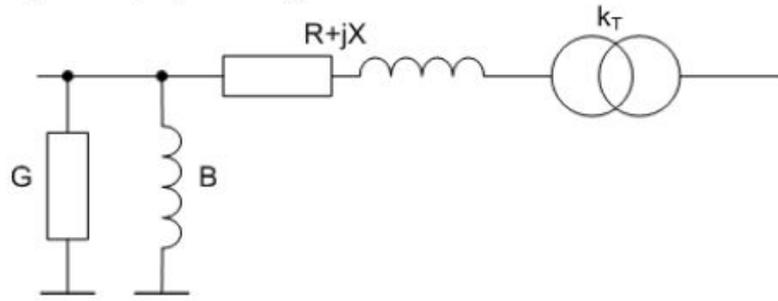


**Схемы замещения трансформаторов и  
автотрансформаторов.**

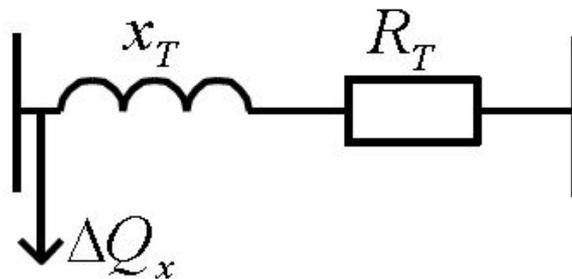
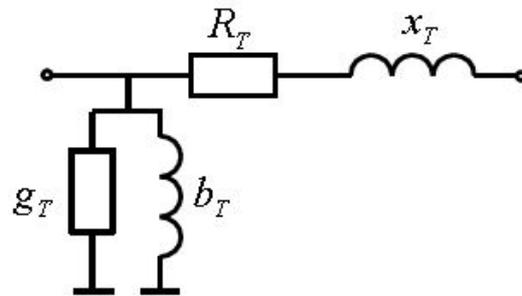
**Регулирование коэффициента  
трансформации.**

## Схема замещения двухобмоточного трансформатора.

В общем случае Г образная схема замещения трансформатора имеет вид;



В расчетах установившихся режимов (в случае приведения параметров схемы замещения к одной ступени напряжения), как правило, применяются упрощенные Г-образные схемы замещения:



Параметры схемы замещения определяются на основании опытов х.х. и к.з.:  $\Delta P_{xx} [кВт], I_x [\%], u_k [\%], \Delta P_x [кВт]$

Для мощных трансформаторов справедливо:

$$R_T \ll x_T, z_T \cong x_T.$$

Из опыта к.з.

$$z_T \cong x_T = \frac{U_k}{I_{ном}} = \frac{u_k [\%] \cdot U_{\phi ном}}{100 \cdot \frac{S_{\phi ном}}{U_{\phi ном}}} = \frac{u_k [\%] \cdot 3 \cdot U_{\phi ном}^2}{100 \cdot 3 \cdot S_{\phi ном}} = \frac{u_k [\%] \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot S_{T ном}}.$$

$$\Delta P_k = 3 \cdot I_{ном}^2 \cdot R_T, R_T = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot I_{ном}^2} = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot \frac{(S_{\phi ном})^2}{(U_{\phi ном})^2}} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{ном}^2}{S_{T ном}^2}.$$

$$\frac{R_T}{x_T} = \frac{1}{20} \div \frac{1}{40} \text{ при } S_{т.ном} \cong 63 \div 160 \text{ МВА}.$$

Из опыта х.х.:

$$b_T \cong Y_T = \frac{I_x [\%]}{100} \cdot \frac{S_{\phi ном}}{U_{\phi ном}} \cdot \frac{1}{U_{\phi ном}} = \frac{I_x [\%]}{100} \cdot \frac{S_{T ном}}{U_{T ном}^2}$$

$$\Delta Q_x = U_{T ном}^2 \cdot b_T = \frac{I_x [\%]}{100} \cdot S_{T ном}$$

$$\Delta P_{xx} = 3 \cdot U_{\phi ном}^2 \cdot g_T, g_T = \frac{\Delta P_{xx}}{U_{T ном}^2}.$$

Параметры трансформаторов в справочной литературе

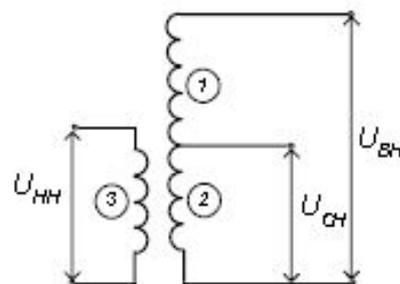
приводятся к ступени ВН ( т.е.  $U_{ном}$  это  $U_{ВН ном}$  ). Как уже

отмечалось, обычно вместо  $g_T$  и  $b_T$  задают  $\Delta Q_x$ .

# Автотрансформатор (АТ)

Применение АТ в сетях экономически оправдано для связи близких номиналов напряжений.

На рисунке показаны обмотки одной фазы автотрансформатора:



- 1- последовательная обмотка
- 2- общая обмотка
- 3- обмотка НН

$$S_{AT\text{ ном}} = \sqrt{3} \cdot U_{ВН\text{ ном}} \cdot I_{ВН\text{ ном}}$$

$S_{AT\text{ ном}}$  - номинальная мощность АТ, передаваемая из сети ВН в сеть СН при отсутствии нагрузки в сети НН.

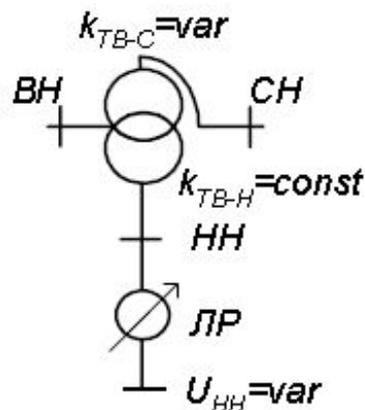
Типовая мощность - мощность, на которую рассчитывается последовательная обмотка.

$$S_{тип} = \sqrt{3} \cdot (U_{ВН\text{ ном}} - U_{СН\text{ ном}}) \cdot I_{ВН\text{ ном}} = \sqrt{3} \cdot U_{ВН\text{ ном}} \cdot I_{ВН\text{ ном}} \cdot \left(1 - \frac{U_{СН\text{ ном}}}{U_{ВН\text{ ном}}}\right) = S_{AT\text{ ном}} \cdot \alpha$$

$\alpha$  - коэффициента выгоды, которым обусловлена целесообразность применения АТ.

если  $U_{СН\text{ ном}} \rightarrow U_{ВН\text{ ном}}$ , то  $S_{тип} \rightarrow 0$

У автотрансформатора регулирование коэффициента трансформации осуществляется за счет устройства РПН, устанавливаемого на ступени СН либо в нейтрали. В последнем случае  $k_{ТВ-Н}$  и  $k_{ТВ-С}$  оказываются взаимозависимыми (связанными).



$$k_{ТВ-Н} = \frac{U_{ВНном}}{U_{ННном}} = const. \quad k_{ТВ-С} = \frac{U_{ВНном}}{U_{СНном} \cdot \left(1 + \frac{n \cdot \Delta U}{100}\right)}$$

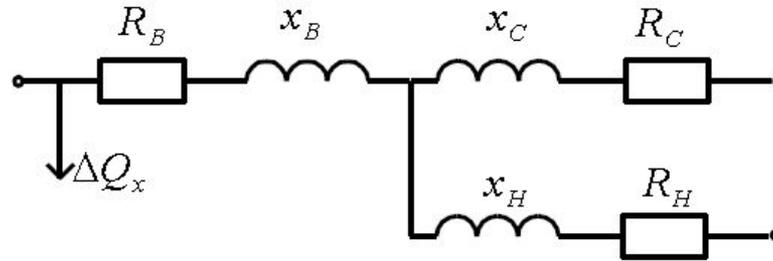
### Линейный регулятор (ЛР)

Для регулирования напряжения на ступени НН (в случае необходимости) включают линейные регуляторы (ЛР).

ЛР- это статические устройства для регулирования напряжения. ЛР могут включаться последовательно с трансформатором, не имеющем РПН, или непосредственно в линию.

Для автотрансформаторов с РПН на ступени СН применение ЛР для регулирования напряжения на ступени НН более оправдано, чем установка второго устройств РПН. ЛР выполняются в трехфазном исполнении на напряжение 10-35кВ, мощностью 16÷100МВА, и обеспечивают диапазон регулирования  $\pm 15\% U_H$ .

## Схема замещения автотрансформатора (АТ) и трехобмоточного трансформатора.



Параметры схемы замещения:

$$x_{Ti} = \frac{u_{ki} [\%] \cdot U_{i \text{ ном}}^2}{100 \cdot S_{T \text{ ном}}} \quad R_{Ti} = \frac{\Delta P_{ki} \cdot U_{i \text{ ном}}^2}{S_{T \text{ ном}}^2}, \text{ где } i = C, H, B.$$

$$\text{Из опыта х.х : } \Delta Q_x = \frac{I_x [\%]}{100} \cdot S_{AT \text{ ном}},$$

$$\text{Из опыта к.з.: } \Delta P_{kB-H} [\kappa Bm], \Delta P_{kB-C} [\kappa Bm], \Delta P_{kC-H} [\kappa Bm], \\ U_{kB-H} [\%], U_{kB-C} [\%], U_{kC-H} [\%].$$

Далее необходимо найти:

$u_{kB} = \frac{1}{2} \cdot (u_{kB-H} + u_{kB-C} - u_{kC-H})$ $u_{kC} = \frac{1}{2} \cdot (u_{kB-C} + u_{kC-H} - u_{kB-H})$ $u_{kH} = \frac{1}{2} \cdot (u_{kB-H} + u_{kC-H} - u_{kB-C}),$	(*)
--	-----

(\*) аналогичные выражения можно записать для  $\Delta P_{kB-H} [\kappa Bm], \Delta P_{kB-C} [\kappa Bm], \Delta P_{kC-H} [\kappa Bm].$

Поскольку мощность обмотки НН отличается от  $S_{AT\text{ ном}}$  и составляет величину (20-50)%  $S_{AT\text{ ном}}$ , необходимо данные опытов к.з. привести к номинальной мощности:

$$\Delta P'_{k\text{ В-Н}} = \Delta P_{k\text{ В-Н}} \cdot \frac{S_{AT\text{ ном}}^2}{S_{НН\text{ ном}}^2}, \quad \Delta P'_{k\text{ С-Н}} = \Delta P_{k\text{ С-Н}} \cdot \frac{S_{AT\text{ ном}}^2}{S_{НН\text{ ном}}^2}$$

$$u'_{k\text{ В-Н}} = u_{k\text{ В-Н}} \cdot \frac{S_{AT\text{ ном}}}{S_{НН\text{ ном}}}, \quad u'_{k\text{ С-Н}} = u_{k\text{ С-Н}} \cdot \frac{S_{AT\text{ ном}}}{S_{НН\text{ ном}}}$$

После чего можно воспользоваться формулами для определения  $X_{Ti}$  и  $R_{Ti}$ .

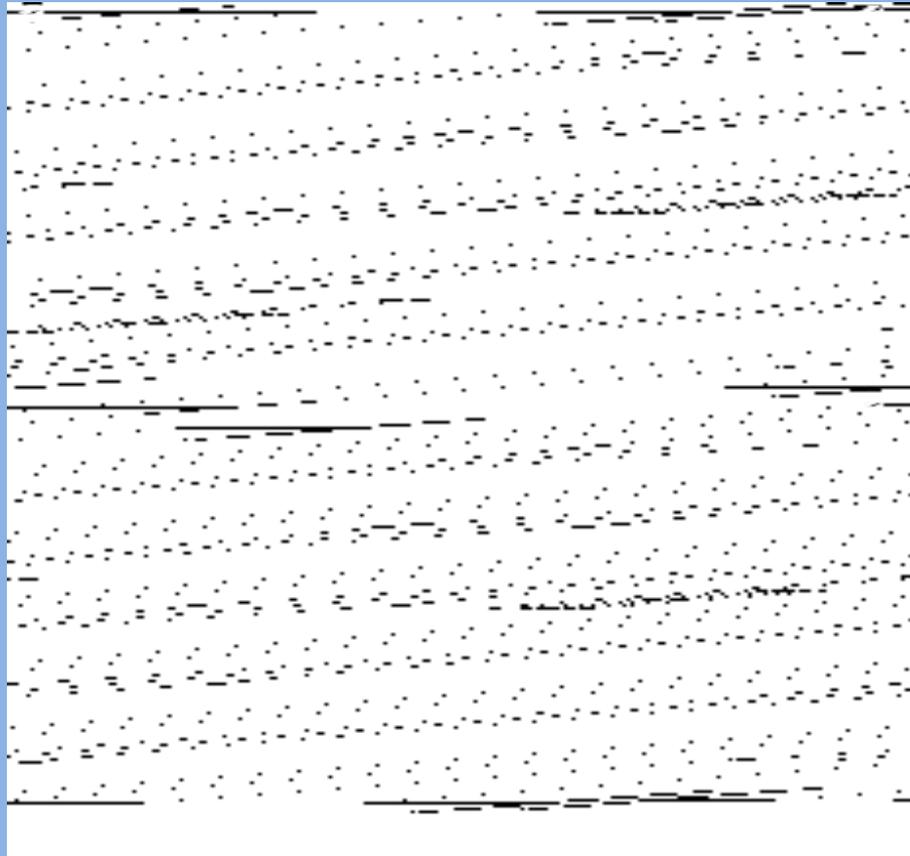
### Трехобмоточный трансформатор

У трехобмоточного трансформатора имеет место только электромагнитная связь обмоток ВН-СН-НН. Схема замещения трехобмоточного трансформатора выглядит аналогично АТ.

В случае, когда мощности обмоток СН и НН отличаются от номинальной мощности трансформатора, необходимо также выполнить пересчет данных опытов к.з. Ниже приведены возможные соотношения мощностей обмоток трехобмоточного трансформатора.

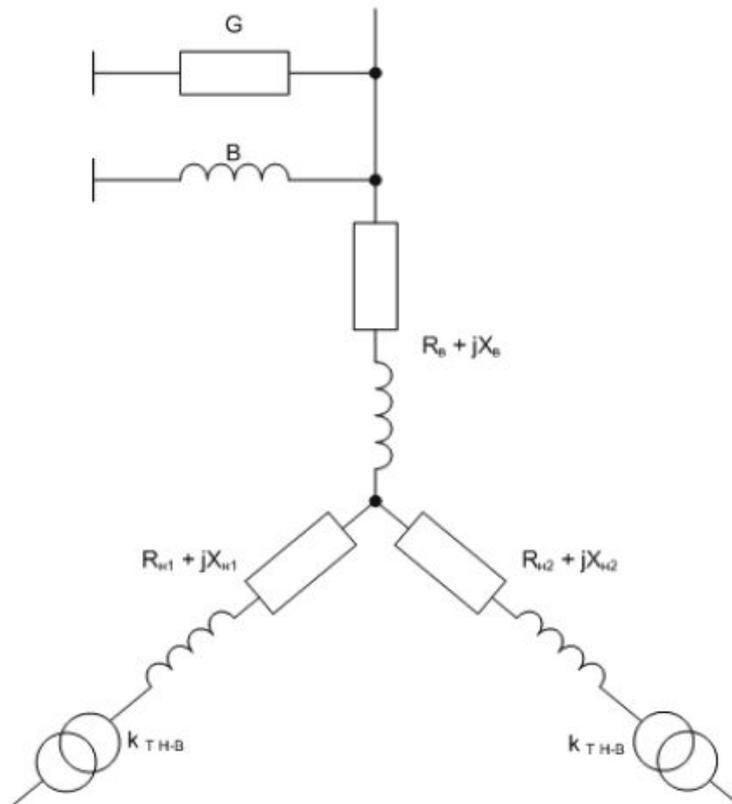
$S_{ВН\text{ ном}}$	$S_{СН\text{ ном}}$	$S_{НН\text{ ном}}$
100%*	100%	100%
100%	66,7%	33,3%
100%	50%	50%

# Трансформатор с расщепленной обмоткой НН



## Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой НН.

Для трансформаторов с расщепленной на 2 части обмоткой НН в общем случае такая же как и для трехобмоточного трансформатора:



Для трансформаторов с расщепленной обмоткой специфическими параметрами являются:

- **сопротивление расщепления  $Z_P$**  :

$$Z_P = Z_{H1-H2} = Z_{H1} + Z_{H2},$$

поскольку мощности обмоток НН одинаковы, то

$$Z_{H1} = Z_{H2} = \frac{Z_P}{2} = \frac{Z_{H1-H2}}{2} ;$$

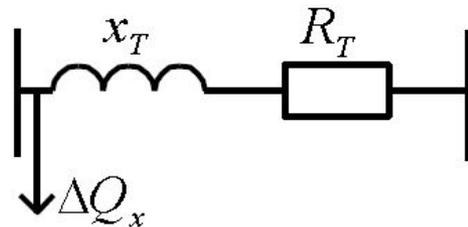
- **сквозное сопротивление  $Z_{скв} = Z_{В-Н}$** , равное сопротивлению между выводами обмотки высокого напряжения и объединенными параллельными ветвями расщепленной обмотки низшего напряжения;

- **коэффициент расщепления  $K_P$** :

$$K_P = \frac{Z_P}{Z_{скв}} = \frac{Z_{H1-H2}}{Z_{В-Н}}$$

Для трехфазных трансформаторов  $K_P = 3.34 \div 3.64$ ; при отсутствии точных данных принимается  $K_P = 3.5$ . Для трехфазной группы однофазных трансформаторов  $K_P = 4$ .

В расчетах установившихся режимов трансформаторы с расщепленными обмотками допустимо представлять упрощенными схемами замещения (такими же как и для двухобмоточных трансформаторов).

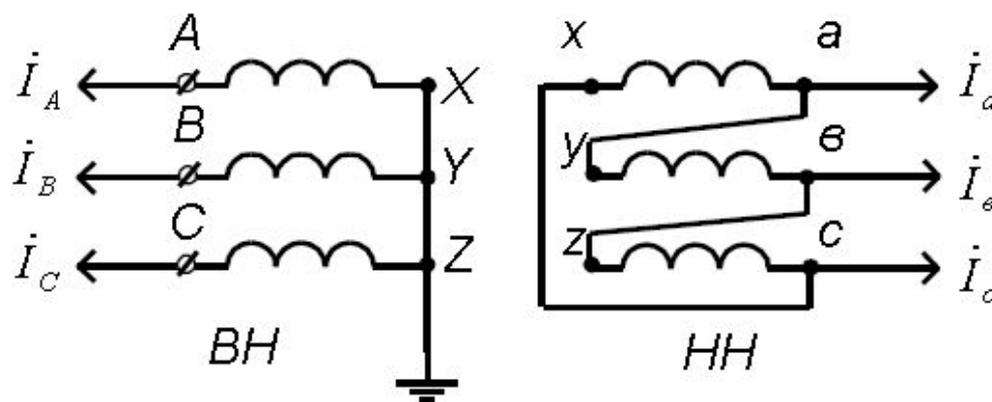


## Схемы замещения трансформаторов с учетом группы соединения обмоток.

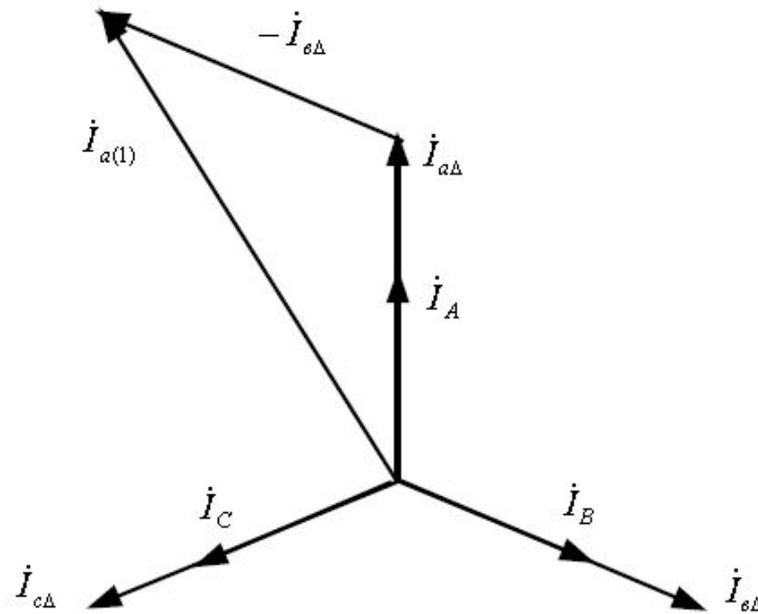
Силовые трансформаторы имеют группы соединения обмоток, которые определяют фазовый сдвиг между векторами линейных напряжений трансформатора, либо фазных токов в линиях на ступени *ВН* и *НН*.

Рассмотрим наиболее часто применяемый способ соединений обмоток *ВН/НН* -  $y_0/\Delta$  (11-я группа).

В этом случае вектора линейных напряжений (или вектора токов во внешней сети) сдвинуты на  $30\text{град}$ .



Токи (и напряжения) образуют систему прямой последовательности:

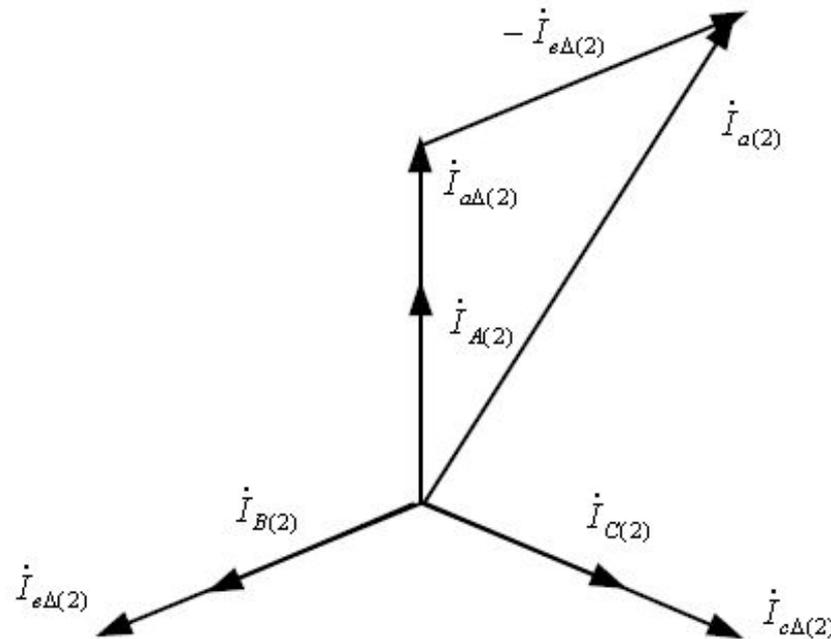


$$\dot{I}_{a(1)} = \dot{I}_{A(1)} \cdot e^{-j \cdot n \cdot \frac{\pi}{6}} \cdot k$$

$k$ - линейный коэффициент трансформации,  $k = k_T \cdot \sqrt{3}$ ,

$k_T$  - фазный коэффициент трансформации.

**Токи (и напряжения) образуют систему обратной последовательности.**



$$\dot{I}_{\alpha(2)} = \dot{I}_{A(2)} \cdot e^{-j \cdot n \frac{\pi}{6}} \cdot k$$

$k$ - линейный коэффициент трансформации,  $k = k_T \cdot \sqrt{3}$ ,

$k_T$  - фазный коэффициент трансформации.

Для схем соединения обмоток ВН и НН ( $Y_0/\Delta$ )

на ступени НН получим:

$$\dot{I}_a = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) \cdot k_T, \quad \dot{I}_b = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \cdot k_T, \quad \dot{I}_c = (\dot{I}_C - \dot{I}_A) \cdot k_T$$

$$\dot{I}_a = (\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} - a^2 \cdot \dot{I}_{A1} - a \cdot \dot{I}_{A2} - \dot{I}_{A0}) \cdot \frac{k}{\sqrt{3}},$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{A1} \cdot (1 - a^2) \frac{k}{\sqrt{3}} + \dot{I}_{A2} \cdot (1 - a) \frac{k}{\sqrt{3}}.$$

$$a = e^{j \frac{2 \cdot \pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = e^{j \frac{4 \cdot \pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

$$1 - a^2 = \frac{3}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot e^{j 30^\circ} \quad 1 - a = \frac{3}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot e^{-j 30^\circ}$$

$$\dot{I}_a = (\dot{I}_{A1} \cdot e^{j 30^\circ} + \dot{I}_{A2} \cdot e^{-j 30^\circ}) \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{k}{\sqrt{3}} = (\dot{I}_{A1} \cdot e^{j 30^\circ} + \dot{I}_{A2} \cdot e^{-j 30^\circ}) \cdot k,$$

$$e^{j 30^\circ} = e^{-j \cdot n \cdot \frac{\pi}{6}}, \quad n=11, \quad e^{-j 30^\circ} = e^{-j \cdot n \cdot \frac{\pi}{6}}, \quad n=1.$$

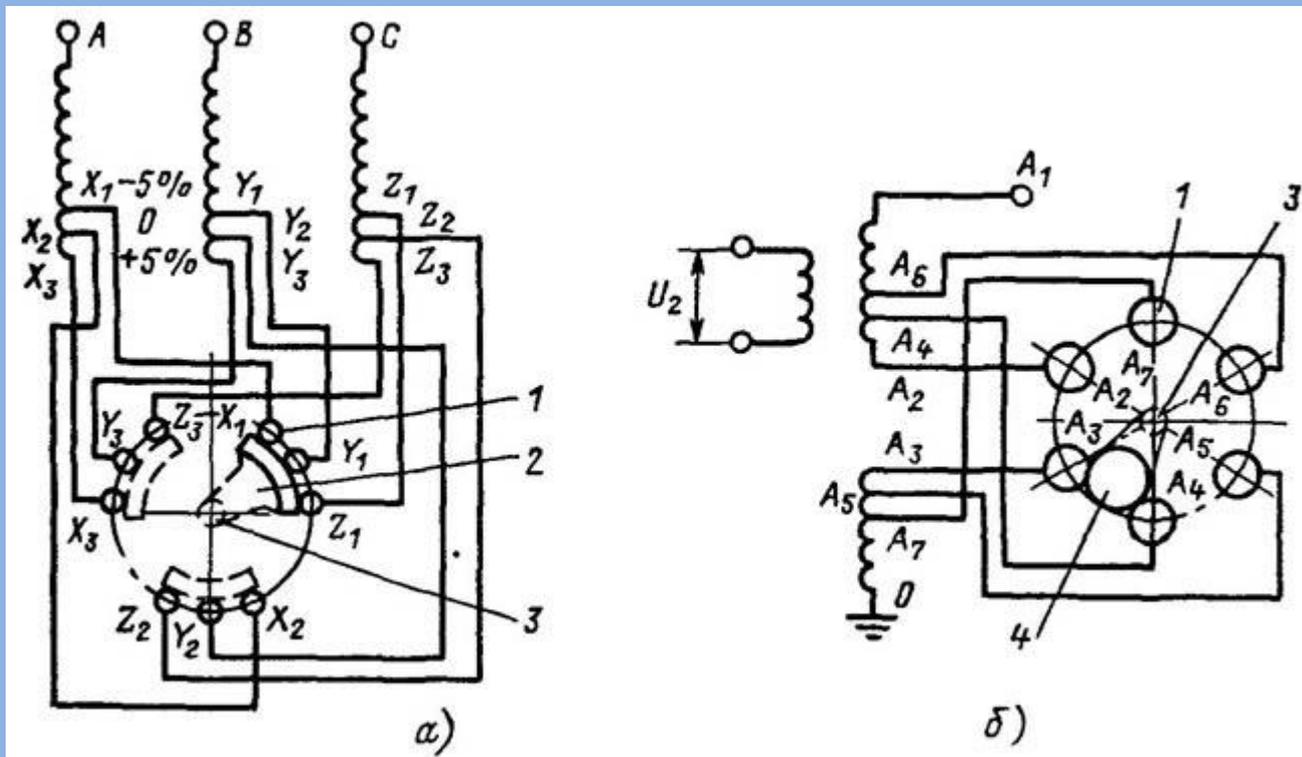
Итак,  $n=11$ , либо  $n=1$  (для токов и напряжений прямой и обратной последовательностей соответственно).

В случае, когда схемы соединения обмоток одинаковы, группы соединений четные.

**Коэффициент трансформации - это комплексная величина, а фазовый сдвиг между векторами токов (или напряжений) различается при протекании токов прямой и обратной последовательностей.**

**Регулирование коэффициента  
трансформации  
без возбуждения (ПБВ)  
под нагрузкой (РПН)**

# Варианты выполнения ПБВ



а - ответвления вблизи нулевой точки обмотки  $\pm 5\%$  с трехфазным переключателем на три положения (**распределительные трансформаторы**),

б - ответвления в середине обмотки  $\pm 2 \times 2,5\%$  с однофазными переключателями на пять положений (фаза А) для **мощных трансформаторов**;

1 - неподвижный контакт, 2 - сегмент контактный;

3 - вал переключателя, 4 - контактные кольца

- Устройство ПБВ позволяет регулировать напряжение в пределах  $\pm 5\%$ , для чего трансформаторы небольшой мощности кроме основного вывода имеют два ответвления от обмотки высшего напряжения:  $+5\%$  и  $-5\%$  (рис.а). Если трансформатор работал на основном выводе 0 и необходимо повысить напряжение на вторичной стороне  $U_2$ , то, отключив трансформатор, производят переключение на ответвление  $-5\%$ , уменьшая тем самым число витков  $w_1$ .
- На трансформаторах средних и больших мощностей предусматриваются четыре ответвления  $\pm 2 \times 2,5\%$ , переключение которых производится специальными переключателями барабанного типа, установленными отдельно для каждой фазы (рис.б). Рукоятка привода переключателя выведена на крышку трансформатора.
- При замыкании роликом переключателя контактов  $A_4$ - $A_5$  трансформатор имеет номинальный коэффициент трансформации. Положения  $A_3$ - $A_4$  и  $A_2$ - $A_3$  соответствуют увеличению коэффициента трансформации на  $2,5$  и  $5\%$ , а положения  $A_5$ - $A_6$  и  $A_6$ - $A_7$  - уменьшению на  $2,5$  и  $5\%$ .
- Устройство ПБВ не позволяет регулировать напряжение в течение суток, так как это потребовало бы частого отключения трансформатора для производства переключений, что по условиям эксплуатации практически недопустимо. Обычно ПБВ используется только для сезонного регулирования напряжения

# Переключение ответвлений под нагрузкой (РПН)

Переключающие устройства РПН выполняются с токоограничивающим реактором, токоограничивающими сопротивлениями и без них. РПН состоит из избирателя отводов обмотки, контакторов для отключения тока в цепях переключающего устройства, реактора или сопротивлений, с помощью которых ограничивается ток в переключаемой части обмотки в промежуточном положении без разрыва цепи тока нагрузки трансформатора. РПН могут иметь ручной привод, электрический с кнопками управления или автоматический, а также элементы автоматики и сигнализации.

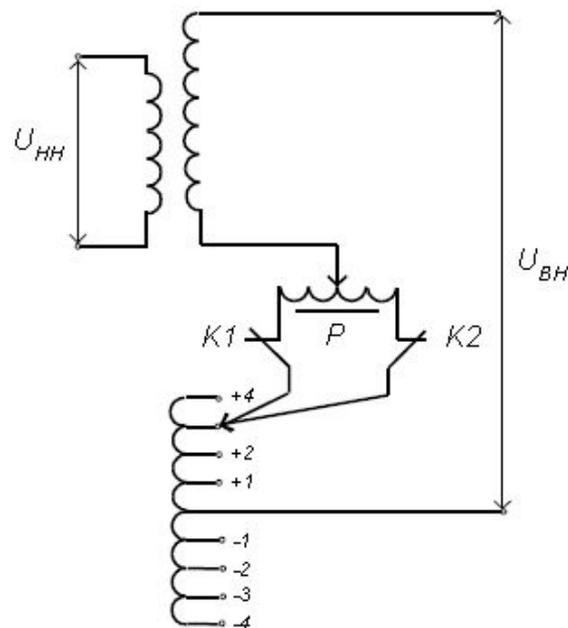


Рис. Схема РПН (одна фаза).

Электрическая схема каждой фазы устройства РПН состоит из двух симметричных цепей (избиратель с системой подвижных и неподвижных контактов, контакторы  $K1$  и  $K2$  и реактор  $P$ ). Для трансформаторов класса 220кВ и выше вместо реакторов используют активное сопротивление, которое позволяет в течение небольшого времени поглощать большие количества теплоты.

На схеме показано рабочее положение на одном из отводов обмотки.

## Принцип работы РПН

Переход на другое ответвление происходит так: размыкается контакт К1 (или К2) контактора, избиратель одной цепи переходит на нужный отвод обмотки, после чего контакт контактора замыкается (переход на другой отвод первой параллельной цепи окончен). Далее в той же последовательности осуществляется переход другой параллельной цепи на тот же отвод, на который перешел избиратель первой цепи.

Реактор в этой схеме ограничивает ток в цепи "моста", когда одна параллельная цепь перешла на следующий отвод, а другая еще находится на предыдущем отводе.



# Регулирование напряжения в автотрансформаторах

**Связанное регулирование.** Если ответвления выполнить в нейтральной точке, то это позволит облегчить изоляцию переключающего устройства и рассчитать его на меньший ток, так как в общей обмотке автотрансформатора проходит разность токов. При переключении ответвлений одновременно меняется число витков в обмотках ВН и СН, что приводит к резким изменениям индукции в сердечнике и колебаниям напряжения на обмотке НН.

**Независимое регулирование** в автотрансформаторе можно осуществить с помощью регулировочной обмотки на линейном конце среднего напряжения. В этом случае переключающее устройство должно быть рассчитано на полный номинальный ток, а изоляция его - на полное напряжение средней обмотки.

# Технические характеристики современных устройств РПН

Способ и диапазон регулирования:  
РПН в нейтрале ВН  $\pm 16\%$ ;  $\pm 9$  ступеней

•

Количество переключений до первой ревизии, **не менее 300000**

Механический ресурс контактора ( количество переключений),  
**не менее 1200 000**

Износостойкость контактов при  $(0,7-1,0)I_{ном}$ ,  
(количество переключений), **не менее 600 000**

# Влияние РПН трансформаторов ( $D_{KT} = 9 \times 1,78\%$ ) на $U_k$ (%)

$S_{ном.тр}$ МВ·А	Значения $u_k$ между обмотками, %		$S_{ном.тр}$ МВ·А	Значения $u_k$ между обмотками, %	
	ВН—СН	ВН—НН		ВН—СН	ВН—НН
Двухобмоточные трансформа- торы РПН			Трехобмоточные трансформа- торы РПН		
6,3	—	9,63/11,80	6,3	10,12/12,38	17,23/19,51
10,0	—	8,70/12,36	10,0	9,99/12,69	16,66/19,50
16,0	—	9,80/11,71	16,0	9,50/11,69	16,40/18,50
25,0	—	9,84/11,72	16,0	16,48/18,68	9,58/11,79
32,0	—	9,77/11,58	25,0	9,36/11,20	16,34/18,21
40,0	—	9,59/11,46	40,0	9,33/11,60	16,63/18,79
80,0	—	9,76/11,60	40,0	16,55/18,78	9,36/11,48
125,0	—	10,50/11,90	63,0	9,31/11,27	16,50/19,92
			63,0	16,61/19,02	9,45/11,62
			80,0	9,21/11,25	16,50/18,40
			80,0	16,73/18,82	9,29/11,29

# Влияние РПН на $X_{тр}$

Вычислим для примера минимальное, среднее и максимальное значения сопротивлений рассеяния в омах для двухобмоточного трансформатора 110 кВ мощностью 10 МВ·А. По известному выражению [Л. 1]

$$X_{тр} = \frac{u_k \% U_{тр}^2}{100 S_{тр}}, \quad (1)$$

где  $U_{тр}^2$  — номинальное напряжение трансформатора, кВ;  $S_{тр}$  — номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Минимальное значение сопротивления трансформатора

$$X_{тр.мин} = \frac{u_{к.мин} U_{мин.ВН}^2}{100 S_{тр}} = \frac{8,7 \cdot 96,58^2}{100 \cdot 10} = 80 \text{ Ом},$$

где  $u_{к.мин} = 8,7\%$  (взято из таблицы).

Среднее значение сопротивления трансформатора

$$X_{тр.ср} = \frac{u_{к.ср} U_{ср.ВН}^2}{100 S_{тр}} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 10} = 139 \text{ Ом}.$$

# Кривые изменения $U_k$ и $X_{тр}$

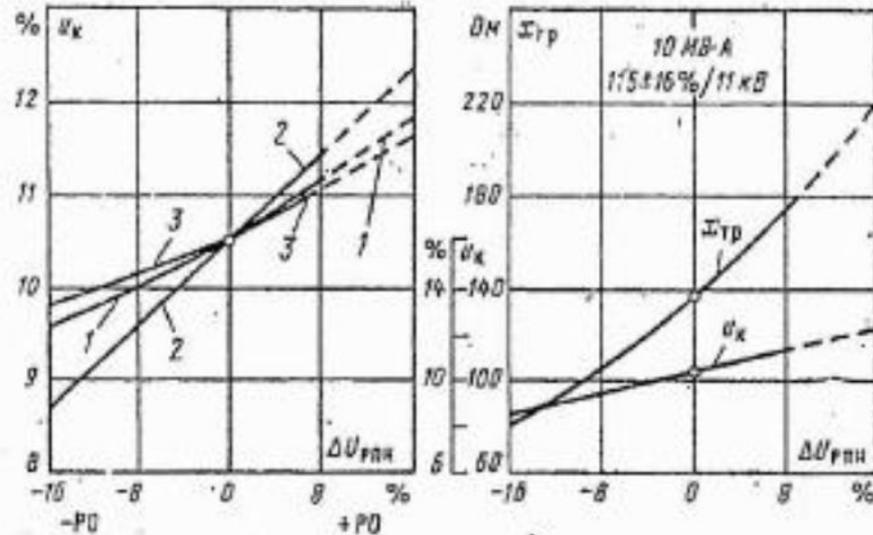


Рис. 1. Кривые изменения  $u_k$  в зависимости от ответвления регулируемой обмотки 110 кВ трансформаторов РПН:  $u_k = f(\Delta U_{РПН})$ .

1 — трансформатор мощностью 6,3 МВ·А; 2 — то же 10 МВ·А; 3 — то же 16, 25, 40 МВ·А.

Рис. 2. Кривая изменения сопротивления  $x_{тр}$  в зависимости от ответвления регулируемой обмотки 110 кВ трансформатора РПН мощностью 10 МВ·А, напряжением 115±16%/11 кВ —  $x_{тр} = f(\Delta U_{РПН})$  и зависимость  $u_k = f(\Delta U_{РПН})$  для этого же трансформатора (из рис. 1). Сопротивления в омах отнесены к стороне 110 кВ.



От регулировочной обмотки  $AT$  через избиратели ступеней  $I_1$  и  $I_2$  питается обмотка возбуждения  $B$  последовательного трансформатора  $ПТр$ . Во вторичной обмотке  $ПТр$ , включенной в рассечку линии, наводится добавочная ЭДС, величина которой зависит от положения избирателей  $I_1$  и  $I_2$ , а знак - от положения переключателя реверсирования 1-3.

При необходимости перехода в новое положение контактор  $K_1$  прерывает цепь избирателя  $I_1$  и последний переходит на одну ступень. Аналогично происходит переход избирателя  $I_2$  на тот же контакт. При этом обмотка  $B$  питается через одну ветвь реактора  $P$ , а витки между соседними ступенями обмотки  $AT$  замыкаются через последовательно включенные ветви реактора  $P$ .

После достижения последней ступени (соответствующей отсутствию добавочной Э.Д.С), выполняется реверс переключателя 1-3 и меняется направление ЭДС (избиратели также переводятся в новое крайнее положение). И так до полного использования регулировочного диапазона. Аналогично происходит изменение напряжения в линии в обратном направлении.