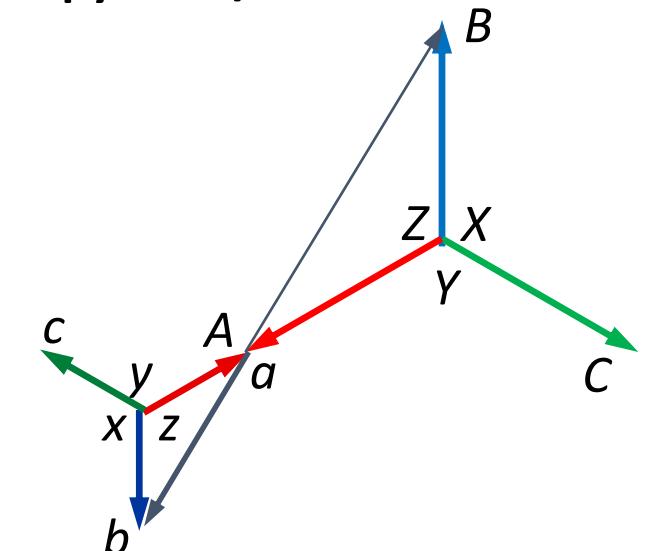
для каждой обмотки – фазные ЭДС
совмещаем точки A и a
см. угол между E_{AB} и E_{ab}
 $0^\circ \rightarrow$ группа $Y/Y-0$



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



группа $Y/Y-6$



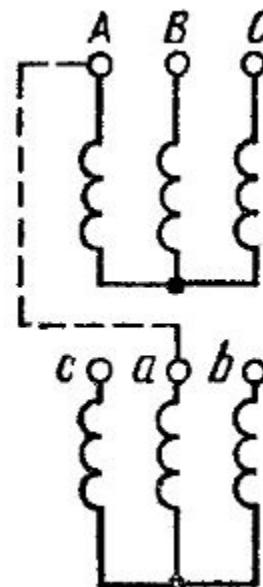
Правило работает для любой группы:
новая группа = (группа + 6)

Группы соединения обмоток

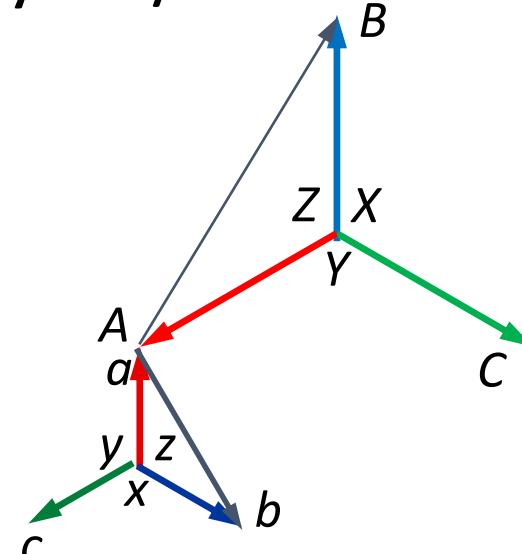
Трехфазный трансформатор

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

→ группа изменится на 4 (группа + 4)



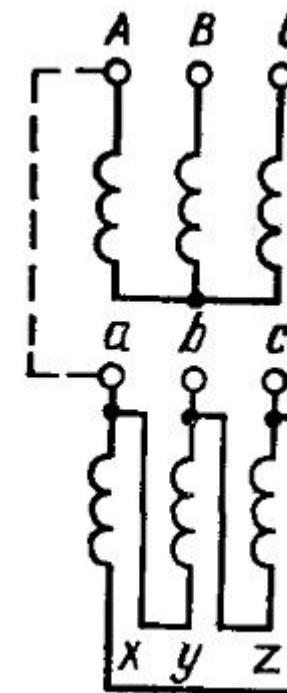
ЭДС фазы a совпадает с ЭДС фазы B
Угол между E_{AB} и E_{ab} 120°
→ группа $Y/Y-4$



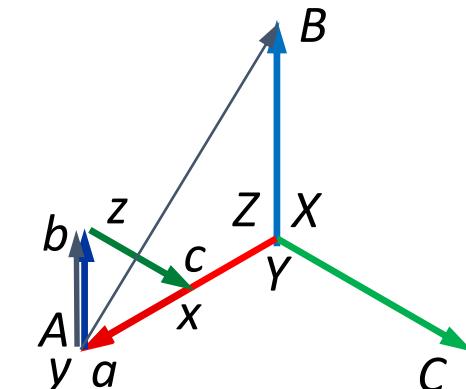
(еще один сдвиг вправо → группа 8)

В схемах Y/Y и Δ/Δ можно получить любую
четную группу

Нечетные группы – в схемах Y/Δ и Δ/Y



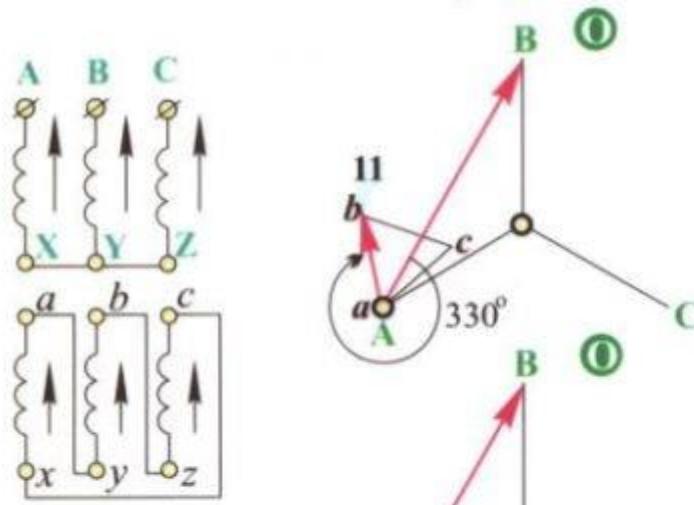
Например – группа $Y/\Delta-11$



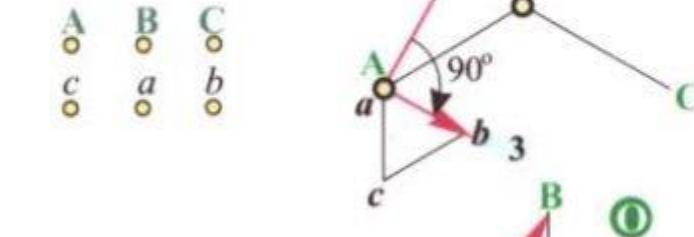
Сдвиг вправо – группы 3 и 7
Перевернуть начала и
концы фаз – группа 5
(любые нечетные)

Группы соединения обмоток

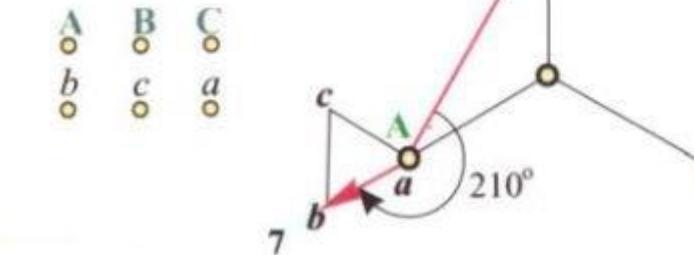
$Y/\Delta-11$



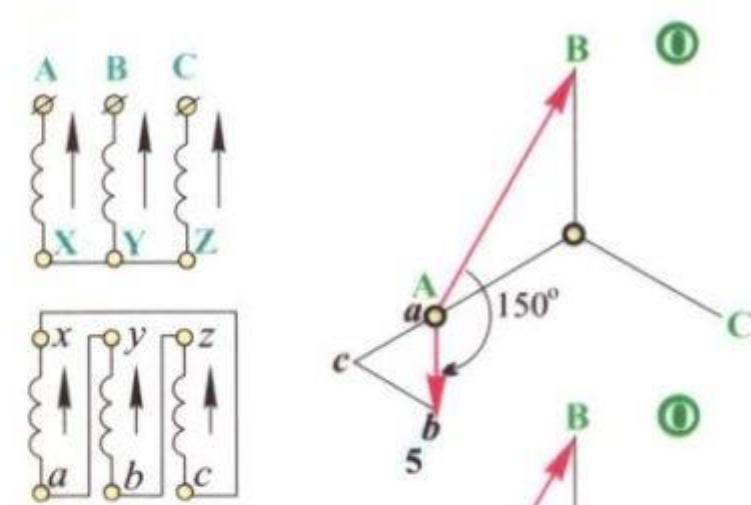
$Y/\Delta-3$



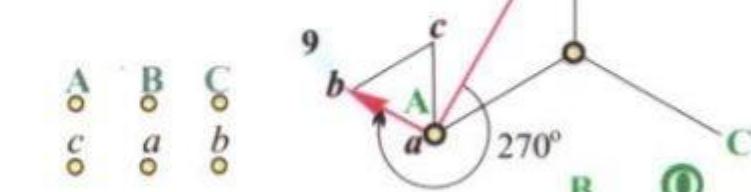
$Y/\Delta-7$



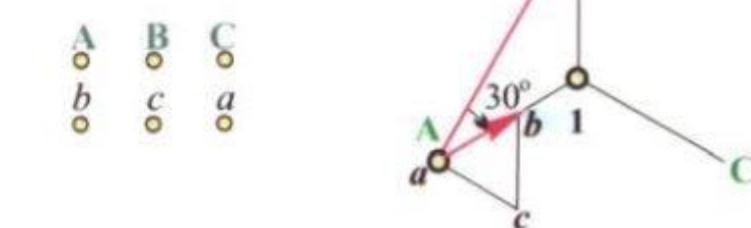
$Y/\Delta-5$



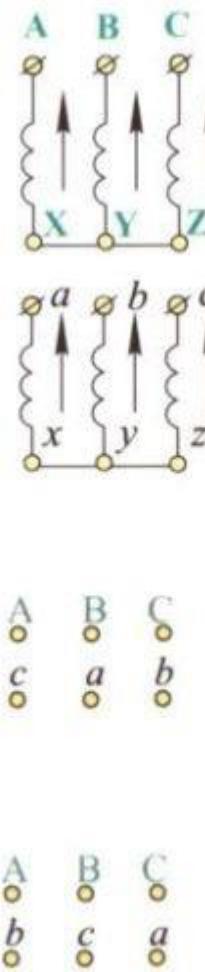
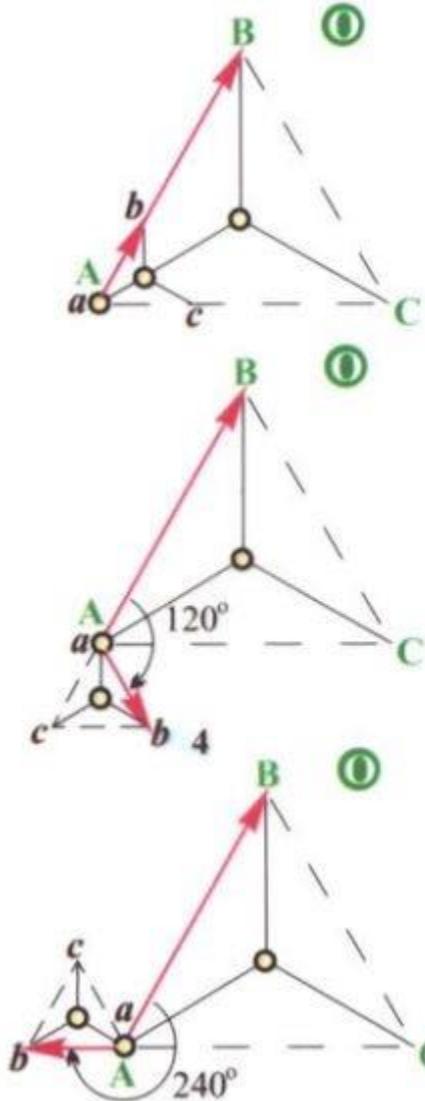
$Y/\Delta-9$



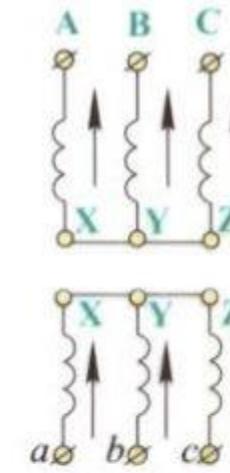
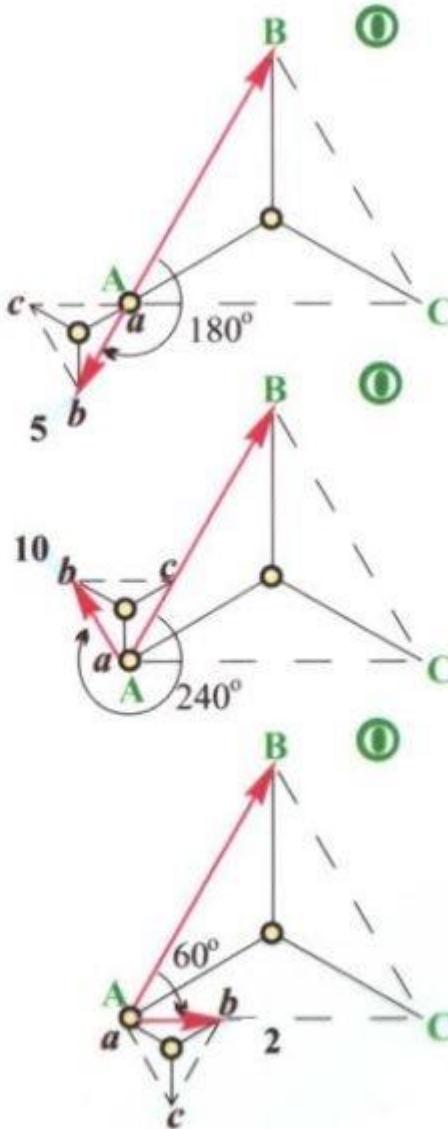
$Y/\Delta-1$



Группы соединения обмоток

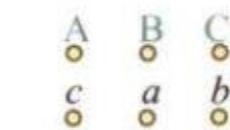
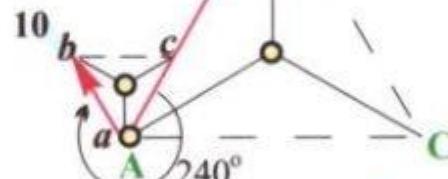


Y/Y-0



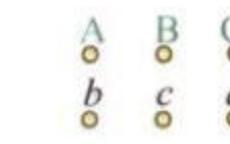
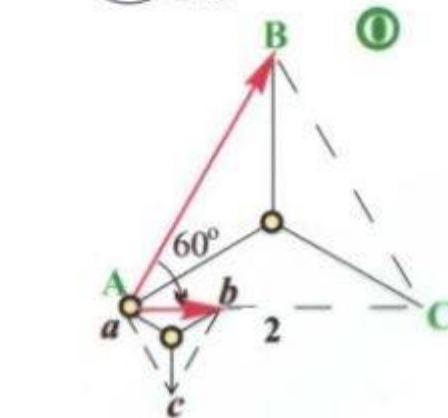
Y/Y-6

Y/Y-4



Y/Y-10

Y/Y-8



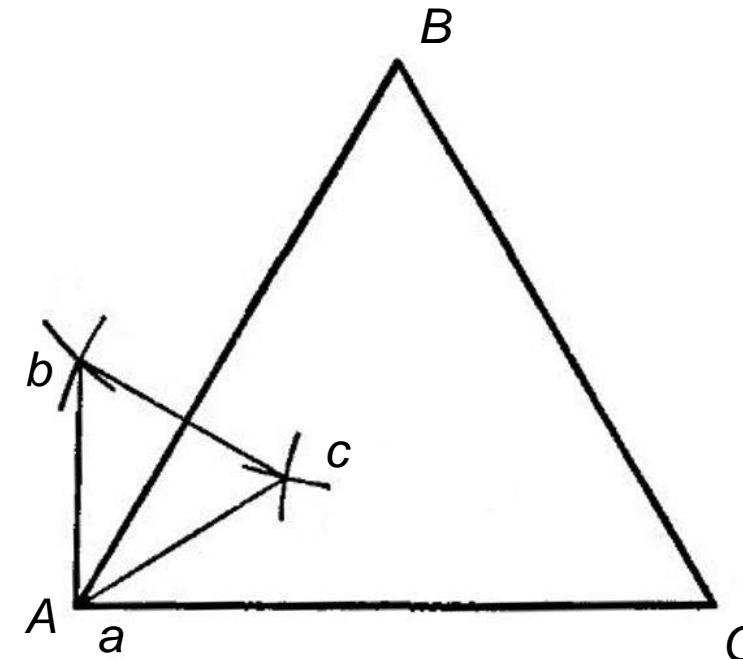
Y/Y-2

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 – $Y/\Delta-11$ и $Y/Y-0$

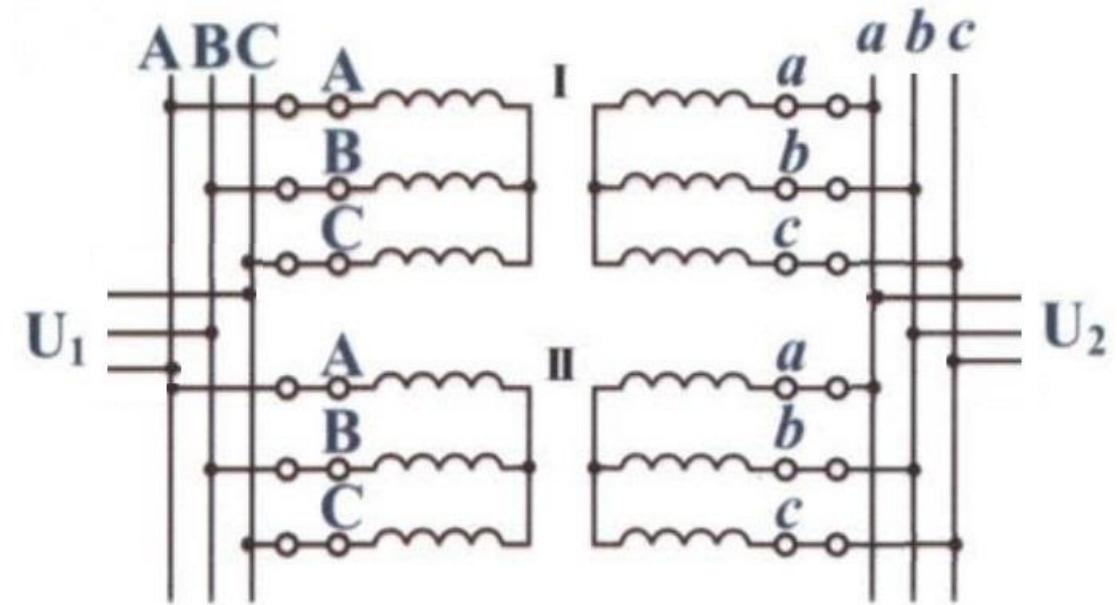
ТРАНСФОРМАТОРЫ

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_t

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

При одинаковых U_1 $E_{2\alpha} = \frac{U_1}{k_{t\alpha}} > E_{2\beta} = \frac{U_1}{k_{t\beta}}$
появится $\Delta E = E_{2\alpha} - E_{2\beta}$
→ уравнительный ток $I_{2\text{уп}}$ между обмотками
т.к. обмотки закорочены друг на друга

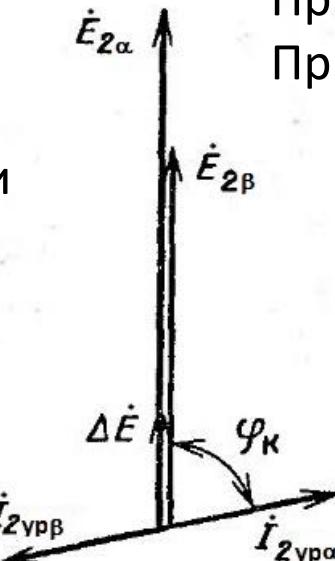
$$\dot{I}_{2\text{уп}\alpha} = -\dot{I}_{2\text{уп}\beta} = \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{k\alpha} + Z_{k\beta}}$$

Если Z_k равны, то $I_{2\text{уп}} = I_{2\text{уп}\alpha} = I_{2\text{уп}\beta} = \frac{\Delta E}{2Z_k}$

Выразим в о.е.

$$I'_{2\text{уп}} = \frac{\Delta E / Z_6}{2Z_k / Z_6} = \frac{U_{1\text{H}} / I_{1\text{H}}}{2Z_k} = \frac{U'_{2\text{H}}}{2Z_k I_{1\text{H}}} = \frac{\Delta e}{2u_k} I'_{2\text{H}}$$

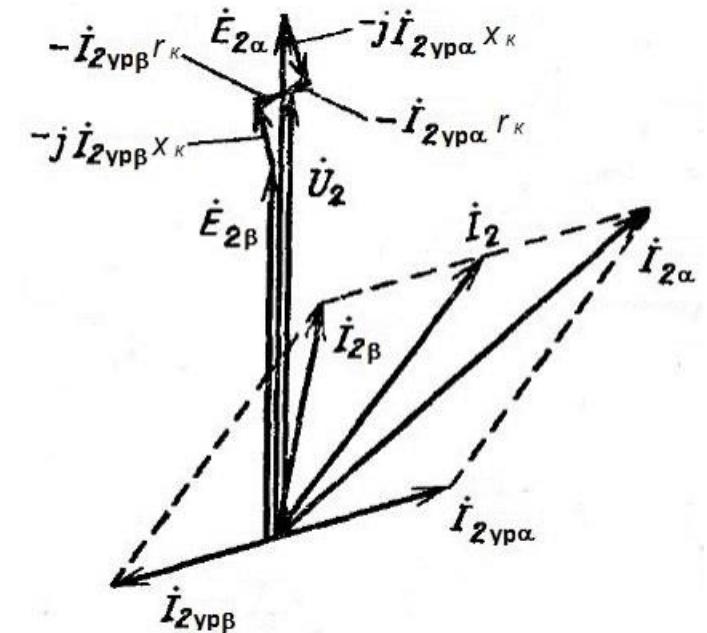
Например, при $\Delta e = 5\%$ и $u_k = 5\%$ $I_{2\text{уп}} = 0,5I_{2\text{H}}$



$I_{2\text{уп}}$ протекает при ХХ по $z_{k\alpha}$ и $z_{k\beta}$
В результате тр-ры формируют среднее U_2
При включении U_2 на нагрузку, возникает I_2

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

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



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 $I_{2\alpha} = I_{2\alpha\text{н}}$, то $I_{2\beta} < I_{2\beta\text{н}}$ (недогружен)

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

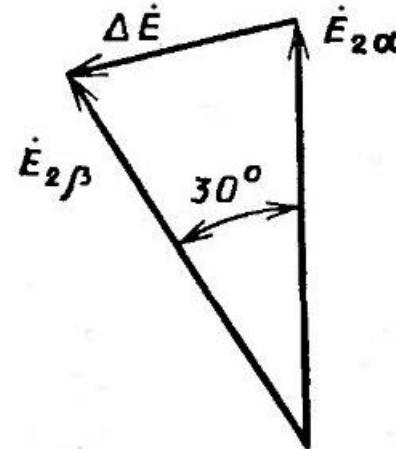
Допускается различие k_t не более $\pm 0,5\%$
(от среднего)

Работа при неодинаковых группах соединения

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

Например, для групп 0 и 11 фазовый угол = 30°

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



Для групп 0 и 6 угол = 180°

$$\Delta E = 2E_2$$

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

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

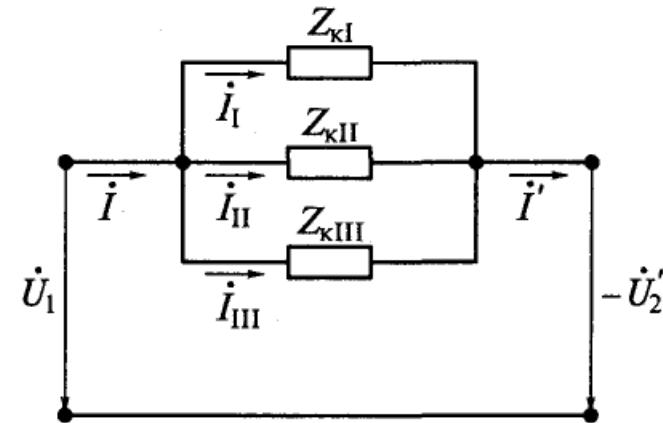
Параллельная работа трансформаторов

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 $I_1 Z_{kI} = I_{II} Z_{kII} = I_{III} Z_{kIII}$

Токи обратно пропорциональны Z_k $I_1 : I_{II} : I_{III} = \frac{1}{Z_{kI}} : \frac{1}{Z_{kII}} : \frac{1}{Z_{kIII}}$

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_{1H})

с учетом $I_{1H} Z_k = U_k$, получим $\beta_I : \beta_{II} : \beta_{III} = \frac{1}{u_{kI}} : \frac{1}{u_{kII}} : \frac{1}{u_{kIII}}$

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.

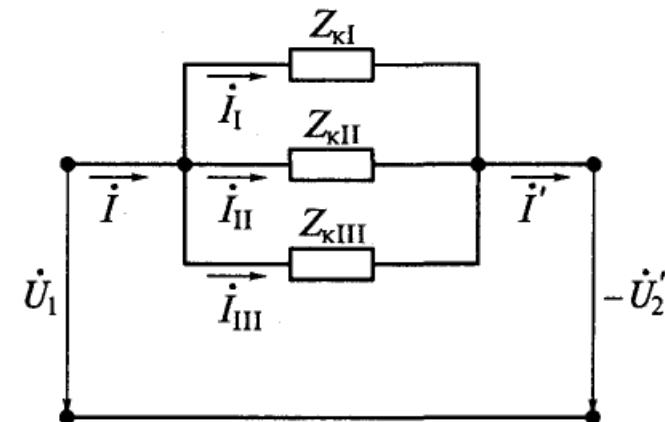
$$\beta = \frac{I'_2}{I'_{2H}} = \frac{mU'_{2H}I'_2}{mU'_{2H}I'_{2H}} = \frac{S}{S_H} = S^*$$

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

$$\rightarrow S_{\Sigma} < \sum S_H$$

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

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

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

